

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ТЕКСТИЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В ДЕКАБРЕ 1957 ГОДА, ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

**№ 6 (396)
2021**

Журнал включен в "Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

Журнал представлен в Научной
электронной библиотеке (НЭБ)
и имеет импакт-фактор РИНЦ

Журнал включен в Междуна-
родные базы данных: SCOPUS и
CAS(pt), индексирующие
научные издания

Электронный вариант журнала
размещен на сайте
<http://ttp.ivgpi.com>

Издание Ивановского государственного политехнического университета

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Е.В. РУМЯНЦЕВ (д.х.н., ректор).

Заместитель главного редактора:

Н.Л. КОРНИЛОВА (д.т.н., проф.).

Редакционная коллегия (Россия):

А.А. БИКБУЛАТОВА (к.т.н., проф.), Б.Н. ГУСЕВ (д.т.н., проф.), Т.Р. ДЕБЕРДЕЕВ (д.т.н., проф.), Г.П. ЗАРЕЦКАЯ (д.т.н., проф.), Н.Ю. КАЗАКОВА (д.т.н., проф.), Е.Н. КАЛИНИН (д.т.н., проф.), А.М. КИСЕЛЕВ (д.т.н., проф.), М.В. КИСЕЛЕВ (д.т.н., проф.), К.И. КОБРАКОВ (д.т.н., проф.), Ж.Ю. КОЙТОВА (д.т.н., проф.), А.Р. КОРАБЕЛЬНИКОВ (д.т.н., проф.), В.Е. КУЗЬМИЧЕВ (д.т.н., проф.), Н.А. КУЛИДА (д.т.н., проф.), А.Г. МАКАРОВ (д.т.н., проф.), Л.Ю. МАХОТКИНА (д.т.н., проф.), В.Е. МИЗОНОВ (д.т.н., проф.), А.П. МОРЫГАНОВ (д.т.н., проф.), Е.Н. НИКИФОРОВА (д.т.н., проф.), О.И. ОДИНЦОВА (д.т.н., проф.), А.Б. ПЕТРУХИН (д.э.н., проф.), А.Ф. ПЛЕХАНОВ (д.т.н., проф.), К.Э. РАЗУМЕЕВ (д.т.н., проф.), Л.В. РЕДИНА (д.т.н., проф.), П.Н. РУДОВСКИЙ (д.т.н., проф.), В.Е. РУМЯНЦЕВА (д.т.н., проф.), А.В. СИЛАКОВ (д.э.н., проф.), Н.А. СМИРНОВА (д.т.н., проф.), Г.Г. СОКОВА (д.т.н., проф.), Е.Я. СУРЖЕНКО (д.т.н., проф.), О.В. ТОЛОЧКО (д.т.н., проф.), А.В. ТРУЕВЦЕВ (д.т.н., проф.), Н.М. ФИЛИМОНОВА (д.э.н., проф.), А.В. ФИРСОВ (д.т.н., проф.), В.В. ХАММАТОВА (д.т.н., проф.), С.Ю. ХАШИРОВА (д.х.н., проф.), С.В. ХЕЙЛО (д.т.н., проф.), Ю.С. ШУСТОВ (д.т.н., проф.), С.С. ЮХИН (д.т.н., проф.)

Международная редакционная коллегия:

ADOLPHE S. DOMINIQUE (д.т.н., Франция), GERSAK JELKA (д.т.н., Словения), UDVAL LODOI (д.т.н., Монголия), Е.В. ВАНКЕВИЧ (д.э.н., Беларусь), А.А. КУЗНЕЦОВ (д.т.н., Беларусь), С.В. ЛОМОВ (д.т.н., Бельгия), Д.Б. РЫКЛИН (д.т.н., Беларусь), С.Ш. ТАШПУЛАТОВ (д.т.н., Узбекистан), Н.Н. ЯСИНСКАЯ (д.т.н., Беларусь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ (д.с.н., проф.), А.В. ДЕМИДОВ (д.т.н., проф.), А.Р. НАУМОВ (д.х.н., проф.), М.Г. БАЛЫХИН (д.э.н., проф.).

Ответственный секретарь *Е.Н. КАЛИНИН*

Адрес редакции: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21.

Тел.: (4932) 41-75-02.

E-mail: ttp@ivgpu.com

<http://ttp.ivgpu.com>

Издание зарегистрировано в Министерстве печати РФ. Регистрационный №796. Сдано в набор 01.12.2021. Подписано в печать 30.12.2021. Формат 60x84 1/8. Бум. кн.-журн. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 40,46; Усл. кр.-отт. 40,71. Заказ 4492.

Тираж 400 экз.

"Известия вузов. Технология текстильной промышленности"
Издание Ивановского государственного политехнического университета
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21
E-mail: ttp@ivgpu.com

Издательско-полиграфический комплекс "ПресСто"
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8
Тел. 8-930-330-26-30
E-mail: pressto@mail.ru

© "Известия вузов. Технология текстильной промышленности", 2021

Ministry of Science and Higher Education
of Russian Federation

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**TEXTILE
INDUSTRY
TECHNOLOGY**

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti

PEER-REVIEWED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

ESTABLISHED IN DECEMBER OF 1957, 6 ISSUES PER YEAR

**№ 6 (396)
2021**

The journal is included in the "List of the leading peer-reviewed journals and publications issued in the Russian Federation, in which the major scientific results of dissertations for the degrees of doctor and candidate of sciences should be published"

The journal is presented in the Scientific Electronic Library and has an RSCI impact factor

The journal is included in the Scopus and CAS(pt) bibliographic databases

The on-line version of the journal is available at <http://ttp.ivgpu.com>

Published by Ivanovo State Polytechnical University

EDITORIAL BOARD

Chief editor: *E.V. RUMYANTSEV (d.ch.s., rector).*
Deputy of chief editor: *N.L. KORNILOVA (d.en.s., prof.).*

members:

Editorial board (Russia):

A.A. BIKBULATOVA (k.en.s., prof.), B.N. GUSEV (d.en.s., prof.), T.R. DEBERDEEV (d.en.s., prof.), G.P. ZARETSKAYA (d.en.s., prof.), N.Yu. KAZAKOVA (d.en.s., prof.), E.N. KALININ (d.en.s., prof.), A.M. KISELEV (d.en.s., prof.), M.V. KISELEV (d.en.s., prof.), K.I. KOBRAKOV (d.en.s., prof.), Zh.Yu. KOYTOVA (d.en.s., prof.), A.R. KORABELNIKOV (d.en.s., prof.), V.E. KUZMICHEV (d.en.s., prof.), N.A. KULIDA (d.en.s., prof.), A.G. MAKAROV (d.en.s., prof.), L.Yu. MAKHOTKINA (d.en.s., prof.), V.E. MIZONOV (d.en.s., prof.), A.P. MORYGANOV (d.en.s., prof.), E.N. NIKIFOROVA (d.en.s., prof.), O.I. ODINTSOVA (d.en.s., prof.), A.B. PETRUKHIN (d.ec.s., prof.), A.F. PLEKHANOV (d.en.s., prof.), K.E. RAZUMEEV (d.en.s., prof.), L.V. REDINA (d.en.s., prof.), P.N. RUDOVSKY (d.en.s., prof.), V.E. RUMYANTSEVA (d.en.s., prof.), A.V. SILAKOV (d.ec.s., prof.), N.A. SMIRNOVA (d.en.s., prof.), G.G. SOKOVA (d.en.s., prof.), E.Ya. SURZHENKO (d.en.s., prof.), O.V. TOLOCHKO (d.en.s., prof.), A.V. TRUEVTSEV (d.en.s., prof.), N.M. FILIMONOVA (d.ec.s., prof.), A.V. FIRSOV (d.en.s., prof.), V.V. KHAMMATOVA (d.en.s., prof.), S.Yu. KHASHIROVA (d.ch.s., prof.), S.V. KHEYLO (d.en.s., prof.), Yu.S. SHUSTOV (d.en.s., prof.), S.S. YUKHIN (d.en.s., prof.).

International editorial board:

ADOLPHE C. DOMINIQUE (dens., France), GERŠAK JELKA (dens., Sloveniya), UDVAL LODOI (dens., Mongoliya), E.V. VANKEVICH (d.ec.s., Belarus), A.A. KUZNETSOV (d.en.s., Belarus), S.V. LOMOV (d.en.s., Belgium), D.B. RYKLIN (d.en.s., Belarus), S.Sh. TASHPULATOV (d.en.s., Uzbekistan), N.N. YASINSKAYA (d.en.s., Belarus)

EDITORIAL COUNCIL

V.S. BELGORODSKY (d.soc.s., prof.), A.V. DEMIDOV (d.en.s., prof.), A.R. NAUMOV (d.ch.s., prof.), M.G. BALKHIN (d.ec.s., prof.)

Executive secretary *E.N. KALININ*

*Address: 153000, Ivanovo, Sheremetev av., 21.
Tel.: +7(4932)41-75-02.
E-mail: ttp@ivgpu.com
http:// ttp.ivgpu.com*

Registered with the Ministry of Printing of Russian Federation. Registration no. 796. Passed for typesetting on 01.12.2021. Signed for printing on 30.12.2021. Format 60×84 1/8. Book/journal paper. Offset printing. 40.46 conventional sheets. 40.71 conventional. Order 4492.

Circulation of 400.

"Proceedings of higher education institutions. Textile Industry Technology"
Published by Ivanovo State Polytechnical University
153000, Ivanovo, Sheremetev av., 21
E-mail: ttp@ivgpu.com

Publishing-printing complex "PresSto"
153025, Ivanovo, Dzerzhinskogo, 39, building 8
Tel. 8-930-330-26-30
E-mail: pressto@mail.ru

УДК 677.6

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_5

**ОБЗОР ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**OVERVIEW OF WAYS OF POLYMER FIBER COMPOSITE MATERIALS
DEVELOPMENT AND APPLICATION**

Т.Р. ДЕБЕРДЕЕВ, К.А. АНДРИАНОВА, Л.М. АМИРОВА

T.R. DEBERDEEV, K.A. ANDRIANOVA, L.M. AMIROVA

(Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казанский национальный исследовательский
технический университет им.А.Н.Туполева)

(Kazan National Research Technological University,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev)

E-mail: deberdeev@mail.ru; tina_a@mail.ru; amirovaliliyam@mail.ru

Работа посвящена обзору современных направлений в области развития полимерных композиционных материалов. Рассмотрены российские и зарубежные обзорные статьи и монографии, посвященные технологии производства изделий из композитов, контролю и моделированию свойств композиционных материалов. Отдельно рассмотрены обзорные работы по композиционным материалам с особыми функциональными свойствами (градиентные, электропроводящие, материалы с памятью формы). Приведены сведения о перспективных полимерных связующих и наполнителях, применяющихся сегодня в области технологии композитов. Затронуты вопросы экологической безопасности и вторичной переработки изделий из композитов. В заключении рассмотрены обзорные работы, посвященные применению композиционных материалов в различных областях техники, промышленности и медицины.

The work is devoted to a review of modern trends in the development of polymer composite materials. The article considers Russian and foreign review articles and monographs devoted to the technology of composites production, control and modeling of composite materials properties. The review papers on composite materials with special functional properties (gradient, electrically conductive, shape memory materials) are considered separately. Information on promising polymer binders and fillers used today in the field of composite technology is presented. The issues

of environmental safety and recycling of composite products were also touched upon. In conclusion, reviews devoted to the use of composite materials in various fields of technology, industry and medicine are considered.

Ключевые слова: композиционные материалы, технологии композитов, методы контроля, моделирование, связующее, наполнитель, вторичная переработка.

Keywords: composite materials, composite technologies, control methods, modeling, binder, filler, recycling.

Композиционные материалы благодаря комплексу ценных свойств применяются практически во всех отраслях: аэрокосмической, автомобильной, судостроении, строительной, спортивной, биомедицинской и многих других. Несмотря на то, что композиты уже достаточно хорошо изучены и стали привычными материалами, интерес к ним не ослабевает. Использование различных типов матриц, наполнителей, добавок, модификаторов позволяет получать полимерные композиционные материалы с разной структурой и требуемым набором эксплуатационных свойств.

Технологии композитов

В настоящее время существует большое разнообразие технологий изготовления изделий из полимерных композиционных материалов. Опубликованы интересные книги и обзорные статьи, посвященные новым разработкам в данной области. Например, для снижения пористости изделий в безавтоклавных методах появляется необходимость получения семипрегов [1]. Бурно развиваются и совершенствуются технологии получения композитов на основе термореактивных смол различной вязкости и химической активности. В ряде обзоров рассматриваются технологии производства изделий из композиционных материалов на основе термопластичной матрицы [2], лазерные технологии [3], активно внедряются технологии аддитивного производства композитов [4]. Анализ литературы показывает, что 3D-плетение и 3D-тканность являются перспективными направлениями для получения многомерно нагруженных изделий из армированных пластиков [5].

Свойства композиционных материалов

Изделия из полимерных композиционных материалов эксплуатируются в различных условиях: температура, влажная и агрессивная среда, излучение и др., при этом могут происходить химические и физические процессы, приводящие к изменению их эксплуатационных свойств. В работе [6] приводится обзор исследований механических свойств армированных полимерных композитов при повышенных температурах. Трибологические аспекты и механизмы износа полимеров, армированных волокнами, играют важную роль для расширения областей применения композиционных материалов и повышения надежности конструкций на их основе [7].

Прогнозирование срока службы изделий из композиционных материалов является задачей сложной и, если проводить натурные испытания, то очень длительной, поэтому глубокое понимание процесса старения композитов в различных средах и условиях, а также разработка ускоренных методов испытания являются задачами очень актуальными [8].

Остаточные напряжения в композитных изделиях, возникающие в процессе их получения, могут приводить к короблению и даже снижению прочности, поэтому этот вопрос нельзя обойти вниманием в данном обзоре. В недавно изданной книге собраны работы, рассматривающие различные вопросы, связанные с пониманием явления остаточных напряжений в композитах: измерение, моделирование, способы снижения [9].

Методы контроля и моделирования

В композиционных материалах могут возникнуть дефекты, как в процессе изготовления, так и при эксплуатации. Большинство дефектов приводит к существенному снижению прочности материала, в связи с этим активно развиваются и совершенствуются методы испытания, исследования и контроля композиционных материалов, такие как акустическая эмиссия, вибрационные испытания, ультразвуковые испытания, инфракрасная термография, шерография, корреляция цифровых изображений, рентгеновская и нейтронная визуализация и др. Каждый метод неразрушающего контроля имеет собственный потенциал, преимущества и ограничения [10], [11]. Дальнейшее развитие методов неразрушающего контроля композитов направлено на создание интеллектуальных и автоматизированных систем контроля с высокой точностью и эффективными возможностями обработки данных стандартными методами, оборудованием и средствами, используемыми для комплексных исследований [12].

Одновременно с развитием композиционных материалов повышаются требования к срокам разработки новых материалов, внедрения и адаптации новых технологий. Решение этих задач лежит в использовании современных методов моделирования на всех стадиях изготовления продукции. Различные методы компьютерного моделирования могут применяться для прогнозирования структуры и свойств [13], а также процессов получения КМ.

В последние десятилетия использованию методов искусственного интеллекта (ИИ) в области моделирования композиционных материалов уделяется значительное внимание благодаря их превосходной способности анализировать огромное количество данных и выявлять корреляции между несколькими сложными взаимосвязанными явлениями [14]. Такие методы искусственного интеллекта, как машинное обучение и глубокое обучение, демонстрируют огромные преимущества и потенциал для прогнозирования важных механических свойств материалов и показывают, как изменения

определенных основных параметров влияют на общее поведение композитных материалов [15]. Использование методов многомасштабного моделирования дает дополнительные преимущества, которые позволят обеспечить эффективное, надежное и точное проектирование и анализ композитных материалов и конструкций [16]. Необходимо отметить, что только правильно спланированные эксперименты с обогащенной основной информацией в сочетании с физическими моделями расширят доступность данных для обучения моделей искусственных нейронных сетей.

Композиционные материалы с особыми свойствами

Одной из актуальных задач сегодня остается разработка композиционных материалов со специальными свойствами. В этом контексте интересен класс композитных материалов, называемых функционально-градиентные материалы (FGM), с заранее заданными плавно меняющимися свойствами, которые за последние 30 лет их применения не только не потеряли актуальности, но и получили новый виток в развитии благодаря аддитивным технологиям [17].

Композиты на основе электропроводящих полимеров открывают широкие возможности создания материалов со специальными свойствами [18]. Проводящие полимеры применяют в качестве химических сенсоров, что основано на изменении их свойств при взаимодействии с соединениями и ионами, обладающими окислительно-восстановительной активностью. В случае проводящих полимеров может возникнуть электрохромный эффект при их переходе из проводящего (окисленного) состояния в непроводящее (восстановленное) путем изменения потенциала электрода. Электрохромные материалы, благодаря способности менять светопропускаемость в оптическом диапазоне, могут применяться в умных стеклах и дисплеях. Умные стекла на основе электрохромных материалов – активно развивающаяся тема. Концепция изменяемой светопропускаемости привлекательна, потому что способна сократить расход электроэнергии на кондиционирование [19].

Умные материалы и композиты это отдельная самостоятельная тема для обзора, упомянем лишь некоторые книги и обзорные статьи, вышедшие за последние годы [20], [21].

Ведутся работы по созданию полимерных композиционных материалов, обладающих памятью формы и пригодных к эксплуатации в условиях космоса, в литературе описаны различные композиционные материалы с памятью формы на основе полимерных матриц [22]. Создаются самозалечивающиеся (самовосстанавливающиеся) композиционные материалы на основе различных подходов: капсульные, каналные, памяти формы и др. [23].

Вторичная переработка

Большой объем производства и активное использование композиционных материалов приводит к возникновению проблемы их переработки и утилизации. Переработка и вторичное использование композиционных материалов, особенно на основе терморезистивных связующих, а также текстильных отходов, является одной из наиболее актуальных тем, рассматриваемых в научной и технической литературе [24]. Полимерные композиты, как на основе термопластов, так и реактопластов, требуют разработки специальных подходов по их вторичной переработке и утилизации. Хотя термопласты и пригодны для вторичного использования, однако армирование непрерывными волокнами и тканями создает ряд проблем, которые не позволяют их использовать в исходном состоянии, содержащем длинномерные наполнители, а процесс измельчения наполнителя порой усложняется пластичной матрицей [25]. Для терморезистивных матриц необходимость их утилизации стимулировала появление нового направления в химии полимерных композитов – витримеров - терморезистивных полимеров, пригодных, за счет перестройки химических связей, к вторичной переработке или восстановлению полимерной сетки после ее разрушения [26]. Актуальность вышеперечисленных работ связана с тем, что проблема вторичной переработки композитов становится востребованной как с точки зрения охраны

окружающей среды, так и в экономическом плане.

Биокомпозиты

Чтобы решить эту проблему, многими исследователями ведутся работы по созданию биоразлагаемых материалов. Различные вопросы получения и применения полимерных композитов с использованием натуральных волокон и связующих рассматриваются в ряде обзоров [27], в том числе по аддитивным технологиям [28].

Возобновляемые источники позволяют получать полимерные композиты не только биоразлагаемые, но и с различными специальными свойствами, в частности, электропроводящие [29], ударопрочные [30], с трибологическими свойствами [31] и другими высокими механическими свойствами [32].

Хотя биополимеры и могут снизить уровень загрязнения отходами пластиков и композитов на основе синтетических волокон и связующих, однако есть ряд ограничений по их использованию, такие как: более низкие и нестабильные свойства биокомпозитов, горючесть, затраты на выращивание сырья для биокомпозитов и его переработку, поэтому использование биокомпозитов часто экономически не оправданно и требует проведения всесторонней оценки [33].

В связи с этим не ослабевают интерес и к традиционным связующим, за последние 5 лет опубликованы новые книги по эпоксидным смолам и связующим на их основе [34]. Разрабатываются и активно внедряются новые теплостойкие связующие для композиционных материалов на основе фталонитрилов [35], бензоксазинов [36], цианэфиров [37] и др.

Рядом преимуществ перед терморезистивными связующими в производстве полимерных композиционных материалов обладают термопластичные матрицы [2]. Применение термопластичных матриц в составе композиционных материалов обеспечивает ряд преимуществ: неограниченный срок хранения полуфабриката, отсутствие длительного процесса отверждения, способность к релаксации напряжений, возможность вторичной переработки, отсутствие выделения растворителей, взрыво-

безопасность, нетоксичность. Большинство термопластичных полимеров – это крупнотоннажные продукты, менее дорогие по сравнению с терморезактивными полимерами. Сегодня интерес вызывает применение так называемых суперконструкционных термопластов специального назначения, обладающих повышенной теплостойкостью, прочностными, пожаробезопасными свойствами и низким водопоглощением, такие как полибензимидазолы, полиимиды, полиамидоимиды, полиэфиримиды, полиэфирэфкретоны, полисульфоны, полифениленсульфид и др. [38]. Активно развиваются технологии получения материалов и изделий из термопластичных композитов, такие как пултрузия, роллтрязия, термоформование консолидированных пластин [39].

Улучшаются свойства волокнистых наполнителей: керамических [40], углеродных наполнителей [41] и тканей на их основе [42]. Использование различных по природе волокон открывает большие возможности для создания композитов, сочетающие различные взаимоисключающие свойства [43].

Применение

В заключении хочется отметить, что вопросам обзора применения композитов в различных областях техники и промышленности посвящено большое число работ.

Авиакосмическая отрасль была и остается основным драйвером композитов [44], применяются и улучшаются традиционные угле-, стекло-, базальто- и другие пластики, разрабатываются принципиально новые «смарт» композиты позволяющие создавать конструкции с функциями самодиагностирования, управляемого изменения форм, самозалечивания, антиобледенения, радиопрозрачности и др. [45].

Трудно переоценить роль судостроения в развитии композитов, в настоящее время полимерные композиционные материалы благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости и удельных механических свойств применяются для изготовления корпусов судов, руля управления и направления, лопасти турбин и многого другого как в гражданских, так и военных судах [46].

Благодаря широким возможностям композитов, относительному снижению их стоимости и в результате – увеличению объемов производства они стали активно применяться в автомобилестроении, что позволило значительно снизить вес автомобилей и соответственно расход топлива, а также повысить безопасность пассажиров и водителя [47].

В последние годы строительный сектор стал одним из крупнейших потребителей полимерных композитов. В частности, стеклопластики применяются в строительстве уже более 50 лет, в основном для восстановления зданий, однако из-за высокой стоимости и недостаточной долговечности они не применялись в большом объеме. Разработки последних лет по улучшению характеристик армированных пластиков позволили расширить области их применения далеко за пределы восстановления существующих зданий: для сейсмической модернизации зданий и мостов, усиления металлических и деревянных балок и др. [48].

Спортивная индустрия стала не только активным потребителем полимерных композитов, но и сектором, вкладывающим средства в исследования и разработку полимерных композиционных материалов и технологий получения спортивных изделий из них. Трудно перечислить все спортивные изделия, изготавливаемые из полимерных композитов, этот перечень не только огромен, но и постоянно увеличивается [49].

Полимерные композиционные материалы благодаря высоким удельным прочностным характеристикам, биосовместимости и другим ценным и регулируемым свойствам стали активно применяться в различных областях медицины. Армированные полимерные композиты решают многие проблемы, связанные с применением традиционных изотропных стоматологических материалов [50]. Они были впервые протестированы в 1960-х годах, но более широко исследованы и клинически одобрены для использования в стоматологии в течение последних 35 лет, а для использования в медицинских имплантатах – в течение последних 20 лет. Открываются новые области применения полимерных

композитов благодаря их универсальным свойствам с точки зрения биомеханики, возможности добавления биологически активных соединений в структуру медицинского устройства и в полимерную матрицу. Полимерные композиты нашли применение в ортопедической [51] и травматологической хирургии и хирургии позвоночника. Искусственные конечности нового поколения становятся, более функциональными, долговечными, эстетичными, и соответственно требования к применяемым материалам расширяются и усложняются. Для изготовления протезов используются углепластики, углерод-углеродные композиты. Выбор материала при создании ортопедического устройства имеет решающее значение для его успеха, прежде всего физические свойства ортопедических материалов, такие как их эластичность, твердость, плотность, реакция на температуру, долговечность, гибкость, сжимаемость и упругость.

Надо отметить, что обзор путей развития полимерных композитов, приведенный в статье, охватывает далеко не весь спектр возможностей данных материалов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Донецкий К.И., Душин М.И., Мищун М.И., Севастьянов Д.В. Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017, №12 (60). С.81...93.
2. Сорокин А.Е., Сагомонова В.А., Петрова А.П., Соловьянчик Л.В. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021, № 3 (97). С.78...86.
3. Angelova Y. P. Factors influencing the laser treatment of textile materials: An overview // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 15, 2020. 1...16.
4. Wang Y., Zhou Y., Lin L., Corker J., Fan M. Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM Composites // Composites Part A. –139, 2020. P. 106...114.
5. Mengru Li, Peng Wang, Francois Boussu and Damien Soulat. A review on the mechanical performance of three-dimensional warp interlock woven fabrics as reinforcement in composites //Journal of Industrial Textiles. – 2020. P.1...50.
6. Bazli M., Abolfazli M. Mechanical properties of fibre-reinforced polymers under elevated temperatures: an overview // Polymers. – 2020, 12, 2600.
7. Meghashree Padhan, Umesh Marathe, Jayashree Bijwe. Surface topography modification, film

transfer and wear mechanism for fibre reinforced polymer composites -An Overview // Surf. Topogr.: Metrol. Prop. – 2020, 8(4), 043002.

8. Antonio Carvalho Filho. Durability of Industrial Composites. Taylor & Francis Group, LLC. – 2019.
9. Residual stresses in composite materials. Woodhead Publishing Limited. – 2021.
10. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. – 2021, № 5 (99). С.105...113.
11. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Ультразвуковой контроль радиусных зон конструкций из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021, № 8 (102).С. 92...103.
12. BingWang, Shuncong Zhong, Tung-Lik Lee, Kevin S Fancey and Jiawei Mi. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review //Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 12(4), 2020. P. 1...28.
13. Jinbo Zhao, Lili Wu, Chuanxing Zhan, Qian Shao, Zhanhu Guo, Liqun Zhang. Overview of polymer nanocomposites: Computer simulation understanding of physical properties // Polymer. – 133, 2017. P.272...287.
14. Muir C., Swaminathan B., Almansour A.S., Sevenser K., Smith C., Presby M., Kiser J.D., Pollock T.M., Daly S. Damage mechanism identification in composites via machine learning and acoustic emission // Computational Materials. – 7:95, 2021. 1...15.
15. Huang J.S., Liew J.X., Ademiloye A.S., Liew K.M. Artificial Intelligence in Materials Modeling and Design // Archives of Computational Methods in Engineering. – 28, 2021. P.3399...3413.
16. Xin Liu, Su Tian, Fei Tao, Wenbin Yu. A review of artificial neural networks in the constitutive modeling of composite materials // Composites Part B. – 2021, 224 109152. 1...15.
17. Bassiouny Saleh, Jinghua Jiang, Reham Fathi, Tareq Al-hababi, Qiong Xu, Lisha Wang, Dan Song, Aibin Ma. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges // Composites Part B. – 2021, 201, 108376.
18. Onggar T., Kruppke I., Cherif C. Techniques and processes for the realization of electrically conducting textile materials from intrinsically conducting polymers and their application potential // Polymers. – 2020, 12, 2867. 1...46.
19. Brzezicki M. A systematic review of the most recent concepts in smart windows technologies with a focus on electrochromics // Sustainability. – 2021, 13, 9604. 1...25.
20. Ramlow H., Andrade K. L., Serafini Immich A.P. Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles // The journal of the textile institute. – 2020, 152...171.
21. Smart Polymer Nanocomposites. Biomedical and Environmental Applications. Elsevier Ltd. – 2021.

22. *Stephen Kirwa Melly, Liwu Liu, Yanju Liu, Jinsong Leng*. Active composites based on shape memory polymers: overview, fabrication methods, applications, and future prospects // *J Mater Sci.* – 55, 2020. 10975...11051.
23. *Self-Healing Composite Materials. From Design to Applications*. Elsevier Inc. – 2020.
24. *Patti A., Cicala G., Acierno D.* Eco-sustainability of the textile: waste recovery and current recycling in the composites world // *Polymers.* – 2021, 13, 134. 1...25.
25. *Pegoretti A.* Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research.* – 4, 2021. P.105...115.
26. *Jie Zheng, Zhuang Mao Png, Shi Hoe Ng, Guo Xiong Tham, Enyi Ye, Shermin S. Goh, Xian Jun Loh, Zibiao Li.* Vitrimers: Current research trends and their emerging applications // *Materials Today.* – 2021. 1...40.
27. *S. Sathees Kumar, B. Sridhar Babu, Ch. Nithin Chankravarthy, N. Prabhakar.* Review on natural fiber polymer composites. *Materials Today: Proceedings.* – 46, 2021. P.777...782.
28. *Tonk R.* Natural fibers for sustainable additive manufacturing: A state of the art review // *Materials Today: Proceedings.* – 37, 2021. P.3087...3090.
29. *Yao Huang, Semen Kormakov, Xiaoxiang He, Xiaolong Gao, Xiuting Zheng, Ying Liu, Jingyao Sun, Daming Wu.* Conductive Polymer Composites from Renewable Resources: An Overview of Preparation, Properties, and Applications // *Polymers.* – 11, 187, 2019. 1...32.
30. *Lucas de Mendonça Neuba, Raí Felipe Pereira Junio, Matheus Pereira Ribeiro, Andressa Teixeira Souza, Eduardo de Sousa Lima, Fábio da Costa Garcia Filho, André Ben-Hur da Silva Figueiredo, Fábio de Oliveira Braga, Afonso Rangel Garcez de Azevedo, Sergio Neves Monteiro.* Promising mechanical, thermal, and ballistic properties of novel epoxy composites reinforced with *Cyperus malaccensis* sedge fiber // *Polymers.* – 12, 2020. 1776.
31. *Milosevic M., Valášek P., Ruggiero A.* Tribology of Natural Fibers Composite Materials: An Overview // *Lubricants.* – 8, 42, 2020. 1...19.
32. *P. Venkateshwar Reddy, R.V. Saikumar Reddy, J.Lakshmana Rao, D. Mohana Krishnudu, P. Rajendra Prasad.* An overview on natural fiber reinforced composites for structural and non-structural applications // *Materials Today: Proceedings.* – 2021, 45. P.6210...6215.
33. *Sternberg J., Sequerth O., Pilla S.* Green chemistry design in polymers derived from lignin: review and perspective // *Progress in Polymer Science.* – 2021, 113, 101344.
34. *Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю.* Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. –СПб.: Профессия, 2020.
35. *Derradji M., Wang J., Liu W.* Phthalonitrile Resins and Composites. Properties and Applications. Elsevier BV. – 2018.
36. *Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М.* Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ.* – 2020, №1 (85). С.68...77.
37. *Долгова Е.В., Лаврова К.С.* Применение материалов на основе циановых эфиров (обзор). Часть 1. Авиационная и космическая техника // *Труды ВИАМ.* – 2021, № 4 (98).С. 48...60.
38. *Михайлин Ю.А.* Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013.
39. *Minchenkov K., Vedernikov A., Safonov A., Akhatov I.* Thermoplastic Pultrusion: A Review // *Polymers.* – 2021, 13, 180.
40. *Ishikawa T.* Ceramic Fibers and Their Applications. Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd. – 2020.
41. *Activated Carbon Fiber and Textiles.* Elsevier Ltd. – 2017.
42. *Sidorina A. I.* Manufacturers of Carbon Fabrics: An Overview // *Fibre Chemistry.* – Vol. 52, № 6, 2021. P.383...393.
43. *Graupner N., Sarasini F., Müssig J.* Ductile viscose fibres and stiff basalt fibres for composite applications – An overview and the potential of hybridization // *Composites Part B.* – 2020, 194, 108041.
44. *Polymer Composites in the Aerospace Industry.* Elsevier Ltd. – 2020.
45. *K. Sharma, G. Srinivas.* Flying smart: Smart materials used in aviation industry // *Materials Today: Proceedings.* – 2020, 27. P. 244...250.
46. *Saravanan M., Bubesh Kumar D.* A review on navy ship parts by advanced composite material // *Materials Today: Proceedings.* – 2021, 45. P.6072...6077.
47. *Ahmad H., Markina A. A., Porotnikov M. V., Ahmad F.* A review of carbon fiber materials in automotive industry // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2020, 971, 032011, 1...10.
48. *Fayomi O.S.I., Okwilagwe O., Agboola O., Oyedepo S.O, Popoola A.P.I.* Assessment of composite materials in advance application: A mini overview // *Materials Today: Proceedings.* – 38, 2021. P.2402...2405.
49. *Клименко О.Н., Валуева М.И., Рыбникова А.Н.* Полимерные и полимерные композиционные материалы в спорте (обзор) // *Труды ВИАМ.* – 2020, №10 (92).С. 81...89.
50. *Egbo. M. K.* A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering // *Journal of King Saud University - Engineering Sciences.* – 2020. 1...18.
51. *Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н.* Перспективы использования полимерных композиционных материалов при изготовлении протезов (обзор) // *Пластические массы.* – 2021, №5-6. С. 40...43.

REFERENCES

1. Donetskiy K.I., Dushin M.I., Mishchun M.I., Sevastyanov D.V. Some features of the use of semipregs for vacuum forming of PCM (review) // Proceedings of VIAM. – 2017, №12 (60). P.81...93.
2. Sorokin A.E., Sagomonova V.A., Petrova A.P., Solovyanchik L.V. Technologies for obtaining polymer composite materials based on a thermoplastic matrix (review) // Proceedings of VIAM. – 2021, № 3 (97). P.78...86.
3. Angelova Y. P. Factors influencing the laser treatment of textile materials: An overview // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 15, 2020. P.1...16.
4. Wang Y., Zhou Y., Lin L., Corker J., Fan M. Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM Composites // Composites Part A. -139, 2020. P. 106...114.
5. Mengru Li, Peng Wang, Francois Boussu and Damien Soulat. A review on the mechanical perfection of three-dimensional warp interlock woven fabrics as reinforcement in composites // Journal of Industrial Textiles. – 2020. P.1...50.
6. Bazli M., Abolfazli M. Mechanical properties of fibre-reinforced polymers under elevated temperatures: an overview // Polymers. – 2020, 12, 2600.
7. Meghashree Padhan, Umesh Marathe, Jayashree Bijwe. Surface topography modification, film transfer and wear mechanism for fibre reinforced polymer composites -An Overview // Surf. Topogr.: Metrol. Prop. – 2020, 8(4), 043002.
8. Antonio Carvalho Filho. Durability of Industrial Composites. Taylor & Francis Group, LLC. – 2019.
9. Residual stresses in composite materials. Woodhead Publishing Limited. – 2021.
10. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhailova N.A., Kosarina E.I. Investigation of samples from polymer composite materials by X-ray computed tomography and tomogram processing with the image of the volume fraction of porosity // Proceedings of VIAM. – 2021, № 5 (99). Pp.105...113.
11. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Slavin A.V. Ultrasonic control of radius zones of PCM structures (review) // Proceedings of VIAM. – 2021, №8 (102). P. 92...103.
12. Bing Wang, Shuncong Zhong, Tung-Lik Lee, Kevin S Fancey and Jiawei Mi. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review // Advances in Mechanical Engineering. – Vol. 12(4), 2020. p. 1...28.
13. Jinbo Zhao, Lili Wu, Chuanxing Zhan, Qian Shao, Zhanhu Guo, Liqun Zhang. Overview of polymer nanocomposites: Computer simulation understanding of physical properties // Polymer. – 133, 2017. p.272...287.
14. Muir C., Swaminathan B., Almansour A.S., Sevenser K., Smith C., Presby M., Kiser J.D., Pollock T.M., Daly S. Damage mechanism identification in composites via machine learning and acoustic emission // Computational Materials. – 7:95, 2021. 1...15.
15. Huang J.S., Liew J.X., Ademiloye A.S., Liew K.M. Artificial Intelligence in Materials Modeling and Design // Archives of Computational Methods in Engineering. – 28, 2021. P.3399...3413.
16. Xin Liu, Su Tian, Fei Tao, Wenbin Yu. A review of artificial neural networks in the constitutive modeling of composite materials // Composites Part B. – 2021, 224 109152. P.1...15.
17. Bassiouny Saleh, Jinghua Jiang, Reham Fa-thi, Tareq Al-hababi, Qiong Xu, Lisha Wang, Dan Song, Aibin Ma. 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges // Composites Part B. – 2021, 201, 108376.
18. Onggar T., Kruppke I., Cherif C. Techniques and processes for the realization of electrically conducting textile materials from intrinsically conducting polymers and their application potential // Polymers. – 2020, 12, 2867. 1...46.
19. Brzezicki M. A systematic review of the most recent concepts in smart windows technologies with a focus on electrochromics // Sustainability. – 2021, 13, 9604. 1...25.
20. Ramlow H., Andrade K. L., Serafini Immich A.P. Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles // The journal of the textile institute. – 2020. 152...171.
21. Smart Polymer Nanocomposites. Biomedical and Environmental Applications. Elsevier Ltd. – 2021.
22. Stephen Kirwa Melly, Liwu Liu, Yanju Liu, Jinsong Leng. Active composites based on shape memory polymers: overview, fabrication methods, applications, and future prospects // J Mater Sci. – 55, 2020. 10975...11051.
23. Self-Healing Composite Materials. From Design to Applications. Elsevier Inc. – 2020.
24. Patti A., Cicala G., Acierno D. Eco-sustainability of the textile: waste recovery and current recycling in the composites world // Polymers. – 2021, 13, 134. 1...25.
25. Pegoretti A. Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 4, 2021. P.105...115.
26. Jie Zheng, Zhuang Mao Png, Shi Hoe Ng, Guo Xiong Tham, Enyi Ye, Shermin S. Goh, Xian Jun Loh, Zibiao Li. Vitrimers: Current research trends and their emerging applications // Materials Today. – 2021. 1...40.
27. S. Sathees Kumar, B. Sridhar Babu, Ch. Nithin Chankravarthy, N. Prabhakar. Review on natural fiber polymer composites. Materials Today: Proceedings. – 46, 2021. P.777...782.
28. Tonk R. Natural fibers for sustainable additive manufacturing: A state of the art review // Materials Today: Proceedings. – 37, 2021. P.3087...3090.
29. Yao Huang, Semen Kormakov, Xiaoxiang He, Xiaolong Gao, Xiuting Zheng, Ying Liu, Jingyao Sun, Daming Wu. Conductive Polymer Composites from Renewable Resources: An Overview of Preparation, Properties, and Applications // Polymers. – 11, 187, 2019. 1...32.
30. Lucas de Mendonça Neuba, Rai Felipe Perei-ra Junio, Matheus Pereira Ribeiro, Andressa Teixeira

- Souza, Eduardo de Sousa Lima, Fábio da Costa Garcia Filho, André Ben-Hur da Silva Figueiredo, Fábio de Oliveira Braga, Afonso Rangel Garcez de Azevedo, Sergio Neves Monteiro. Promising mechanical, thermal, and ballistic properties of novel epoxy composites reinforced with *Cyperus malaccensis* sedge fiber // *Polymers*. – 12, 2020. 1776.
31. Milosevic M., Valášek P., Ruggiero A. Tribology of Natural Fibers Composite Materials: An Overview // *Lubricants*. – 8, 42, 2020. 1...19.
32. P. Venkateshwar Reddy, R.V. Saikumar Reddy, J.Lakshmana Rao, D. Mohana Krishnudu, P. Rajendra Prasad. An overview on natural fiber reinforced composites for structural and non-structural applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2021, 45. P.6210...6215.
33. Sternberg J., Sequerth O., Pilla S. Green chemistry design in polymers derived from lignin: review and perspective // *Progress in Polymer Science*. – 2021, 113, 101344.
34. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them. – St. Petersburg: Profession, 2020.
35. Derradji M., Wang J., Liu W. Phthalonitrile Resins and Composites. Properties and Applications. Elsevier BV. – 2018.
36. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitsky V.V., Aleksashin V.M. Carbon fiber plastics based on benzoxazine oligomers – promising materials // *Proceedings of VIAM*. – 2020, №1 (85). P.68...77.
37. Dolgova E.V., Lavrova K.S. Application of materials based on cyane esters (review). Part 1. Aviation and space technology // *Works of VIAM*. – 2021, № 4 (98). P. 48...60.
38. Mikhailin Yu.A. Fibrous polymer composite materials in engineering. – St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013.
39. Minchenkov K., Vedernikov A., Safonov A., Akhatov I. Thermoplastic Pultrusion: A Review // *Polymers*. – 2021, 13, 180.
40. Ishikawa T. Ceramic Fibers and Their Applications. Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd. – 2020.
41. Activated Carbon Fiber and Textiles. Elsevier Ltd. – 2017.
42. Sidorina A. I. Manufacturers of Carbon Fabrics: An Overview // *Fibre Chemistry*. – Vol. 52, № 6, 2021. P.383...393.
43. Graupner N., Sarasini F., Müssig J. Ductile viscose fibres and stiff basalt fibres for composite applications – An overview and the potential of hybridization // *Composites Part B*. – 2020, 194, 108041.
44. Polymer Composites in the Aerospace Industry. Elsevier Ltd. – 2020.
45. K. Sharma, G. Srinivas. Flying smart: Smart materials used in aviation industry // *Materials Today: Proceedings*. – 2020, 27. P. 244...250.
46. Saravanan M., Bubesh Kumar D. A review on navy ship parts by advanced composite material // *Materials Today: Proceedings*. – 2021, 45. P.6072...6077.
47. Ahmad H., Markina A. A., Porotnikov M. V., Ahmad F. A review of carbon fiber materials in automotive industry // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020, 971, 032011, 1...10.
48. Fayomi O.S.I., Okwilagwe O., Agboola O., Oyedepo S.O, Popoola A.P.I. Assessment of composite materials in advance application: A mini overview // *Materials Today: Proceedings*. – 38, 2021. P.2402...2405.
49. Klimenko O.N., Valueva M.I., Rybnikova A.N. Polymer and polymer composite materials in sports (review) // *Proceedings of VIAM*. – 2020, №10 (92). P.81...89.
50. Egbo. M. K. A fundamental review on composite materials and some of their applications in bio-medical engineering // *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. – 2020. 1...18.
51. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V., Grigorieva L.N. Prospects for the use of poly-dimensional composite materials in the manufacture of prostheses (review) // *Plastic masses*. – 2021, №5-6. С.40...43.

Поступила 27.10.21 27.10.21.

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ВОЛОКНИСТОЙ ОСНОВЕ: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ,
НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**

**FIBER-BASED POLYMER COMPOSITE MATERIALS: DEVELOPMENT TRENDS,
CHARACTERISTICS, SCIENTIFIC DIRECTIONS AND TECHNOLOGIES**

*Е.В. РУМЯНЦЕВ, С.Г. СТЕПАНОВ, М.В. КИСЕЛЕВ,
А.Ю. МАТРОХИН, Ю.М. ТРЕЦАЛИН*

*E.V. RUMYANTSEV, S.G. STEPANOV, M.V. KISELEV,
A.YU. MATROKHIN, YU.M. TRECshalin*

**(Ивановский государственный политехнический университет,
ООО НПО «Программируемые композиты»,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
NPO Programmable Composites LLC,
Lomonosov Moscow State University)**

E-mail: rector@ivgpu.com

Статья посвящена анализу преимуществ полимерных композиционных материалов и обзору развития рынков их применения. Показано, что современной тенденцией развития техники и технологий производства конструкционных материалов является замена металлических изделий на композиционные. Выполнен анализ преимуществ композиционных материалов, изготавливаемых на основе армирующих текстильных тканей, нитей и волокон. На основе анализа рынков производства композиционных материалов сделан вывод об их стабильном росте, особенно для предприятий Китая. Приведены примеры применения композиционных материалов из наиболее наукоемких отраслей промышленности, таких как авиационная, космическая, оборонная. Описаны современные направления развития систем виртуального проектирования композиционных материалов и построения их цифровых двойников. Приведены примеры моделирования отдельных этапов изготовления композиционных материалов с применением текстильных технологий.

The article is devoted both to the analysis of polymer composite materials advantages and to a review of the development of markets for their use. It is shown that the current trend in the development of engineering and technologies for the production of structural materials is the replacement of metal products with composite ones. The advantages of composite materials made on the basis of reinforcing textile fabrics, threads and fibers are analyzed. Based on the analysis of the composite materials production markets, it is concluded that they are growing steadily, especially for Chinese enterprises. Examples of the use of composite materials from the most high-tech industries such as aviation, space, defense are given. Modern trends in the development of systems for the virtual design of composite materials and the construction of their digital counterparts are described. Examples of modeling of individual stages of manufacturing composite materials using textile technologies are given.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, свойства, характеристики, анализ перспектив и направлений развития рынка, инновационные технологии, наука о композитах.

Keywords: polymer composite materials, properties, characteristics, analysis of prospects and directions of market development, innovative technologies, science of composites.

В настоящее время отрасли науки и производства, связанные с разработкой композиционных материалов (КМ), развиваются наиболее динамично, и в ближайшее время номенклатура этих материалов будет стремительно расширяться. Будущее именно за КМ, которые будут только совершенствоваться и все больше «выдавливаться» традиционные конструкционные материалы. Это объясняется тем, что КМ обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от традиционных конструкционных материалов и в совокупности открывающих широкие возможности как для совершенствования существующих конструкций самого разнообразного направления, так и для разработки новых конструкций и технологических процессов. Свойства КМ зависят, в первую очередь, от свойств исходных компонентов: наполнителя и матрицы. Их рациональное сочетание позволяет получать эффективные конструкции с высокой степенью совершенства и заданной анизотропией физико-механических характеристик материала. Кроме того, их соединение дает синергетический эффект, связанный с появлением у композиции свойств, не характерных для изолированных исходных компонентов.

Особое место среди разнообразных видов КМ занимают композиты на волокнистой основе, армирующими наполнителями которых выступают моноволокна, нити, жгуты, сетки, ткани, ленты, холсты, нетканые материалы и др., а в качестве матриц используются полимерные и другие связующие материалы. Такие композиты выгодно отличаются от традиционных конструкционных материалов высокими прочностью, коррозионной стойкостью, сопротивляемостью усталостному и ударному разрушению, малым удельным весом. Поэтому они нашли применение прежде всего

в авиакосмической, оборонной, автомобильной, судостроительной и многих других отраслях. КМ с армирующими наполнителями из высокопрочных текстильных нитей широко используются в современных моделях самолетов. Самолеты фирм "Боинг" и "Аэробус" состоят до 60% из композитов, что резко снижает их вес и, как следствие этого, стоимость перевозки одного пассажира. Как альтернатива ведущим авиационным зарубежным фирмам в РФ создан авиалайнер МС-21, который на 80 % состоит из композитов на основе углеродных тканей.

Оценка перспективности развития любого промышленного производства, инновационного проекта или стратегического направления тесно связана с анализом рынков потребления продукции. Рассмотрим самый многочисленный и бурно развивающийся вид КМ с полимерной матрицей (ПКМ – полимерный композиционный материал).

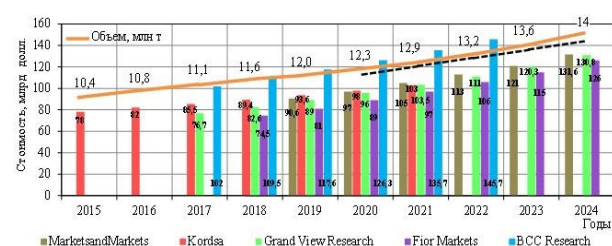


Рис. 1

По мнению большинства консалтинговых компаний, таких как MarketandMarkets, Kordsa, Grand View Research, наблюдается непрерывный рост мирового рынка ПКМ. Его объем, по разным оценкам, составил в 2019 г. от 90,6 до 93,6 млрд. долларов (рис. 1 – оценка мирового рынка полимерных композиционных материалов) и приблизительно 12,0 млн. т в натуральном выраже-

нии. Совокупный среднегодовой темп роста прогнозируется в диапазоне от 4 до 7,7%, что до 2024 г. должно обеспечить объем рынка на уровне 103...131,6 млрд. долл. и 13...14 млн. т в натуральном выражении [1].

Интересным представляется практическая возможность внедрения ПКМ в различные отрасли экономики. На рис. 2 представлены структура и объем потребления ПКМ и изделий из них по секторам экономики в 2020 г. [2]. Мировое потребление ПКМ – приблизительно 130 млн. т.

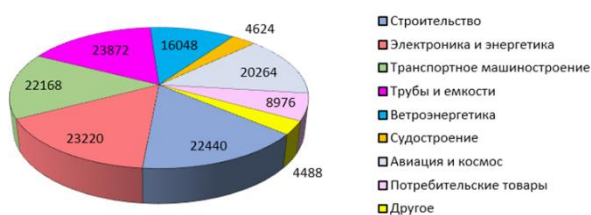


Рис. 2

КМ в зависимости от их функционального назначения могут производиться с армированием различными по составу текстильными нитями и волокнами. Например, для экологически чистых и биоразлагаемых композитов могут использоваться нити из натурального сырья – лен, конопля, хлопок и другие. Однако для технических целей в большинстве случаев применяются химические высокопрочные стеклянные, базальтовые, борные, кремниевые, арамидные и др. нити и волокна. Среди высокопрочных химических нитей особое место занимают углеродные волокна (УВ) и нити. Вследствие высоких механических свойств данных волокон, их низкой удельной объемной плотности и гидрофильности УВ являются перспективными для использования, в том числе с точки зрения замены металлических изделий. Наиболее характерно применение УВ в авиационной и космической отраслях, где альтернативы их свойствам найти практически невозможно.

На рис. 3 приведены данные по проектным мощностям компаний-производителей УВ в мире (сентябрь 2019 г.), тыс. т.

Мощность ведущих мировых производителей УВ составляет около 150,9 тыс. тонн. В краткосрочной перспективе ожида-

ется увеличение производства УВ на 14,6 тыс. т (+ 9,7 %). В среднесрочной и долгосрочной перспективе уже объявлено о дополнительных 44,1 тыс. т в год (+ 29,2 % по сравнению с 2019 г.).

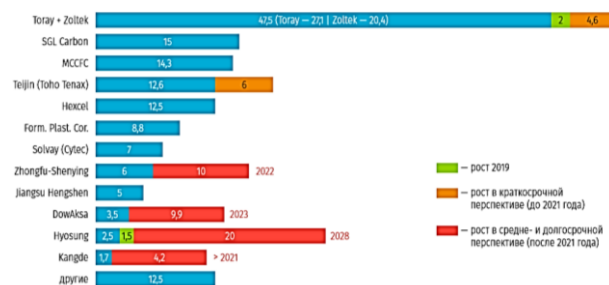


Рис. 3

Рынок потребления УВ по отраслям промышленности приведен на рис. 4.

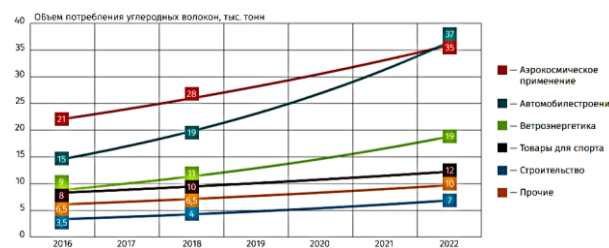


Рис. 4

Предполагается, что к 2022 г. в автомобилестроении будет потребляться не менее 37 тыс. т УВ, что превысит потребление в авиационной промышленности.

В связи с активным применением зеленых технологий ожидается резкий подъем потребления УВ для ветроэнергетики – около 19 тыс. тонн. В последнее время активно развивается применение УВ в медицинской отрасли.

Мировой рынок УВ и композиционных материалов на его основе демонстрирует стабильный рост – 10...12% в год. Положительные прогнозы подтверждаются сильными рыночными и инновационными индикаторами: крупными инвестициями производителей УВ в расширение производства; сотрудничеством производителей УВ с поставщиками технологий УВ по их совершенствованию, развитию уровня технологических ноу-хау производства УВ; применением инновационных материалов в различных отраслях промышленности; раз-

витиём зеленых и энергосберегающих технологий, ростом производства электромобилей, снижением выбросов CO₂ и др.

Особый интерес представляет азиатский регион, в частности Китай, где расширение мощностей производства УВ китайскими компаниями Zhongfu-Shenyang и Kandge Group может существенно увеличить долю Китая на мировом рынке производства УВ.

Таким образом, рынок КМ на основе УВ имеет тенденцию к значительному росту в ближайшей и среднесрочной перспективе, основанному на многочисленных сильных импульсах. Такая тенденция обусловлена не только стабильным ростом потребления УВ в традиционных областях его применения, но и множеством инновационных применений и технологий изготовления новых видов КМ, которые только начинают выходить на рынок.

Рост рынка КМ обусловлен не только инвестициями производителей в расширение производства, но и созданием новых наукоемких оборудования и технологий для производства КМ.

Учитывая современные тенденции мирового технологического развития, наиболее высокими темпами должна развиваться наука, которая является основой для ускорения темпов развития новой техники, в свою очередь создающей научно-технологическую базу для дальнейшего развития производства. Между этими тремя компонентами существуют и обратные связи: каждый из них взаимодействует друг с другом и обуславливает их развитие.

Разработка новых КМ и производство изделий из них тесно связаны с процессом их виртуального проектирования и создания цифрового двойника изделия. Актуальность данной задачи связана с классическими преимуществами применения математического моделирования по сравнению с экспериментальными методами подбора армирующей структуры столь сложного объекта, как КМ. Построение цифровых двойников изделия может стать обязательной частью процесса сертификации продукции или производства. Показательно, что именно в России впервые в мировой

практике утверждён национальный стандарт [3], устанавливающий соответствующее единое определение "цифрового двойника изделия" и сфокусированный на создании изделий с помощью технологии цифровых двойников [4]. В данном направлении практически все ведущие производители программного обеспечения, такие как ANSYS, ESI Group, MSC Software, eXstream Engineering, Siemens и др. разрабатывают ПО, виртуально моделирующие все технологические процессы производства КМ. Одна из таких цепочек виртуального проектирования и изготовления композиционного изделия от фирмы ESI Group представлена на рис. 5.



Рис. 5

Проектирование и создание цифровой модели изделия начинается с построения CAD-модели (модели автоматизированного проектирования) армирующей структуры композита. Для армирования композиционных изделий применяются различные технологии получения структуры армирующего каркаса. Для армирования непрерывными нитями наибольшее распространение получили текстильные технологии намотки, плетения, однослойного ткачества для слоистых композитов и специализированные технологии 3D ткачества для получения композитов с повышенными механическими свойствами (рис. 6 – армирование композита методом намотки (ESI Group); рис. 7 – армирование композита методом плетения (ESI Group); рис. 8 – идеализированная модель структуры 3D-ткани от TechGen).



Рис. 6

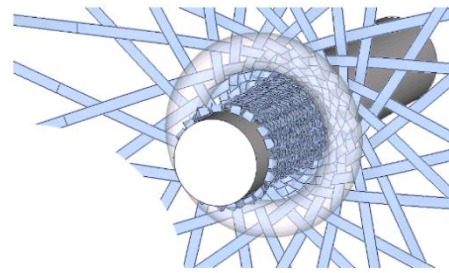


Рис. 7

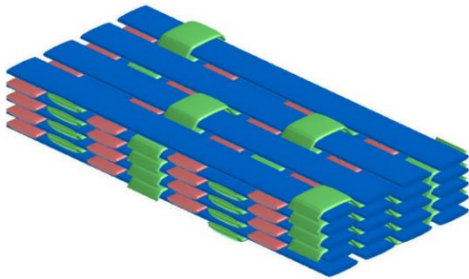
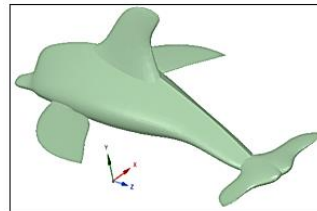
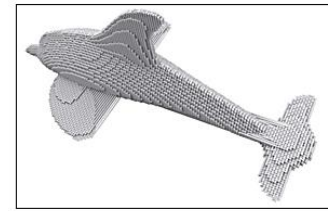


Рис. 8



Заданная деталь сложной пространственной конфигурации



Построенная модель объемной преформы сложной пространственной конфигурации в ПО "Преформа"

Рис. 9

Особое внимание уделяется армированию композитов по 3D-технологии ткачества, поскольку данные композиты имеют высокие механические свойства по всем направлениям осей координат, хорошо выдерживают знакопеременные и ударные нагрузки, не склонны к расслоению. Для создания CAD-моделей 3D-тканей используется специализированное ПО ведущих мировых фирм-производителей WeaveStudio (EAT), ScotCAD Textiles Ltd, ScotWeave Design Software, WiseTex (S.Lomov), ESI GROUP (Франция) и др. Разработанное ПО моделирует структуру 3D-ткани только в объеме параллелепипеда для "представительского объема" материала с одной структурой раппорта ткани. В направлении проектирования геометрической CAD-модели 3D-тканей перспективным представляется ПО "Преформа" [5], [6]. Основными преимуществами данного ПО является возможность построения структуры 3D-ткани в преформе для всего заданного изделия, а не только для "представительского объема" материала, что существенно важно для решения практических задач производства. ПО "Преформа" является единственным программным обеспечением, которое дает одновременно и высокоточную CAD-модель структуры преформы изделия и авто-

матически формирует САМ модуль для его изготовления на станке. На рис. 9 демонстрируется возможность построения преформы с применением технологий 3D-ткачества для заданного изделия со сложной объемной конфигурацией [6].

Одним из стратегических направлений развития Ивановского государственного политехнического университета является развитие теории, методов расчета, проектирования изделий из КМ, разработка инновационных технологий их производства, которые основываются, в том числе и на существующих собственных научных школах и результатах [7...14]. Труды молодых ученых университета в соавторстве с ведущими учеными страны [15...18] также посвящены разработке системно-аналитических подходов к проектированию и прогнозированию характеристик КМ, в том числе: разработке математических моделей для анализа кинетики самопроизвольного впитывания жидкости волокнисто-пористыми средами; обоснованию наиболее информативных параметров для численной оценки взаимосвязи структуры материалов волокнистой матрицы и физических особенностей процесса течения жидкости в поровом пространстве; исследованию адгезионного взаимодействия волокнистой основы с раз-

личными водостойкими клеящими веществами для создания эластичных гидроизоляционных композиционных материалов; прогнозированию физико-механических характеристик композиционных материалов на основе нетканых полотен.

Учитывая последнее, а также динамичное развитие отраслей науки, технологий и производства ПКМ, редакцией журнала "Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности" было принято решение о включении нового раздела "Композиты на волокнистой основе" в структуру журнала. Включение нового раздела в журнал – веление времени. Раздел должен включать оригинальные статьи по целому ряду вопросов по ПКМ: принципы создания, сведения о составе, структуре и свойствах основных видов армирующих волокон и матричных материалов различной природы, технологические процессы их совмещения и физико-механические свойства получаемых композитов, сведения об их эффективном использовании в современных конструкциях, вопросы структурной механики, механики разрушения, статических испытаний, адгезии между наполнителем и матрицей, расчета и проектирования конструкций из ПКМ и др.

Новый раздел органично впишется в структуру журнала, так как в качестве армирующих наполнителей в ПКМ выступают, как уже отмечалось выше, моноволокна, нити, жгуты, сетки, ткани, ленты, холсты, нетканые материалы и др., то есть текстильные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Электронный научный журнал "Труды ВИАМ". – 2020, №6.

2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://viam.ru/news/2108>. (дата обращения 22.05.2021).

3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

4. В России утвержден первый в мире стандарт в области цифровых двойников изделий / Официальный сайт Росстандарта. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8339>. (дата обращения 04.10.2021)

5. Киселев А.М., Хамматова В.В., Голубев С.Е., Киселев М.В. Описание возможностей системы проектирования структуры цельнотканых 3D преформ "Преформа" // Дизайн. Материалы. Технология. – 2019, № 1(53). С.20...25.

6. Киселев А.М. Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения: Дис. ... докт. техн. наук. – Казань, КНИТУ, 2019.

7. Степанов Г.В. Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, – М., 1990.

8. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, №8. С. 103...109.

9. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 1. С. 126...133.

10. Степанов О.С., Братолобова Е.В., Широков А.А. Исследование влияния различных факторов на прочность напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 4. С.105...108.

11. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У. и др. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С.79...83.

12. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У. и др. Расчет параметров строения технической ткани для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С. 113...118.

13. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S. and Baranov A. Numerical model of the mass transfer transition states in the vacuum infusion process of the polymer matrix and the reinforcing filler structure // Key Engineering Materials. New Polymer Composite Materials II. – Vol. 869, 2020. P. 196...201.

14. Ершов С.В., Суворов И.А., Кузнецов В.Б., Никифорова Е.Н., Калинин Е.Н. Синтез 3d-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 114...119.

15. Трещалин Ю.М. Математическое моделирование процесса подъема жидкости в зависимости от пористости волокнистого материала. Ч. 1 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2015, № 9–10 (200–201). С. 27...29.

16. Трещалин Ю.М., Хамматова Э.А. Оценка возможности применения аналитических моделей для описания кинетики впитывания жидкости неткаными материалами // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. Т.18, № 11. С.151...156.

17. Хамматова В.В., Трещалин Ю.М., Трещалин М.Ю., Киселев А.М. Разработка и создание ударопрочных многослойных композиционных материалов с использованием нетканых полотен и плетеных изделий // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. Т. 19, № 23. С. 68...73.

18. Советников Д.А., Мишаков В.Ю., Павлов М.А., Кирсанова Е.А., Трещалин Ю.М. Теоретическое исследование волокнистых материалов с целью расчета и прогнозирования теплофизических свойств // Дизайн и технологии. – 2017, № 57. С. 86...91.

REFERENCES

1. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review) // Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM". – 2020, No.6.

2. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow [Electronic resource] / Access mode: <https://viam.ru/news/2108> . (accessed 22.05.2021).

3. GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital doubles of the editions. General provisions.

4. The world's first standard in the field of digital product doubles has been approved in Russia / Official website of Rosstandart. Access mode: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8339> . (accessed 04.10.2021)

5. Kiselev A.M., Khammatova V.V., Golubev S.E., Kiselev M.V. Description of the capabilities of the system for designing the structure of solid-woven 3D preforms "Preform" // Design. Materials. Technology. – 2019, No. 1(53). P.20...25.

6. Kiselev A.M. Development of methodology for designing geometric structures and forecasting the properties of textile materials of volumetric structure: Dis. ... doct. technical sciences. – Kazan, KNITU, 2019.

7. Stepanov G.V. Creation and technology of production of technical fabrics for the production of composite materials: Dis. ... doct. Technical Sciences. – M.: MIT named after A.N. Kosygin, – M., 1990.

8. Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V. Mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2010, No.8. P. 103...109.

9. Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V. Simplified mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. -2011, No. 1. P. 126...133.

10. Stepanov O.S., Bratolyubova E.V., Shirokov A.A. Investigation of the influence of various factors on the strength of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2012, No. 4. P.105...108.

11. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrhal'ykov Zh.U. et al. Mathematical model of the structure of technical fabrics for the production of thermoplastic composite materials according to the reduced technology // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.. – 2020, No. 4. P.79...83.

12. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrhal'ykov Zh.U. et al. Calculation of the parameters of the structure of a technical fabric for the production of thermoplastic composite materials using abbreviated technology // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, No. 6. pp. 113...118.

13. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S. and Baranov A. Numerical model of the mass transfer transition states in the vacuum infusion process of the polymer matrix and the reinforcing filler structure // Key Engineering Materials. New Polymer Composite Materials II. – Vol. 869, 2020. P. 196...201.

14. Ershov S.V., Suvorov I.A., Kuznetsov V.B., Nikiforova E.N., Kalinin E.N. Synthesis of 3d-model of woven reinforcing structure of textile composite by means of methodology of numerical object-oriented modeling // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 1. P. 114...119.

15. Treshchalin Yu.M. Mathematical modeling of the process of liquid lifting depending on the porosity of fibrous material. Part 1 // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2015, № 9-10 (200□201). P. 27...29.

16. Treshchalin Yu.M., Khammatova E.A. Evaluation of the possibility of using analytical models to describe the kinetics of liquid absorption by non-woven materials // Bulletin of Kazan Technological University. 2015. Vol.18, No. 11. P.151...156.

17. Khammatova V.V., Treshchalin Yu.M., Treshchalin M.Yu., Kiselev A.M. Development and creation of impact-resistant multilayer composite materials using nonwoven fabrics and plaited products // Bulletin of Kazan Technological University. – 2016. Vol. 19, No. 23. P. 68...73.

18. Sovetnikov D.A., Mishakov V.Yu., Pavlov M.A., Kirsanova E.A., Treshchalin Yu.M. Theoretical study of fibrous materials with the purpose of calculation and prediction of thermophysical properties // Design and technologies. – 2017, No. 57. P. 86...91.

Поступила 08.11.21.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

THE USE OF TEXTILE INDUSTRY WASTE IN THE PRODUCTION OF BUILDING COMPOSITES

*V.E. РУМЯНЦЕВА, В.С. КОНОВАЛОВА, Е.В. РУМЯНЦЕВ,
О.И. ОДИНЦОВА, Н.С. КАСЬЯНЕНКО*

*V.E. RUMYANTSEVA, V.S. KONOVALOVA, E.V. RUMYANTSEV,
O.I. ODINTSOVA, N.S. KASIYANENKO*

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный химико-технологический университет)**

**(Ivanovo State Polytechnic University,
Ivanovo State University of Chemistry and Technology)**

E-mail: varrym@gmail.com; kotprotiv@yandex.ru

В статье представлен обзор научных исследований и разработок, посвященных применению переработанных текстильных отходов в области получения композитных материалов для выполнения требований экологической устойчивости текстильного производства и продвижения мер по эффективной переработке отходов. Текстильное производство является одной из наиболее загрязняющей окружающей среду промышленной областью. Твердые текстильные отходы представляют собой серьезную проблему для экологической устойчивости производства текстильных материалов. Различные стратегии разработаны и частично приняты многими компаниями для утилизации текстильных отходов и предотвращения их попадания на свалки. Альтернативой утилизации отходов текстильной промышленности является их использование для изготовления композитов посредством введения в различные матрицы: термопластичный полимер, терморезистивные смолы, натуральные компоненты и бетон. В этой области используются как синтетические, так и натуральные волокна, чтобы улучшить характеристики конечных продуктов с точки зрения функциональных и структурных особенностей. В последнее время внимание исследователей было уделено возможному повторному использованию промышленных текстильных отходов или утилизации использованных тканей для реализации переработанных волокон, которые будут применяться в качестве наполнителей в сочетании с полимерными или бетонными матрицами. Различные типы волокон вводятся в качестве армирующего материала в бетоны для обеспечения механической прочности. Текстильные отходы улучшают главным образом механические, акустические, тепловые и электрические характеристики композитных материалов.

The purpose of the article is to review both the scientific research and development devoted to the use of recycled textile wastes in the production of composite materials to perform the requirements of environmental sustainability of textile production and promote measures for effective waste processing. Textile production is one of the most polluting industrial areas. Solid textile waste is a serious problem for the environmental sustainability of the production of textile materials. Various

strategies have been developed and partially adopted by many companies to dispose of textile wastes and prevent them from entering landfills. An alternative to the disposal of textile industry wastes is their use for the manufacture of composites by introducing into various matrices: thermoplastic polymer, thermosetting resins, natural components, and concrete. In this field, both synthetic and natural fibers are used to improve the characteristics of the final products in terms of functional and structural features. Recently, research attention has been paid to the possible reuse of industrial textile waste or recycling of used fabrics for the sale of recycled fibers that will be used as fillers in combination with polymer or concrete matrices. Various types of fibers are introduced as a reinforcing material into concrete to ensure mechanical strength. Textile wastes improve mainly the mechanical, acoustic, thermal, and electrical characteristics of composite materials.

Ключевые слова: текстильные отходы, строительные композиты, строительные материалы, переработка отходов, вторичное сырье, получение композитов, композитные материалы, текстильный бетон.

Keywords: textile waste, building composites, building materials, waste recycling, secondary raw materials, production of composites, composite materials, textile concrete.

Каждый сегмент текстильной промышленности, от выращивания/производства волокна до доставки и оценки жизненного цикла, является источником разного вида отходов.

Материалы и производственные процессы, используемые в строительстве, оказывают большое влияние на энергоэффективность. В настоящее время использование композитных материалов в строительстве оказало большое влияние на общество; в основном это касается аспектов устойчивого развития и охраны окружающей среды. Многие направления связаны с улучшением и повышением свойств традиционных материалов посредством введения в них различного вида отходов, либо переработанных продуктов [1...6]. Таким образом, использование отходов текстильной промышленности не только снижает энергопотребление при разработке новых продуктов, но и увеличивает их жизненный цикл, при одновременном снижении воздействия на окружающую среду при сжигании и хранении отходов на свалках.

Использование отходов или переработанных материалов с целью создания сырья для строительной отрасли является актуальным вопросом, имеющим многообеща-

ющее будущее и в первую очередь направленным на сохранение окружающей среды. Бетон, дерево и сталь являются наиболее часто используемыми материалами в инфраструктуре домов и зданий, но высокие производственные затраты на них заставляют ученых проводить исследования, направленные на разработку композитных материалов, содержащих переработанные материалы, такие как полиэтилентерефталат (ПЭТ), поликарбонат, переработанные шины, древесина, текстильные волокна и т.д. Использование пластмасс в виде мелких частиц для усиления гидравлического бетона применялось в нескольких исследованиях, но проблема заключается в плохой связи между матрицей и армированием, что приводит к снижению механических свойств бетона, таких как прочность на изгиб и сжатие [7...10].

Некоторые исследования сосредоточены на использовании природных материалов в портландцементном бетоне для повышения прочностных характеристик [11...14]. В специальных натуральных волокнах, таких как джут, лен, кокосовое волокно и хлопок, в качестве армирования в строительных материалах, которые представляют большой интерес благодаря

своим преимуществам по сравнению с синтетическими материалами, и одним из их самых больших преимуществ является низкое воздействие на окружающую среду, низкая стоимость и широкий спектр применения. Целлюлозные волокна, смешанные с бетоном, улучшают тепло- и звукоизоляцию [15], [16]. Разработана технология производства термостойкого, до 280°C, легкого кирпича из хлопчатобумажных отходов (1...5 масс. %), отходов бумажных фабрик (85...89 масс. %) и портландцемента (10 масс. %) [17].

В течение последнего десятилетия в строительной отрасли внедряются инновации с использованием нового материала, известного как текстильный железобетон: сочетание мелкозернистого бетона и многоосно ориентированных текстильных материалов, структурная функциональность, простота производства, применимость и дизайн которых исследованы [18], [19], как способ использования большого количества отходов текстильной промышленности.

Волокна, извлеченные из различных потоков отходов, подходят для армирования бетона. Преимущества использования таких переработанных волокон, как правило, включают более низкую стоимость переработки по сравнению с первичными волокнами и устранение необходимости утилизации отходов на свалках.

Полимербетон изготавливается путем сочетания полимеров и минералов. Наиболее важными параметрами при его разработке являются тип и размер минералов, а также процентное содержание компонентов для получения улучшенных свойств. В целом полимерные композиционные материалы хрупки по своей природе, но демонстрируют увеличение как пластичности, так и прочности при добавлении волокон. Тем не менее, волокна не получили широкого применения в полимербетонах. Кроме того, взаимодействие между волокнами и полимерной матрицей влияет на прочность и вязкость композитных материалов. Когда происходит межфазное разрушение, волокна вытягиваются из полимерной мат-

рицы, и на поверхности трещины возникают силы перекрытия. Силы перекрытия защищают трещину и, следовательно, снижают коэффициент интенсивности напряжений на кончике трещины. Межфазная прочность на сдвиг играет доминирующую роль, поскольку давление, возникающее при вытягивании волокна, определяется главным образом сопротивлением напряжению сдвига между волокнами и полимерной матрицей. В целом текстильные волокна не повышают прочность полимербетона на изгиб и сжатие, но их добавление в смесь устраняет признаки хрупкости [20]. Использование текстильных волокон при изготовлении бетона может решить две проблемы, а именно: устранение загрязнителя окружающей среды и предоставление альтернативного материала для строительной промышленности.

Отходы текстильной резки смешиваются с эпоксидной смолой и литейным песком для получения уникального композитного материала, который может быть использован для легких конструкций. Разработан полимербетон, обработанный полиэфирной смолой, песком и текстильными стекловолокнами (1, 2 и 3 масс. %). Свойствами волокон были вес (160 г/м²), толщина (0,47 мм), сетка (3,5×3,5 мм) и прочность на растяжение (1200 Н/см²). Результаты показывают, что после достижения максимальной нагрузки внезапно полностью уменьшается растрескивание матрицы. На вязкость разрушения влияют два важных фактора: вытягивание волокна и эффект перемычки [21].

Использование отходов хлопка в совокупности с летучей золой и эпоксидной смолой положительно влияет на технические свойства древесностружечных плит. Легкие строительные материалы, изготовленные из отходов хлопка, летучей золы и эпоксидной смолы, могут быть использованы для получения лучших результатов тепло- и звукоизоляции. Кроме того, радиоактивная проницаемость таких ДСП, содержащих барит, очень низка [22].

Сочетании отходов текстильной промышленности до и после производства, ис-

пользуемых в качестве армирующей структуры, и отходов двухориентированных полипропиленовых пленок и отходов полипропиленовых нетканых материалов, используемых в качестве матрицы [23]. Панели из композитных материалов на основе отходов были изготовлены с использованием технологии термоформования. Полученные результаты показывают, что разработка панелей из композиционных материалов для строительных применений, изготовленных из отходов текстильных материалов до и после производства, для замены традиционных древесностружечных плит, ориентированных на древесину, является эффективным решением. Кроме того, механические свойства нового материала значительно выше, чем у традиционных 8-миллиметровых ориентированно-стружечных плит.

Тепло- и звукоизоляционные материалы разработаны из отходов шерсти и переработанных полиэфирных волокон для применения в строительной промышленности [24]. Волокна из отходов шерсти смешивали с полиэфирными волокнами в пропорциях 50/50 в виде двухслойного мата. Такой материал обеспечивает наилучшие изоляционные, акустические, влагопоглощающие и противопожарные свойства. Коврики из полиэфирных волокон и отработанной шерсти поглощали более 70% падающего шума в диапазоне частот 50...5700 Гц, обладают достаточной влагостойкостью в условиях высокой влажности, не влияя на изоляционные и акустические свойства. В течение 50-дневного периода компостирования достигаются 65...70%-ная биodeградации такого материала, значит после выхода из эксплуатации его можно быстро и экологично утилизировать.

Разработаны панели внутренних перегородок, которые могут использоваться как в новых конструкциях, так и в реконструкции зданий, из связующего текстильного волокна с натуральной гидравлической известью. Согласно результатам испытаний панели с отходами текстильного волокна имеют меньшую плотность, чем другие, аналогичные на рынке [25]. Это означает облегчение опорных систем панелей. Проч-

ность на сжатие, прочность на изгиб, скорость ультразвукового импульса, удельный вес и значения водопоглощения таких панелей соответствуют принятым международным стандартам [26]. Аналогичным образом эти панели могут улучшить тепловые характеристики за счет снижения вдвое теплопроводности других коммерческих материалов. В то же время введение текстильных волокон также может улучшить акустические характеристики панелей с точки зрения звукопоглощения.

Армированные волокнами полимеры демонстрируют широкий спектр возможностей для их использования в строительной индустрии, благодаря своим характеристикам таким, как: снижение затрат на техническое обслуживание (отсутствие краски, отсутствие распада, отсутствие насекомых), низкий нагрев, небольшая стоимость и высокая прочность конструкции [27].

Другие исследования были сосредоточены на использовании переработанных обрезков ковра в качестве материала для укрепления грунта [28]. Армирующие волоконистые полосы были размером 5×5 мм и длиной 5...45 мм. Их добавляли в почву в концентрациях от 0,4 до 1,2%. Механические свойства сил сдвига были улучшены. Так, композиты без волокон имеют значение 300 МПа, которое было улучшено на 25% при добавлении 1,2% волокон (375 МПа). Кроме того, была улучшена осевая деформация при пределе текучести, которая составила от 1% для композитов без волокон до 4% для композитов с 1,2% волокон.

Переработанные волокна ковровых отходов использованы для изготовления композитов из легких цементов в соотношении волокон 20 %. Результаты показывают, что при трехточечном испытании на изгиб наблюдалось пластичное поведение и увеличение прочности при изгибе. Тем не менее, плотность уменьшается с увеличением содержания волокна [29].

Для получения искусственных каменных строительных материалов высокой жесткости в качестве армирующей добавки можно использовать измельченные обрезки грунтовой ткани в количестве 1% от массы

общей смеси [30]. Полученные материалы относятся к марке М-250, по осадке конуса они являются малоподвижными и могут использоваться для сооружения монолитных конструкций. Отходы полипеноуретана снижают прочность готовых материалов, и их показатели не соответствуют значениям для искусственных каменных материалов марки М-250 строительного назначения без добавок.

Звукоизоляционные материалы хорошего качества могут быть успешно изготовлены из гранулированной смеси отходов ковровых покрытий [31]. Такие изоляционные материалы обладают следующими преимуществами: экологически приемлемый, простой и эффективный процесс, низкие энергозатраты, хорошие свойства конечного продукта, сопоставимые со свойствами обычного изоляционного материала, огнестойкая отделка, экономические затраты на конверсию [32].

Жидкие отходы кожевенного производства образуются после обработки кожи и меха на овчинно-меховых фабриках. Отходы имеют следующий состав, мг/л: хлорид натрия 1100...1220; сульфат натрия 500...700; соединения хрома (III) 50...70; жиры 90...100; формальдегиды 150...165; взвешенные вещества 350...400. Жидкие отходы кожевенного производства находят применение в качестве комплексных добавок при производстве тяжелых цементных бетонов [33], [34].

Разработана технология получения легких конструкционных материалов из хромсодержащей полировальной пыли твердых отходов, образующихся в кожевенной промышленности [35]. В результате пиролиза хромсодержащей полировальной пыли получен наноструктурированный волокнистый углеродный материал, используемый для изготовления легкого цементного блока. Добавление наночастиц железа увеличивает механическую прочность за счет композиционного соединения в цементном блоке [36]. Предложено использование измельченных отходов кожевенного завода в качестве частичной замены (0,5...20 масс. %) мелкого заполнителя для получения легких бетонов [37]. Прочность на сжатие и

косвенная прочность на растяжение бетона снижались с увеличением содержания отходов кожи. Использование отходов кожи приводит к резкому снижению прочности бетона на сжатие после 28 дней отверждения при использовании в качестве мелких и крупных заполнителей. Однако мелкие кожевенные заполнители снижают прочность на сжатие больше, чем крупные [38].

Окшара – отход текстильной промышленности – известь третьего сорта, смешанная с мелким шерстяным волосом. Свежая окшара содержит до 2,5 % хлора, вредного для организма человека, поэтому ее необходимо выдержать в течение 5...6 месяцев в отвалах или ящиках на открытом воздухе до полного удаления хлора. Окшару используют в качестве замены извести при приготовлении строительных растворов [39].

Подзол – это отходы кожевенной промышленности. Они представляют собой известь третьего сорта, смешанную с мелким шерстистым волосом. Перед применением подзол необходимо процедить через сито с ячейками не более 10 мм. При этом удаляются частицы кожи и прочие загрязнения.

Из подзола и окшары, смешанных с волосом, готовят прочные армирующие растворы, которые почти не трескаются [39].

Пух стригальный и ворс – короткие волокна с посторонними примесями и кострой до 30%, образуются при ворсовании и стрижке тканей. Содержание пыли в волокне находится в пределах 13...14%. Пух стригальный и ворс применяются для производства теплозвукоизоляционных плит [39], [40].

ВЫВОДЫ

1. Отходы текстильного производства могут быть эффективно использованы в строительной сфере.

2. Утилизацию отходов текстильного производства можно производить безопасно, не вызывая загрязнения окружающей среды.

3. Происходит замена составляющих для бетона отходами текстильного производства, что приводит к меньшему исполь-

зованию сырья и снижению стоимости строительства.

4. Бетон из отходов текстильной промышленности обладает меньшей плотностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

5. Использование заполнителя из переработанных отходов текстильного производства в бетоне снижает загрязнение окружающей среды.

6. Использование переработанных заполнителей может не только сохранить конечное сырье, но и снизить потребление энергии и общие затраты на строительство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Румянцева В.Е., Коновалова В.С. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии. – Иваново: ИВГПУ, 2017.
2. Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК. – М.: ФГБНУ "Росинформагротех", 2011.
3. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Интернет-журнал "Отходы и ресурсы". – 2020, № 1. Т. 7. 05ECOR120.
4. Мустафин Н.Ш. Производство строительных материалов с применением промышленных отходов // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. – 2015, № 8 (12).
5. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications // American Journal of Environmental Science. – V. 9, № 1, 2013. P. 14...24.
6. Abukhattala M. Use of Recycled Materials in Road Construction // Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'16). – Ottawa, Canada, 2016. Paper № 138.
7. Березинский А.Р. Пластмассы в гидротехническом строительстве. – М.: Энергия, 1971.
8. Карабаев Н.Т., Нурпеисов С.К., Уызбаев М.М. Композиционные материалы на основе эпоксидных смол и техногенных отходов для гидротехнического строительства // Механика и технологии. – 2018, № 1 (59). С. 116...122.
9. Tiwari Anurag V., Rao Y.R.M. Study on compressive strength of plastic waste bituminous concrete for road construction // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018, № 3. С. 328...337.
10. Raghavate A.M. Use of plastic in a concrete to improve its properties // International journal of advanced engineering research and studies. – V. 1, Is. 3, 2012. P. 109...111.
11. Fernandez J.E. Flax fiber reinforced concrete-a natural fiber biocomposite for sustainable building material // WIT Transactions on The Built Environment. – V. 59, 2002. P.193...207.
12. Bui T.T.H., Boutouil M., Nguyen D.H., Sebaibi N. A Simple Review of Using Coconut Fiber as Reinforcement in Composite // The 8th International Conference of Asian Concrete Federation "Sustainability and innovation in concrete material and structures". – Fuzhou, China, 2008. P. 307...319.
13. Mohammed L., Ansari M.N.M., Pua G., Jawaid M., Islam M.S. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications // International journal of polymer science. – 2015. Article ID 243947.
14. Kers J., Peetsalu P., Saarna M., Viikna A., Krumme A., Menind A. Preliminary investigation into tensile characteristics of long flax fibre reinforced composite material // Agronomy Research. – V.8, 2010. P.107...114.
15. Hassan T., Jamshaid H., Mishra R., Khan M.Q., Petru M., Novak J., Choteborsky R., Hromasova M. Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fibers Waste // Polymers. – V. 12, № 3, 2020. P. 654.
16. Ibragimov A.M., Vakhina T.N., Susoeva I.V. Use of irretrievable waste flax and cotton for production of heat-insulating plates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 451, Is. 1, 2018. P. 012005.
17. Rajput D., Bhagade S.S., Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material // Construction and building materials. – V. 34, 2012. P. 470...475.
18. Williams N., Lundgren K., Wallbaum H., Malaga K., Malaga K. Sustainable potential of textile-reinforced concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. – V. 27, Is. 7, 2015. P. 04014207.
19. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В., Кобелева С.А. Экологическая безопасность использования текстильных отходов в промышленности строительных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С.194...198.
20. Reis J. Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete // Materials Research. – V. 12, № 1, 2009. P. 63...67.
21. Arikan H. Fracture behavior of textile glass fiber reinforced polymer concrete according to mixed-mode // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – V.25, Is. 6, 2011. P. 663...677.
22. Binici H., Gemci R., Kucukonder A., Solak H.H. Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite // Construction and building materials. – V. 30, 2012. P. 826...832.
23. Ailenei E.C., Ionesi S.D., Dulgheriu I., Loghin M.C., Isopescu D.N., Maxineasa S.G., Baciuc I.-R. New Waste-Based Composite Material for Construction Applications // Materials. – V. 14, Is. 20, 2021. P. 6079.

24. Patnaik A., Mvubu M., Muniyasamy S., Botha A., Anandjiwala R.D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies // *Energy and buildings*. – V. 92, 2015. P. 161...169.
25. Aishwariya S. Waste Management Technologies in Textile Industry // *Innovative Energy & Research*. – V. 7, Is. 3, 2018. P. 211.
26. Algin H.M., Turgut P. Cotton and Limestone Powder Wastes as Brick Material // *Construction and building materials*. – Vol. 22, Is. 6, 2008. P.1074...1080.
27. Liang R., Hota G. Fiber-reinforced polymer (FRP) composites in environmental engineering applications // In: Hodzic A, Shanks R, editors. *Handbook of Natural fibre Composites: Materials, Processes and Properties*. – Oxford, United Kingdom: Woodhead Publishing. – 2014. P. 410...468.
28. Ghiassian H., Poorebrahim G., Gray D. Soil reinforcement with recycled carpet wastes // *Waste Management and Research*. – V. 22, Is. 2, 2004. P.108...114.
29. Ucar M., Wang J. Utilization of recycled post-consumer carpet waste fibers as reinforcement in lightweight cementitious composites // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – V. 23, Is. 4, 2011. P.242...248.
30. Зумина Е.Л. Анализ возможности использования отходов легкой промышленности в производстве материалов строительного назначения // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2016, № 2 (31). С. 39...46.
31. Rushforth I., Horoshenkov K.V., MirafTAB M., Swift M.J. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste // *Applied Acoustics*. – V. 66, Is. 6, 2005. P.731...749.
32. Wagner R. Reclamation of carpet waste for building insulation // *Conservation & Recycling*. – V. 2, Is. 2, 1978. P. 131...135.
33. Солонина В.А., Ключов А.А., Бердов Г.И. Свойства тяжелых цементных бетонов с комплексной добавкой на основе жидких отходов кожевенного производства // *Изв. вузов. Строительство*. – 2006, № 11-12. С. 10...13.
34. Khahro S.H., Memon N.A., Ali T.H., Memon Z.A. Improving Material Waste Management Performance: An Attribute Study For Provential Projects // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – V. 7, Is. 6, 2016. P. 498...506.
35. Mushahary J., Mirunalini V. Waste management in leather industry – environmental and health effects and suggestions to use in construction purpose // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – V. 8, № 4, 2017. P. 1394...1401.
36. Sivaprakash K., Maharaja P., Pavithra S., Boopathy R., Sekaran G. Preparation of light weight constructional materials from chrome containing buffing dust solid waste generated in leather industry // *Journal of material cycles and waste management*. – V. 19, Is. 2, 2016. P. 928...938.
37. Sathish Kumar V., Vijayaravind S. Utilization of tannery shredded waste as fine aggregate in concrete // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – V. 4, Is. 4, 2015. P. 484...486.
38. Al-Joulani N.M.A. Effect of Rubber and Leather wastes on concrete properties // *Third International conference on Energy and Environmental protection in Sustainable Development (ICEEP III)*. – Hebron, West bank, State of Palestine: Palestine Polytechnic University. – 2013. ENV163.
39. Дворкин Л.И., Пауков И.А. Строительные материалы из отходов промышленности. – Киев: Вища шк., 1989.
40. Abderrazak H., Sofiene B., Faten F., Abdelmajid J. Sound Insulation Performances of Linters Made of Textile Waste // *Journal of Fashion Technology & Textile Engineering*. – V. 3, Is. 3, 2015.

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Schepochkina Yu.A., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S. Secondary material resources for the construction industry. - Ivanovo: IVGPU, 2017.
2. Golubev I.G., Shvanskaya I.A., Konovalenko L.Yu., Lopatnikov M.V. Waste recycling in the agro-industrial complex. - M.: FGBNU "Rosinformagrotech", 2011.
3. Shilkina S.V. World trends in waste management and analysis of the situation in Russia // *Internet magazine "Waste and Resources"*. - 2020, No. 1 . V. 7. 05ECOR120.
4. Mustafin N.Sh. Production of building materials using industrial waste // *Regional development: electronic scientific and practical journal*. - 2015, No. 8 (12).
5. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications // *American Journal of Environmental Science*. – V. 9, No. 1, 2013. P. 14...24.
6. Abukhattala M. Use of Recycled Materials in Road Construction // *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSSTE'16)*. – Ottawa, Canada, 2016. Paper No. 138.
7. Berezinsky A.R. *Plastics in hydraulic engineering construction*. - M.: Energy, 1971.
8. Karabaev N.T., Nurpeisov S.K., Uyzbaev M.M. Composite materials based on epoxy resins and industrial waste for hydrotechnical construction // *Mechanics and Technologies*. - 2018, No. 1 (59). P. 116...122.
9. Tiwari Anurag V., Rao Y.R.M. Study on compressive strength of plastic waste bituminous concrete for road construction // *Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University*. - 2018, No. 3. P. 328 ... 337.
10. Raghatate A.M. Use of plastic in a concrete to improve its properties // *International journal of advanced engineering research and studies*. – V. 1, Is. 3, 2012. P. 109...111.

11. Fernandez J.E. Flax fiber reinforced concrete-a natural fiber biocomposite for sustainable building material // *WIT Transactions on The Built Environment*. – V. 59, 2002. P.193...207.
12. Bui T.T.H., Boutouil M., Nguyen D.H., Sebaibi N. A Simple Review of Using Coconut Fiber as Reinforcement in Composite // *The 8th International Conference of Asian Concrete Federation "Sustainability and innovation in concrete material and structures"*. – Fuzhou, China, 2008. P. 307...319.
13. Mohammed L., Ansari M.N.M., Pua G., Jawaid M., Islam M.S. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications // *International journal of polymer science*. – 2015. Article ID 243947.
14. Kers J., Peetsalu P., Saarna M., Viikna A., Krumme A., Menind A. Preliminary investigation into tensile characteristics of long flax fibre reinforced composite material // *Agronomy Research*. – V.8, 2010. P.107...114.
15. Hassan T., Jamshaid H., Mishra R., Khan M.Q., Petru M., Novak J., Choteborsky R., Hromasova M. Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fibers Waste // *Polymers*. – V. 12, № 3, 2020. P. 654.
16. Ibragimov A.M., Vakhina T.N., Susoeva I.V. Use of irretrievable waste flax and cotton for production of heat-insulating plates // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – V. 451, Is. 1, 2018. P. 012005.
17. Rajput D., Bhagade S.S., Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material // *Construction and building materials*. – V. 34, 2012. P. 470...475.
18. Williams N., Lundgren K., Wallbaum H., Malaga K., Malaga K. Sustainable potential of textile-reinforced concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – V. 27, Is. 7, 2015. P. 04014207.
19. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V., Kobeleva S.A. Ecological safety of using textile waste in the building materials industry. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2017, No. 1. P. 194 ... 198.
20. Reis J. Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete // *Materials Research*. – V. 12, No. 1, 2009. P. 63...67.
21. Arıkan H. Fracture behavior of textile glass fiber reinforced polymer concrete according to mixed-mode // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – V.25, Is. 6, 2011. P. 663...677.
22. Binici H., Gemci R., Kucukonder A., Solak H.H. Investigating sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite // *Construction and building materials*. – V. 30, 2012. P. 826...832.
23. Ailenei E.C., Ionesi S.D., Dulgheriu I., Loghin M.C., Isopescu D.N., Maxineasa S.G., Baciu I.-R. New Waste-Based Composite Material for Construction Applications // *Materials*. – V. 14, Is. 20, 2021. P. 6079.
24. Patnaik A., Mvubu M., Muniyasamy S., Botha A., Anandjiwala R.D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies // *Energy and buildings*. – V. 92, 2015. P. 161...169.
25. Aishwariya S. Waste Management Technologies in Textile Industry // *Innovative Energy & Research*. – V. 7, Is. 3, 2018. P. 211.
26. Algin H.M., Turgut P. Cotton and Limestone Powder Wastes as Brick Material // *Construction and building materials*. – Vol. 22, Is. 6, 2008. P.1074...1080.
27. Liang R., Hota G. Fiber-reinforced polymer (FRP) composites in environmental engineering applications // In: Hodzic A, Shanks R, editors. *Handbook of Natural fiber Composites: Materials, Processes and Properties*. – Oxford, United Kingdom: Woodhead Publishing. – 2014. P. 410...468.
28. Ghiassian H., Poorebrahim G., Gray D. Soil reinforcement with recycled carpet wastes // *Waste Management and Research*. – V. 22, Is. 2, 2004. P.108...114.
29. Ucar M., Wang J. Utilization of recycled post-consumer carpet waste fibers as reinforcement in lightweight cementitious composites // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – V. 23, Is. 4, 2011. P.242...248.
30. Zimina E.L. Analysis of the possibility of using light industry waste in the production of building materials // *Bulletin of the Vitebsk State Technological University*. - 2016, No. 2 (31). pp. 39...46.
31. Rushforth I., Horoshenkov K.V., MirafTAB M., Swift M.J. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste // *Applied Acoustics*. – V. 66, Is. 6, 2005. P.731...749.
32. Wagner R. Reclamation of carpet waste for building insulation // *Conservation & Recycling*. – V. 2, Is. 2, 1978. P. 131...135.
33. Solonin V.A., Klyusov A.A., Berdov G.I. Properties of heavy cement concretes with a complex additive based on liquid waste from leather production. *Izv. universities. Construction*. - 2006, No. 11-12. S. 10...13.
34. Khahro S.H., Memon N.A., Ali T.H., Memon Z.A. Improving Material Waste Management Performance: An Attribute Study For Provential Projects // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – V. 7, Is. 6, 2016. P. 498...506.
35. Mushahary J., Mirunalini V. Waste management in leather industry – environmental and health effects and suggestions to use in construction purpose // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – V. 8, No. 4, 2017. P. 1394...1401.
36. Sivaprakash K., Maharaja P., Pavithra S., Boopathy R., Sekaran G. Preparation of light weight constructional materials from chrome containing buffing dust solid waste generated in leather industry // *Journal of material cycles and waste management*. – V. 19, Is. 2, 2016. P. 928...938.
37. Sathish Kumar V., Vijayaravind S. Utilization of tannery shredded waste as fine aggregate in concrete

// International Journal of Engineering Research and Technology. – V.4, Is. 4, 2015. P. 484...486.

38 Al-Joulani N.M.A. Effect of Rubber and Leather wastes on concrete properties // Third International conference on Energy and Environmental protection in Sustainable Development (ICEEP III). – Hebron, West bank, State of Palestine: Palestine Polytechnic University. – 2013. ENV163.

39. Dvorkin L.I., Pashkov I.A. Building materials from industrial waste. - Kyiv: Vishcha school, 1989.

40. Abderrazak H., Sofiene B., Faten F., Abdelmajid J. Sound Insulation Performances of Linters Made of Textile Waste // Journal of Fashion Technology & Textile Engineering. – V. 3, Is. 3, 2015.

Поступила 22.11.21.

УДК 332.1

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_30

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЛАСТЕРНОГО ПОДХОДА
В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**PROSPECTS OF USING THE CLUSTER APPROACH
IN THE PRODUCTION OF COMPOSITE TEXTILE MATERIALS**

Р.С. ГОЛОВ, Л.А. КОСТЫГОВА

R.S. GOLOV, L.A. KOSTYGOVA

(Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет))

(Moscow Aviation Institute (National Research University))

Email: roman_golov@rambler.ru; kostmisis@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы производства и потребления композитных материалов на текстильной основе. Дана характеристика различных видов композитных материалов: на основе трикотажных и плетеных полотен, тканых и нетканых полотен. Установлено, что в настоящее время имеется значительный потенциал развития текстильной промышленности в этом направлении. Определено, что для его реализации необходимо обеспечение взаимодействия науки, бизнеса, государства; развитие средних и малых производств, их взаимодействие с местными сообществами; решение проблемы рециркуляции отходов; учет и оценка воздействия на устойчивое развитие отрасли и страны. Организация и управление данными процессами успешно могут быть осуществлены на основе кластерного подхода. В настоящее время в России успешно функционируют 7 композитных кластеров. Анализ их деятельности позволил выявить наиболее перспективные направления, к которым следует отнести реализацию комплексных инновационных и инвестиционных проектов, кооперацию в научной и производственной областях, возможность рециркуляции текстильных отходов и использования чистых технологий, промышленный симбиоз и развитие побочных производств. Для 3-х кластеров (Композитный кластер Санкт-Петербурга, Московский композитный кластер и Межрегиональный промышленный кластер «Композиты без границ») разработаны мероприятия по совершенствованию производства текстильных композитных материалов. Они предполагают использование опыта Северных стран и стран ЕС, применение текстильных отходов в производстве композитов, создание сети средних и малых специализированных предприятий, рост внутреннего

и экспортного рынков, использование господдержки для развития производства и потребления композитов. Данные мероприятия, например, в Санкт-Петербурге предлагается осуществить на основе сотрудничества Санкт-Петербургских кластеров (композитного и чистых технологий для городской среды) в рамках Межрегионального эко-индустриального парка чистых технологий.

The article deals with the production and consumption of textile-based composite materials. The characteristics of various types of composite materials are given: on the basis of knitted and woven fabrics, woven and non-woven fabrics. It is established that at present there is a significant potential for the development of the textile industry in this direction. It is determined that for its implementation it is necessary to ensure the interaction of science, business, the state; the development of medium and small industries, their interaction with local communities; solving the problem of waste recycling; accounting and assessment of the impact on the sustainable development of both the industry and the country. The organization and management of these processes can be successfully carried out on the basis of a cluster approach. Currently, 7 composite clusters are successfully operating in Russia. The analysis of their activities revealed the most promising areas, which include the implementation of complex innovative and investment projects, cooperation in scientific and industrial fields, the possibility of recycling textile waste and the use of clean technologies, industrial symbiosis and the development of by-products. For 3 clusters (the Composite cluster of St. Petersburg, the Moscow composite Cluster and the Interregional Industrial Cluster "Composites without Borders"), measures have been developed to improve the production of textile composite materials. They involve the use of the experience of the Nordic countries and EU countries, the use of textile waste in the production of composites, the creation of medium and small specialized enterprises network, the growth of domestic and export markets, the use of state support for the development of composites production and consumption. These events, for example, in St. Petersburg are proposed to be carried out on the basis of cooperation of St. Petersburg clusters (composite and clean technologies for the urban environment) within the framework of the Interregional Eco-Industrial Park of Clean Technologies.

Ключевые слова: композитные текстильные материалы, композитные кластеры и их роль в развитии производства и потребления композитов.

Keywords: composite textile materials, composite clusters and their role in the development of the production and consumption of composites.

Композиты являются перспективными материалами, используемыми в инновационных технологиях. Обладая высокой пластичностью, прочностью, термостойкостью, малым весом, они успешно заменяют традиционные материалы.

Нити и волокна, широко применяющиеся в текстильной промышленности, являются основой композитов. Взаимодействие химической и текстильной промышленно-

сти обеспечивает создание новых композиционных материалов. В результате в настоящее время имеется разнообразие полимерных композитных материалов: стеклопластиков, углепластиков, органопластиков, полимеров, наполненные порошками, текстолитов. Они применяются в ведущих отраслях промышленности (оборонная, автомобильная, авиакосмическая, энергетическая отрасли, судостроение, приборо-

строение, радиоэлектроника, строительство, дорожное хозяйство и др.), а также в производстве товаров народного потребления успешно применяются технические ткани и нетканые материалы [1...5].

В такого рода материалах текстильная основа представляет армирующий наполнитель, который придает изделию, с одной стороны, прочность, жесткость, а с другой стороны – обеспечивает ориентацию структуры в различных направлениях. Благодаря этому ткани, полотна, изделия на основе таких армирующих волокон и нитей позволяют создать композиты, обладающие уникальными свойствами (рис. 1 – свойства композитных материалов на текстильной основе (источник: составлено авторами на основе [1...5])).



Рис. 1

В настоящее время определено 12 направлений использования композитов на текстильной основе, области их применения постоянно расширяются [1].

Кроме рассмотренных на рис. 1 композитных материалов на текстильной основе следует уделить пристальное внимание такому перспективному направлению, как производство и использование нетканых полотен для выпуска композиционных материалов на текстильной основе. В частности, получение многофункциональных полотен. Модификация материалов может быть осуществлена как простым смешиванием волокон, так и производством слож-

ных слоистых композиционных текстильных структур. Последние имеют большой инновационный потенциал, так как содержат несколько функциональных слоев, соединение которых может осуществляться различными способами, например, двухсторонними клеевыми материалами. Такие продукты имеют широкие области применения, вплоть до ухода за больными [6].

Текстильная промышленность характеризуется значительным потенциалом в этой области. Примером являются возможности использования достижений в хайтек-электронике, которые позволяют применять технологии проводной нити (исследования корпораций Google, Levi's), позволяющей осуществлять управление тканями с помощью Bluetooth, меняя ее форму [7].

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что значительный потенциал технологий производства композиционных материалов в текстильной промышленности обуславливает большое разнообразие этих материалов, что приводит к широким возможностям их использования в различных областях. В связи с этим возникает проблема организации и управления данными процессами.

Следует отметить, что с этой целью создана технологическая платформа, которая позволяет выявлять перспективные научные направления в области создания текстильных материалов и изделий нового поколения, таких как наноструктуры, и выводить их рынок. Однако необходимо решать более широкий круг задач, к которым авторы относят в первую очередь:

- взаимодействие науки, бизнеса, государства, местных сообществ на основе многомерной спирали для ускоренной разработки и внедрения инновационных технологий и материалов в области текстильных композиционных материалов;
- решение проблемы рециркуляции отходов, так как, с одной стороны, производство и использование химических волокон в текстильной промышленности сопровождается образованием значительного количества отходов, а, с другой стороны, технологии производства композиционных мате-

риалов могут быть ориентированы на использование широкого круга текстильных отходов;

- производство полиэфирных, полиамидных, полипропиленовых, акриловых и подобных волокон осуществляется на основе переработки нефтегазового сырья, что перспективно для экономики России, но требует учета и оценки воздействия «углеродного следа» на окружающую среду и его влияния на устойчивое развитие отрасли и страны;

- ускоренное развитие средних и малых производств, позволяющих удовлетворить растущие потребности в текстильных композиционных материалах и организовать рециркуляцию отходов.

Полное решение означенной проблемы возможно на основе использования резервов, которые представляет современная организационная форма производства – кластеры. В промышленности России в настоящее время имеется достаточное количество композитных кластеров (рис.2 – российские композитные кластеры (источник: составлено авторами на основе [9...14]) и инновационный научно-технологический центр «Композитная долина» [8].

Приведенные данные свидетельствуют о создании в стране достаточно мощной

кластерной сети композиционных кластеров. Проблема заключается в том, чтобы использовать потенциал этих структур для решения вышеизложенных проблем.

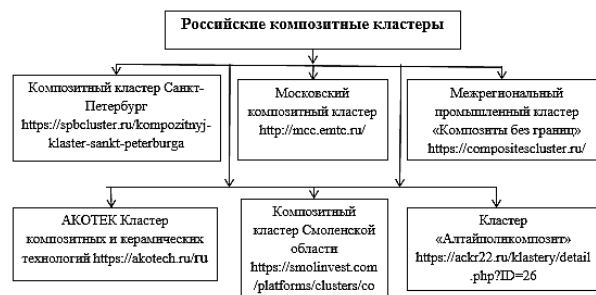


Рис. 2

Анализ деятельности композитных кластеров позволил выявить первоочередные направления их развития в области производства текстильных композитных материалов. При этом основной акцент был сделан на учет имеющегося потенциала кластеров. Особое внимание было уделено реализации комплексных инновационных и инвестиционных проектов, кооперации в научной и производственной областях, возможности рециркуляции и использования чистых технологий для городской среды, промышленному симбиозу и развитию побочных производств.

Т а б л и ц а 1

Наименование композиционного кластера	Направления развития кластера	Рекомендуемые мероприятия
Композитный кластер Санкт-Петербурга	Соглашение «О сотрудничестве в области комплексной модернизации жилищно-коммунального хозяйства и городской среды Санкт-Петербурга между Санкт-Петербургским кластером чистых технологий для городской среды и Композитным кластером Санкт-Петербурга» Формирование в 2022 г. Национальной цифровой платформы промышленного симбиоза, которая отображает побочные производства компаний. Создание к 2025 году эко-индустриальных парков в 50 из 85 регионов	Использование текстильных отходов в производстве композитов. Использование опыта Северных стран и стран ЕС. Участие в первом российском межрегиональном эко-индустриальном парке чистых технологий, реализующем промышленный симбиоз. Организация средних и малых специализированных производств
Московский композитный кластер	Реализация комплексных инновационных и инвестиционных проектов в области выпуска и применения полимерных композитов. Полная технологическая цепочка выпуска композитных материалов, в том числе производство углеродного волокна, тканей и препрегов на основе этих волокон, а также готовых композитных изделий для конечных потребителей	Организация производства строительных материалов, спортивных товаров, игрушек и иных товаров на основе выпуска текстильных композиционных материалов. Рециркуляция текстильных отходов городского хозяйства. Организация средних и малых специализированных производств

Межрегиональный промышленный кластер «Композиты без границ»	«Развитие кооперации между участниками и партнерами в научной и производственной сферах, создание дополнительных возможностей в части продвижения продукции и реализации регионального кадрового потенциала».	Расширение внутреннего рынка и рост экспортного потенциала за счет текстильных композитов. Использование господдержки для развития их производства и потребления
---	---	--

Пр и м е ч а н и е. Источник: составлено авторами на основе анализа [9...11].

В области использования текстильных отходов для производства композитов следует ориентироваться на опыт компаний Lindstrom и Rester Oy в рамках создания Скандинавского промышленного предприятия, осуществляющего рециклинг использованной спецодежды. На предприятии будут производиться волокна, которые применяются в различных областях, в том числе для получения композитных материалов. Актуально, что переработка текстильных отходов организуется в местах их образования, что обеспечивает высокую степень использования отходов [15], [16].

В результате был предложен комплекс мероприятий по расширению производства и использования текстильных композитных материалов (табл. 1).

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что использование кластерного подхода сыграет положительную роль в решении важной проблемы текстильной отрасли [17, с. 54] – обеспечении качества экономического роста текстильных предприятий, а также открывает перед текстильными предприятиями более широкие возможности в области создания сквозных цепочек производства композитных материалов, что несомненно должно повысить уровень устойчивого развития предприятий. [18, с.41].

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы свойства, перспективы развития композитных материалов на текстильной основе и из нетканых полотен.

2. Определено, что развитие технологий производства композиционных материалов в текстильной промышленности имеет большой потенциал и обеспечивает широкие возможности использования текстильных композитов в различных сферах.

3. Установлено наличие проблемы организации и управления данными процессами. Определены направления ее решения:

- взаимодействие науки, бизнеса, государства, местных сообществ с целью ускоренной разработки и внедрения инновационных технологий и материалов в области текстильных композиционных материалов;
- организация рециркуляции отходов производства и использования химических волокон в текстильной промышленности;
- использование текстильных отходов для производства композиционных материалов;
- необходимость учета воздействия «углеродного следа» при производстве ряда текстильных композиционных материалов;
- ускоренное развитие средних и малых производств, позволяющих удовлетворить растущие потребности в текстильных композиционных материалах и организовать рециркуляцию отходов.

4. На основе анализа деятельности композитных кластеров авторами предложен комплекс мероприятий, который ориентируется на основные направления их развития и позволяет расширить объемы производства и области применения текстильных композитных материалов, что положительно скажется на качестве экономического роста и устойчивом развитии текстильных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-практическая конференция «Применение новых текстильных и композиционных материалов в техническом текстиле» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kstu.ru/event.jsp?id=46211> (дата обращения 10.10.2021).
2. *Трецилин Ю.М.* Обоснование применения нетканых полотен для производства композиционных материалов на текстильной основе: Дис. ... канд. техн. наук. – Кострома, 2013.

3. СПБГУПТД: уникальный композиционный материал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inpctlp.ru/news/spbguptd-unikalnyy-kompozitsionnyy-material/> (дата обращения 10.10.2021).

4. Карева Т.Ю. Особенности строения и тенденции развития структур текстильных полотен как основы композиционных материалов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (Smartex) – 2016, №1-2. С. 25...30.

5. Барабанищикова И.С., Смирнова Т.В., Карева Т.Ю. Композиционные материалы на тканой основе // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы – 2019, №1-1. С. 28...30

6. Использование нетканых материалов в многослойных текстильных композитах http://www.polymeru.ru/letter.php?n_id=389&cat_id=3 (дата обращения 10.10.2021).

7. РБК. Современные материалы: новые рынки и возможности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: file:///C:/Users/725/Downloads/rbcplus_1.pdf (дата обращения 10.10.2021).

8. Композитная долина: вст только начинается [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mktula.ru/news/n/kompozitnaya-dolina-vsye-tolko-nachinaetsya/> (дата обращения 10.10.2021).

9. Композитный кластер Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spbcluster.ru/kompozitnyj-klaster-sankt-peterburga> (дата обращения 10.10.2021).

10. Московский композитный кластер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mcc.emtc.ru/> (дата обращения 10.10.2021).

11. Межрегиональный промышленный кластер «Композиты без границ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://compositescluster.ru/> (дата обращения 10.10.2021).

12. АКОТЕК Кластер композитных и керамических технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://akotech.ru/ru> (дата обращения 10.10.2021).

13. Композитный кластер Смоленской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smolinvest.com/platforms/clusters/composite/> (дата обращения 10.10.2021).

14. Кластер «Алтайполикомполит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ackr22.ru/klastery/detail.php?ID=26> (дата обращения 10.10.2021).

15. Lindstrom и Rester начинают сотрудничество по переработке текстильных отходов [Электронный ресурс]. Сайт [lindstromgroup.com](http://lindstromgroup.com/ru/article/rester/) – Режим доступа: <https://lindstromgroup.com/ru/article/rester/> (дата обращения: 12.05.2021).

16. Голов Р. С., Костыгова Л.А. Использование текстильных отходов: анализ состояния и перспективы развития // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, №5.

17. Ползунова Н.Н., Костыгова Л.А. Качество экономического роста предприятий текстильной и швейной промышленности. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, №4. С. 53...56.

18. Голов Р. С., Костыгова Л.А., Прокофьев Д.А. и др. Управление цепочками поставок в машиностроительном комплексе с точки зрения устойчивого развития // СТИН. – 2021, № 10. С. 40...42.

REFERENCES

1. Scientific and practical conference "Application of new textile and composite materials in technical textiles" [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.kstu.ru/event.jsp?id=46211> (accessed 10.10.2021).

2. Treshchalin Yu.M. Substantiation of the use of non-woven fabrics for the production of textile-based composite materials: Dis. ... cand. tech. Sciences. – Krostoma, 2013.

3. SPBGUPTD: a unique composite material [Electronic resource]. – Access mode: <http://inpctlp.ru/news/spbguptd-unikalnyy-kompozitsionnyy-material/> (accessed 10.10.2021).

4. Kareva T.Yu. Features of the structure and trends in the development of structures of textile fabrics as the basis of composite materials // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (Smartex) - 2016, No. 1-2. S. 25...30.

5. Barabanshchikova I.S., Smirnova T.V., Kareva T.Yu. Composite materials on a woven basis // Young scientists - the development of the national technological initiative - 2019, No. 1-1. P. 28...30

6. Use of nonwoven materials in multilayer textile composites http://www.polymeru.ru/letter.php?n_id=389&cat_id=3 (accessed 10.10.2021).

7. RBC. Modern materials: new markets and opportunities [Electronic resource]. – Access mode: file:///C:/Users/725/Downloads/rbcplus_1.pdf (accessed 10.10.2021).

8. Composite Valley: everything is just beginning [Electronic resource]. – Access mode: <https://mktula.ru/news/n/kompozitnaya-dolina-vsye-tolko-nachinaetsya/> (accessed 10.10.2021).

9. Composite cluster St. Petersburg [Electronic resource]. – Access mode: <https://spbcluster.ru/kompozitnyj-klaster-sankt-peterburga> (accessed 10.10.2021).

10. Moscow Composite Cluster [Electronic resource]. – Access mode: <http://mcc.emtc.ru/> (accessed 10.10.2021).

11. Interregional industrial cluster "Composites without borders" [Electronic resource]. – Access mode: <https://compositescluster.ru/> (accessed 10.10.2021).

12. AKOTECH Cluster of composite and ceramic technologies [Electronic resource]. – Access mode: <https://akotech.ru/ru> (accessed 10.10.2021).

13. Composite cluster of the Smolensk region [Electronic resource]. – Access mode: <https://smolinvest.com/platforms/clusters/composite/> (accessed 10.10.2021).

14. Cluster "Altaipolycomposite" [Electronic resource]. – Access mode: <https://ackr22.ru/klastery/detail.php?ID=26> (accessed 10.10.2021).

15. Lindstrom and Rester start cooperation on textile waste recycling [Electronic resource].

16. Golov R. S., Kostygova L.A. The use of textile waste: analysis of the state and development prospects // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 5.

17. Polzunova N.N., Kostygova L.A. The quality of economic growth of textile and clothing industry enterprises. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 4. P. 53...56.

18. Golov R.S., Kostygova L.A., Prokofiev D.A. and other Supply chain management in the machine-building complex from the point of view of sustainable development // STIN. - 2021, No. 10. P.40...42.

Рекомендована кафедрой менеджмента и маркетинга высокотехнологичных отраслей промышленности. Поступила 14.12.21.

УДК 677.46.06:620.16:054

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_37

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ НИТЕЙ
И ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА**

**DEVELOPMENT OF METHODS
FOR ASSESSING TECHNOLOGICAL PROPERTIES
OF HIGH MODULE YARNS AND EXPERIMENTAL STAND PARAMETERS**

С.Н. ТИТОВ, М.В. КИСЕЛЕВ, П.А. ХИЛОВ, В.В. РОМАНОВ

S.N. TITOV, M.V. KISELEV, P.A. KHILOV, V.V. ROMANOV

**(ООО НПО "Программируемые Композиты", Россия
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Россия)**

**(ООО NPO "Programmable Composites" LLC, Russia,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia)**

E-mail: sotings@yandex.ru; kisselev50@mail.ru; khilov_p@mail.ru; wwr52@rambler.ru

Статья посвящена разработке методов оценки технологических свойств высокомодульных нитей, а также определению параметров для разработки экспериментального стенда. Обоснована актуальность поставленной задачи, связанной с отсутствием стандартных методик и сертифицированного оборудования для определения остаточной технологической прочности углеродных волокон после их переработки на оборудовании в готовое изделие. Целями работы является разработка методик и экспериментального стенда для решения задач оптимизации процесса подготовки высокомодульных нитей для дальнейшей переработки и оценки влияния технологических режимов обработки и конструктивных элементов оборудования на них. Предложена система испытаний высокомодульных нитей с закреплением их концов, гарантирующая отсутствие разрушения нити в зажимах установки. Разработаны приспособления для имитации воздействия оснастки ткацкого оборудования с углеродной нитью в ходе технологического процесса. Приведен расчет элементов приспособлений для испытательного стенда. Получены численные значения основных технических требований к экспериментальной установке. Сделаны выводы по работе.

The article under review is devoted to the development of methods for assessing of the technological properties of high-module yarns, as well as the determination of parameters for the development of an experimental stand. The urgency of the task, associated with the lack of standard methods and certified equipment for determining the residual technological strength of carbon fibers after their processing on equipment into a finished product, has been substantiated. The objectives of the

work are to develop methods and an experimental stand for solving problems of optimizing the process of preparing high-module yarns for further processing and assessing the effect of technological processing modes and structural elements of equipment on them. A system of testing high-module yarns with fixing their ends is proposed, which guarantees the absence of destruction of the yarn in the clamps of the installation. Devices have been developed to simulate the impact of the tooling of weaving equipment with carbon thread in the course of the technological process. The calculation of the elements of devices for the test bench is presented. Numerical values of the main technical requirements for the experimental setup are obtained. Conclusions on the work are made.

Ключевые слова: высокомодульные нити, методы испытаний, измерительное оборудование, технология ткачества.

Keywords: high module yarns, test methods, measuring equipment, weaving technology.

Современным направлением развития области использования композиционных материалов является изготовление армирующих текстильных каркасов с геометрией, близкой к конечной детали. Одним из таких методов является технология переработки нитей методом 3D-ткачества, но наряду с преимуществами у данного метода имеются недостатки. Текстильные нити подвергаются более интенсивному механическому воздействию со стороны технологической оснастки оборудования при переработке, что приводит к снижению их механических характеристик в готовом изделии. Особенно существенно в процессе переработки снижаются свойства углеродных волокон и нитей вследствие низкой прочности углеродных филаментов на изгиб. Таким образом, свойства высокомодульных нитей после их переработки в изделие будут существенно отличаться от исходных. Для высокомодульных нитей более корректно было бы использовать термин "остаточной технологической прочности" нитей после переработки на оборудовании. Эта характеристика будет зависеть от режимов ткачества и параметров оснастки оборудования. Операции по предварительной подготовке нитей для текстильной переработки, такие как аппретирование, трощение, кручение и др., также оказывают непосредственное влияние на стойкость нити при ткачестве. Таким образом, разработка методов оценки данной характеристики для

нити позволит подобрать оптимальный состав и параметры подготовительных операций.

Для углеродных нитей вопрос определения остаточной технологической прочности нитей еще более актуален, особенно для технологии 3D-ткачества, в которой операции приобоя нити основы повторяются многократно в одном сечении ткани. Если для обычных синтетических нитей существует ГОСТ 23364–2001 [1], который предусматривает возможность определения разрывной нагрузки и удлинения нити при разрыве, то для углеродных нитей существует ГОСТ 32667–2014 [2], который предназначен для определения свойств элементарной нити при растяжении. Совершенно очевидно, что механические свойства элементарной нити (филаментов) существенно отличаются от свойств углеродного ровинга. Установка для оценки остаточной технологической прочности должна имитировать взаимодействие исследуемой нити с различными устройствами технологической оснастки ткацкого станка, после чего выполняется исследование ее остаточной прочности. На рынке существует значительное разнообразие разрывных машин, однако углеродные волокна требуют особых условий зажима нити в связи с ломкостью филаментов при традиционных способах консольного сжатия образца. Нет стандартных методик и нет сертифицирован-

ного оборудования для определения остаточной технологической прочности углеродных волокон, что и определило актуальность задачи.

В основе экспериментальной измерительной установки заложена разрывная машина для текстильных нитей, рабочая зона которой оснащена дополнительными приспособлениями, позволяющими имитировать основные технологические нагрузки, характерные для процесса ткачества. Из анализа существующих средств измерения механических характеристик нитей следует, что ни одна из серийных разрывных машин не может быть использована в качестве базовой модели из-за того, что высокомодульные нити, будучи хрупкими на изгиб, не могут быть закреплены в стандартных зажимах разрывных машин, а использование пасьмы в качестве объекта испытаний не может быть совмещено с имитаторами технологических воздействий. Применение других стандартных методик, основанных на выделении из нитей отдельных волокон или намачивании нитей перед испытаниями, не позволит оценить технологические свойства нитей из-за несоответствия их формы или состояния существующими при переработке на ткацком станке. Поэтому главной задачей проектирования испытательной установки является определение способа закрепления испытуемого образца и, следовательно, его базовой длины.

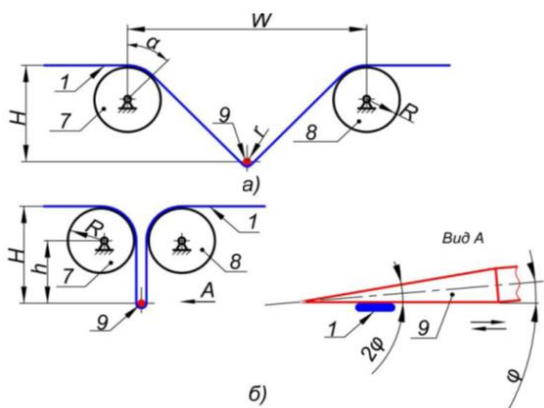


Рис. 1

Разработанная система испытания нити состоит из двух свободно вращающихся ро-

ликов 7 и 8 и наклонно установленного конуса (иглы) 9, радиус которого в месте охвата нитью настраивается за счет осевого перемещения конуса (рис. 1 – схема зоны имитаторов: а) – при определении критических углов охвата и имитации динамических воздействий; б) – при определении критического радиуса изгиба). Изменяя расстояние W между осями роликов, можно менять угол охвата нитью 1 иглы 9, который будет равен 2α .

Чтобы исключить проскальзывание нити вдоль оси конуса, последняя установлена под углом φ к нормали к плоскости размещения нити. Угол φ должен быть меньше минимального угла трения нити по закаленной полированной стали.

Выполним проектные расчеты конуса на прочность и жесткость согласно схемам, представленным на рис. 2 (схемы нагружения конуса: а) коническая игла, б) эпюра изгибающих моментов, в) эпюра моментов сопротивления сечения, г) эпюра напряжений изгиба, д) эпюра угловых прогибов, е) схема иглы с ребром).

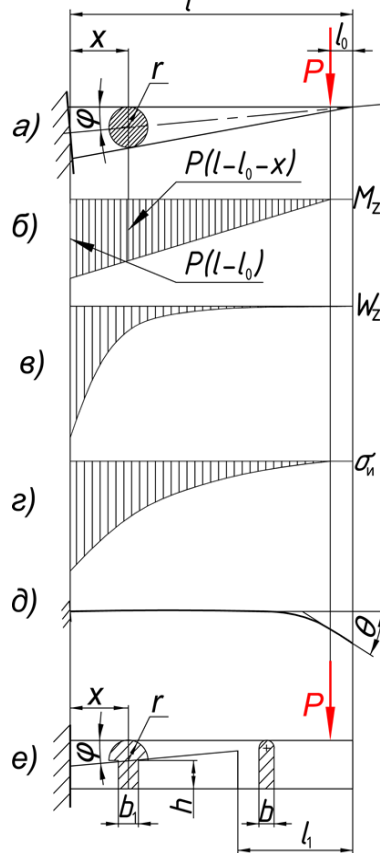


Рис. 2

$$r = r_{\max} - \frac{r_{\max}}{\ell} x = \frac{r_{\max}}{\ell} (\ell - x) = r_{\max} \left(1 - \frac{x}{\ell}\right); \tag{1}$$

$$W_z = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{\pi r_{\max}^3}{4} \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)^3; \tag{2}$$

$$M_z = P(\ell - \ell_0 - x); \quad \sigma_{II} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{P(\ell - \ell_0 - x)}{\frac{\pi r^3}{4}} = \frac{4P(\ell - \ell_0 - x)^3}{\pi r_{\max}^3 \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)^3} \leq [\sigma_{II}]; \tag{3}$$

$$\sigma_{II} = \frac{4P\ell^3(\ell - \ell_0 - x)^3}{\pi r_{\max}^3(\ell - x)^3} = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 - \frac{\ell_0}{\ell - x}\right) = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^3 \leq [\sigma_{II}]; \tag{4}$$

$$\sigma_{II} = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left[1 + 3\frac{\ell_0}{x - \ell} + 3\frac{\ell_0^2}{(x - \ell)^2} + \frac{\ell_0^3}{(x - \ell)^3}\right], \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{II}}{dx} &= \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left[-3\frac{\ell_0}{(x - \ell)^2} - 6\frac{\ell_0^2}{(x - \ell)^3} - 3\frac{\ell_0^3}{(x - \ell)^4}\right] = \\ &= \frac{-12P\ell^3\ell_0}{\pi r_{\max}^3(x - \ell)} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^2 = \\ &= \frac{-12P\ell^3\ell_0(x - \ell + \ell_0)^2}{\pi r_{\max}^3(x - \ell)^4} = 0, \end{aligned} \tag{6}$$

$$x = \ell - \ell_0; \quad \text{при } x = \ell - \ell_0 \quad \sigma_{II} = 0 \tag{7}$$

$$f = 0,1 \div 0,16; \quad \varphi \leq \arctg(f_{\min}); \quad \varphi \leq \arctg(0,1); \quad \varphi \leq 5,71^\circ; \quad \varphi = 5^\circ, \tag{8}$$

$$r_{\max} = \ell \cdot \operatorname{tg}\varphi = \ell \cdot \operatorname{tg}5^\circ = 0,0875 \cdot \ell; \quad \text{при } \ell = 100 \text{ мм} \quad r_{\max} = 8,75 \text{ мм}, \tag{9}$$

$$d_H = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}}; \quad r_H = \sqrt{\frac{T}{1000\pi\rho k}}; \quad S_H = \frac{T}{1000\rho}; \quad P = 2\sigma_b S_H; \quad \ell_0 = \ell \frac{r_H}{r_{\max}}, \tag{10}$$

где T – линейная плотность нити, текс; ρ = 1,8 мг/мм³ – объемная плотность волокна;

k = 0,907 – максимальный коэффициент заполнения нити волокнами (сотовая структура).

$$T = 1040 \text{ текс}; \quad s_H = \frac{1040}{1000 \cdot 1,8} = 0,578 \text{ мм}^2; \quad r_H = 0,45 \text{ мм}; \quad \ell_0 = 5,14 \text{ мм};$$

$$P = 6358 \text{ Н}; \tag{11}$$

$$\sigma_{II} = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^3 = \frac{4 \cdot 6358 \cdot 100^3}{\pi 8,75^3} \left(1 + \frac{5,14}{x - 100}\right)^3 = 12,08 \left(1 + \frac{5,14}{100 - x}\right)^3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{II\max} = 10,311 \text{ МПа} \ll [\sigma_{II}] = 75 \text{ МПа}. \tag{12}$$

В результате получено, что конус, изготовленный даже из стали 10 без термообработки, выдерживает все требования по прочностным показателям.

Однако требованиям по жесткости при x ≈ ℓ – ℓ₀ он не соответствует даже при изготовлении из инструментальной стали.

$$\theta = \int_0^\ell \frac{-P(\ell - x)(-1)}{E\pi \frac{r^4}{4}} dx = \frac{4P}{E\pi} \int_0^\ell \frac{\ell - x}{r^4} dx, \tag{13}$$

где E – модуль упругости материала стержня; r – текущий радиус стержня, вы-

числяемый по формуле:

$$r = r_{\max} - \frac{r_{\max}}{\ell + \ell_0} x = \frac{r_{\max}}{\ell + \ell_0} (\ell + \ell_0 - x). \tag{14}$$

После подстановки (14) в (13) и соответ-

ствующих преобразований имеем:

$$\theta = -\frac{4P(\ell + \ell_0)^4}{E\pi r_{\max}^4} \left[\int_0^\ell \frac{d(\ell + \ell_0 - x)}{(\ell + \ell_0 - x)^3} - \ell_0 \int_0^\ell \frac{d(\ell + \ell_0 - x)}{(\ell + \ell_0 - x)^4} \right]. \tag{15}$$

После интегрирования и приведения к общему знаменателю (15) получает вид:

$$\theta = \frac{2Pl^2(\ell + \ell_0)(\ell + 3\ell_0)}{3\pi\ell_0^2 E r_{\max}^4}. \quad (16)$$

Учтем, что изгибающая нагрузка P приложена в том месте стержня, где диаметр последнего $2r$ равен условному диаметру нити d_H , минимальное значение которого равно $d_H = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}}$, где T – линейная плотность нити, текс, $\rho = 1,8 \text{ мг/мм}^3$ – объемная плотность волокна, $k = 0,907$ – максимальный коэффициент заполнения нити волокнами (отношение площади круга к площади описанного около него правильного шестиугольника). Чтобы обеспечить необходимую жесткость, игла оснащена ребром переменной толщины и формы (рис. 2е). В этом случае при постоянной высоте ребра 28 мм деталь может быть изготовлена из стали У8М с закалкой.

Для решения задачи крепления нити на установке предлагается закреплять образец на поверхности цилиндра путем навивания конца образца на цилиндр со стандартным предварительным натяжением (рис. 3-в). В этом случае образец будет удерживаться на цилиндре за счет силы трения, определяемой формулой Эйлера. Применительно к рис. 1-а формула Эйлера выглядит следующим образом:

$$F = F_0 e^{\alpha f}, \quad (17)$$

где F_0 – предварительное натяжение конца нити, Н; F – натяжение нити, Н; α – угол охвата цилиндра нитью, рад; f – коэффициент трения нити по цилиндру.

При постоянном сечении S нити напряжения в ней определяются путем деления действующей силы на площадь поперечного сечения нити, а их распределение определяется следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha f}, \quad (18)$$

$$\delta_H = r \int_0^\alpha \varepsilon d\alpha = r\varepsilon_0 \int_0^\alpha e^{\alpha f} d\alpha = \frac{r\varepsilon_0}{f} (e^{\alpha f} - 1) = \frac{r}{f} (\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (21)$$

где r – радиус цилиндра, мм.

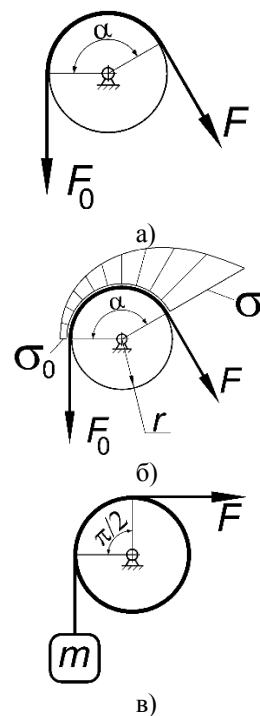


Рис. 3

На рис. 3-б представлена эпюра распределения напряжений по дуге охвата (рис. 3 – схема взаимодействия нити с цилиндром). При постоянном модуле упругости E нити относительная деформация будет пропорциональна напряжению:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\alpha f}, \quad (19)$$

Для проектирования параметров испытательной установки относительная деформация нити ε может быть приравнена к относительному удлинению при разрыве, известному из технических требований к нитям. Тогда минимальное относительное удлинение свободного конца образца ε_0 будет равно:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon e^{-\alpha f}. \quad (20)$$

Приведенная абсолютная деформация нити (в миллиметрах) на дуге охвата определится следующим образом:

Для определения минимально допустимого радиуса цилиндра необходимо знать максимальные диаметры испытуемых нитей. Поэтому необходимо воспользоваться техническими требованиями к нитям, из которых выбираем нити наибольшей линейной плотности, параметры которых сводим в табл. 1 [6...15]. Так как технические требования на различные виды нитей регламентируют свои параметры различным образом, необходимо их унифицировать для заполнения табл. 1, используя следующие зависимости:

$$S = \frac{T}{1000\rho}, \quad (22)$$

$$d = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{S}{k}}, \quad (23)$$

где S – площадь поперечного сечения нити, мм^2 ; T – линейная плотность нити, текс; ρ – объемная плотность материала нити, $\text{г}/\text{см}^3$; d – диаметр нити, мм ; k – коэффициент заполнения поперечника нити волокнами.

С учетом данных, приведенных в табл. 1, имеем.

При $S = 0,58 \text{ мм}^2$ $d = 0,54 \text{ мм}$.

Тогда $r \geq 0,27 \times 100 = 27 \text{ мм}$. Принимаем $r = 30 \text{ мм}$.

Пренебрегая в (21) ε_0 ввиду малости, имеем $\delta_n = (187,5 \div 300)\varepsilon$.

Т а б л и ц а 1

Параметр	Вид нити			
	Углеродная	"Урал"	Арамид	Полиамид
Объемная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	1,80	–	1,45	1,15
Линейная плотность, текс	1040	800	840	800
Диаметр нити, мм	0,54	–	–	–
Площадь сечения нити, мм^2	0,58	–	–	–
Разрывное напряжение, МПа	5500	–	–	–
Относительное разрывное удлинение, %	2,0	0,5	18	18
Разрывная нагрузка, сН/текс	3190	176	1827	75

Кроме того, с учетом данных табл. 1 имеем:

$F \leq 1827 \text{ Н}$ (параамид) $m = 400 \text{ г}$

$F \leq 3190 \text{ Н}$ (углерод) $m = 500 \text{ г}$

$F \leq 176 \text{ Н}$ ("Урал") $m = 400 \text{ г}$

$F \leq 600 \text{ Н}$ (полиамид) $m = 400 \text{ г}$

Тогда: $\Delta\delta_n = 112,5\varepsilon$ и $\delta = \varepsilon\ell$. В результате имеем, что для $\frac{\Delta\delta_n}{\delta} \leq 1,5\%$ требуется базовая длина $\ell \geq 7,5 \text{ м}$.

Учитывая, что $F_0 = mg$ и $\alpha = \frac{1}{f}\ell n \frac{F}{mg}$, получаем:

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{f}\ell n \frac{3190}{5} = \frac{6,46}{f},$$

откуда $\alpha_{\max} = 64,6$ при $f = 0,1$, или $40,4$ при $f = 0,16$.

В результате минимальное количество витков нити на ролике, достаточное для надежного закрепления нити: $n = \frac{=\alpha_{\max} - \pi/2}{2\pi} = 10$.

Выполненные расчеты дают численные значения основных технических требований к экспериментальной установке, как прибору класса 1,5, которые сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметр	Базовая длина	Расстояние между осями роликов	Диаметр роликов	Предельное усилие разрыва	Количество витков канавки на ролике	Количество витков нити на ролике
Значение	7,5 м	7020 мм	60 мм	5 кН	20	12

ВЫВОДЫ

1. Разработаны концептуальные подходы к проектированию экспериментальной установки для определения остаточной технологической прочности высококомодульных нитей.

2. В результате выполненных расчетов определены схема экспериментального стенда, данные для технического задания на его проектирование и параметры его основных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23364–2001. Нити синтетические текстурированные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

2. ГОСТ 32667–2014. Волокно углеродное. Определение свойств при растяжении элементарной нити.

3. Кузина Т.А. Напряженно-деформированное состояние нитей при взаимодействии с механизмами нерегулярного нагружения: Дис. ... канд. техн. наук. – Кострома: КГТУ, 2007.

4. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т. 1 – 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001.

5. Handbook of Analytical Methods for Textile Composites: NASA Contractor Report 478 / Brian N. Cox, Gerry Flanagan – Prepared for Langley Research Center under Contract NAS1-19243, March 1997.

6. Общероссийский классификатор стандартов. Материалы для усиления композитов / <http://www.internet-law.ru/gosts/972/>

7. ГОСТ 8325–2015. Стекловолокно. Нити крученые комплексные. Технические условия.

8. ГОСТ 10727–2015. Нити стеклянные однонаправленные. Технические условия.

9. ГОСТ 17139–2000. Стекловолокно. Ровинги. Технические условия.

10. ГОСТ Р 52581–2006. Ровинг из стеклянных нитей. Технические условия.

11. ГОСТ 28007–88. Нить и жгут СВМ высококомодульные технические. Технические условия.

12. ГОСТ 33842–2016 (EN 13003-1:1999, EN 13003-2:1999, EN 13003-3:1999). Волокно параамидное. Общие технические требования и методы испытаний.

13. ГОСТ 28008–88. Нить углеродная конструкционная. Технические условия.

14. ГОСТ 6943.10–2015. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

15. ГОСТ 6943.5–79. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывного напряжения элементарной нити.

REFERENCES

1. GOST 23364–2001. Synthetic textured threads. The method of determining the breaking load and elongation at break.

2. GOST 32667-2014. Carbon fiber. Determination of properties during the stretching of an elementary thread.

3. Kuzina T. A. The stress-strain state of threads in interaction with mechanisms of irregular loading: Dis. ... candidate of Technical Sciences. - Kostroma: KSTU, 2007.

4. Anuryev V. I. Handbook of a machine-building designer. In 3 vols. Vol. 1 - 8th ed., reprint. and add. Edited by I. N. Zhestkova. - M.: Mechanical Engineering, 2001.

5. Handbook of Analytical Methods for Textile Composites: NASA Contractor Report 478 / Brian N. Cox, Gerry Flanagan - Prepared for Langley Research Center under Contract NAS1-19243, March 1997.

6. All-Russian Classifier of Standards. Materials for reinforcing composites / <http://www.internet-law.ru/gosts/972/>

7. GOST 8325-2015. Fiberglass. The threads are twisted complex. Technical conditions.

8. GOST 10727-2015. The glass threads are unidirectional. Technical conditions.

9. GOST 17139-2000. Fiberglass. Roving. Technical conditions.

10. GOST R 52581-2006. Roving made of glass threads. Technical conditions.

11. GOST 28007-88. The SVM thread and harness are high-modulus technical. Technical conditions.

12. GOST 33842-2016 (EN 13003-1:1999, EN 13003-2:1999, EN 13003-3:1999). The fiber is paraamide. General technical requirements and test methods.

13. GOST 28008-88. The thread is carbon structural. Technical conditions.

14. GOST 6943.10-2015. Glass textile materials. The method of determining the breaking load and elongation at break.

15. GOST 6943.5-79. Glass textile materials. Method for determining the breaking voltage of an elementary thread.

Рекомендована кафедрой научно-техническим советом ООО НПО "ПК". Поступила 20.10.21.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОМПОЗИТАХ

MODELING OF ADHESIVE CUTTING IN ONE-DIRECTIONAL COMPOSITES

П.В. КОРОЛЕВ, А.Ю. МАТРОХИН, М.А. ШИЛОВ, С.В. КОРОЛЕВА
P.V. KOROLEV, A.YU. MATROKHIN, M.A. SHILOV, S.V. KOROLEVA

(Ивановский государственный энергетический университет,
Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановская государственная медицинская академия,
Вятский государственный университет)

(Ivanovo State Power University,
Ivanovo State Politechnical University,
Ivanovo State Medical Academy,
Vyatka State University)

E-mail: vedunking@mail.ru

В работе рассмотрено получение модели влияния адгезивного воздействия на прочность однонаправленного композита. Получена зависимость усилия вырывания одиночной нити из матрицы при заданных геометрических параметрах и известных физико-механических характеристиках компонентов.

The article under review considers the obtaining of adhesive action model effect on the strength of a unidirectional composite. The dependence of the pulling force of a single thread from the matrix is obtained for the given geometric parameters and the known physical and mechanical characteristics of the components.

Ключевые слова: композит, адгезия, модель, модуль адгезии, модуль Юнга, мононить, матрица.

Keywords: composite, adhesion, model, adhesion module, oung's modulus, monofilament, matrix.

Введение

Закономерности адгезии и роль этого явления в обеспечении прочности полимерных композиционных материалов (ПКМ) исследуются на стыке различных областей наук: физической химии и химии высокомолекулярных соединений, физики твердого тела, классической механики, математической статистики и др. Волокнистые ПКМ представляют собой сложные системы, состоящие из армирующих волокон и полимерной матрицы (или связующего компонента).

Прочность таких материалов зависит от целого ряда физико-химических и технологических факторов, часто тесно связанных друг с другом. Ключевую роль в обеспечении прочности волокнистых композитов играет адгезионная прочность соединения "волокно-матрица" в элементарной ячейке композита. В данной работе представлена модель расчета параметров адгезионного взаимодействия однонаправленного композита [1].

Воспользуемся векторной формой записи энергетического баланса данной сис-

темы. Поскольку основной задачей работы ПКМ является отсутствие между его составляющими трения и наличие адгезии, то энергетический баланс такой системы равен:

$$L = A - U - W_A, \quad (1)$$

где A – работа внешней нагрузки P , приложенной к сечению границ элементарной ячейки, Дж; U – потенциальная энергия системы, Дж; W_a – энергия адгезионного взаимодействия структурных элементов ПКМ, Дж, равная сумме энергий адгезии матрицы W_1 и мононити – W_2 :

$$W_a = W_1 + W_2. \quad (2)$$

В свою очередь распишем

$$W_1 = \frac{1}{2} \int_S M_1 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (3)$$

где M_1 – параметр, отвечающий за адгезионные свойства конкретного материала (модуль адгезии матрицы), Дж/м; S – контактная поверхность, м²; w – перемещение, м.

Постановка задачи

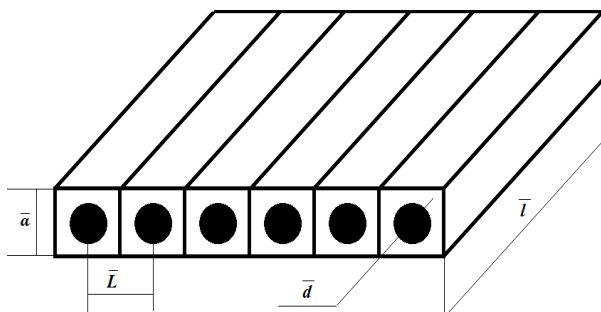


Рис. 1

В качестве объекта моделирования выбрано контактное взаимодействие мононити и матрицы. Модель простого однонаправленного композита [2] представлена на рис. 1 (конструктивная модель однонаправленного композита, где \bar{d} – средний диаметр мононити; \bar{L} – среднее расстояние между центрами осей мононити; \bar{a} – средняя высота элементарной ячейки композита; \bar{l} – средняя длина

элементарной ячейки). Для упрощения расчетов примем, что материал матрицы с параметрами E_1, ν_1, G_1 является изотропным и однородным и материал мононити (E_2, ν_2, G_2) также изотропен и однороден [3]. Для определения объемной доли армирующих элементов в матрице, которая может достигать 90%, необходимо знать только два параметра: средний диаметр мононити и среднее расстояние между их осями.

Задача исследования заключается в обосновании применения и математическом описании нового параметра – модуля адгезии, который позволит проводить экспресс-оценку адгезионных свойств композиционных текстильных материалов в системе "волокно-матрица" в зависимости от геометрических и физико-механических параметров этой системы.

Методы

Согласно простейшей микромоделли слоистого однонаправленного композита [4], учитывающей исключительно объемное содержание мононитей в матрице и не учитывающей их форму и расположение, существует величина, называемая коэффициентом армирования Ψ , равная отношению объема мононитей в матрице. Тогда

$$\Psi = \frac{a_1}{a}, \quad (4)$$

$$1 - \Psi = \frac{a_2}{a}, \quad (5)$$

где a_1 – ширина армирующего слоя, мм; a_2 – ширина матрицы, мм.

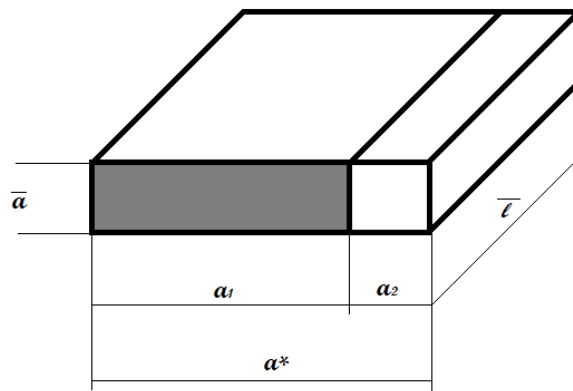


Рис. 2

Существуют три вида базовых испытаний материалов на прочность: растяжение-сжатие, кручение, изгиб. Все остальные являются их комбинациями. При построении модели рассмотрим один из видов испытаний на прочность ПКМ – растяжение. Растягивающую нагрузку P приложим вдоль оси мононитей, тогда энергетическое состояние ячейки композита схематично можно представить на рис. 2 (схематичная модель ячейки однонаправленного композита).

Аналогично (3) запишем уравнение для определения энергии мононити:

$$W_2 = \frac{1}{2} \int_S M_2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx. \quad (6)$$

Потенциальная энергия ПКМ U складывается из упругой энергии растяжения и упругой энергии сдвига:

$$L = A - \frac{1}{2} \iint \left(E^* \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + G^* \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy - \frac{1}{2} \int_S M_1 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_S M_2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx. \quad (9)$$

Для решения энергетического уравнения Лагранжа воспользуемся прямым методом нахождения краевых задач (метод Ритца) с целью выбора варьируемой вариационной функции. Это решение найдем для случая отсутствия адгезии в контакте, то есть:

$$L = A - \frac{1}{2} \iint \left(E^* \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + G^* \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy. \quad (10)$$

$$\varepsilon = P \frac{a}{E_2 a_2 + E_1 a_1} = \frac{P}{\frac{E_2 a_2}{a} + \frac{E_1 a_1}{a}} = \frac{P}{E_2(1-\psi) + E_1 \psi} = \frac{P}{E}, \quad (11)$$

$$E_2(1-\psi) + E_1 \psi = E, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{P}{E}, \quad S^* = \bar{a} a^*, \quad p = \frac{F_{\text{раст}}}{S^*} = \frac{F_{\text{раст}}}{\bar{a} \cdot a^*}, \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{раст}}}{\bar{a} \cdot a^* \cdot E}, \quad (14)$$

$$w(x, y) = x \varepsilon = x \frac{P}{E} = x \frac{F_{\text{раст}}}{\bar{a} \cdot a^* \cdot E}. \quad (15)$$

В отсутствии адгезии разрушаться будет либо матрица, либо мононить. Тогда будут выполняться стандартные условия

$$U = \frac{1}{2} \iint \left(E^* \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + G^* \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy, \quad (7)$$

где E^* – модуль упругости (Юнга) 1-го рода для ПКМ, МПа; G^* – модуль упругости 2-го рода для ПКМ, МПа. В свою очередь:

$$E^* = \begin{cases} E_1, & 0 \leq y \leq a_2, \\ E_2, & a_2 \leq y \leq a, \end{cases} \quad (8)$$

$$G^* = \begin{cases} G_1, & 0 \leq y \leq a_2, \\ G_2, & a_2 \leq y \leq a. \end{cases}$$

В общем виде энергетический баланс такой системы равен разности энергий, затрачиваемой на совершение работы по адгезионному разрушению ПКМ и энергии сопротивления системы, равной сумме энергий (упругой и адгезионной):

Представим функцию перемещения $w = w(x, y)$ и наложим на нее граничные условия такие, что модули Юнга первого и второго рода (E^* и G^*) были кусочно-постоянными. Исходя из этого предположения и учитывая приложенную к ячейке однонаправленного композита растягивающую силу $F_{\text{раст}}$, решение уравнения для одноосного растяжения будет иметь вид:

прочности: для мононити: $[\sigma_1] \geq \frac{P \cdot E_1}{E}$; для матрицы: $[\sigma_2] \geq \frac{P \cdot E_2}{E}$.

Для того чтобы учесть адгезионное взаимодействие монокити и матрицы, нам

$$L = A - \frac{1}{2} \iint \left(E^* \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + G^* \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy - \frac{1}{2} \int_S M_1 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_S M_2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx. \quad (16)$$

Для упрощения вида уравнения преобразуем его, проинтегрировав внутреннюю

$$L = \bar{\ell} \int_{a_2}^a \left(p \varepsilon - \frac{1}{2} E \varepsilon^2 - \frac{G \bar{\ell}^2}{24} (\varepsilon')^2 \right) dy - \frac{(M_1 - M_2) \bar{\ell} \varepsilon^2}{a_2}. \quad (17)$$

Применив принцип Лагранжа [5], заключающийся в равновесии произвольной механической системы, полученной идеальными двухсторонними связями, если

$$\bar{\ell} \int_{a_2}^a \left(p - E \varepsilon + \frac{G \bar{\ell}^2}{24} \varepsilon'' \right) \delta \varepsilon dy - \left((M_1 - M_2) \varepsilon + \frac{G \bar{\ell}^2}{12} \varepsilon' \right) \bar{\ell} \delta \varepsilon \Big|_{a_2} = 0. \quad (18)$$

Условиями равновесия для монокити и матрицы из полученного уравнения являются равенства нулю первого слагаемого:

$$\begin{cases} (p - E_1 \varepsilon_1 + \frac{G_1 \bar{\ell}_1^2}{12} \varepsilon_1'') = 0, \\ (p - E_2 \varepsilon_2 + \frac{G_2 \bar{\ell}_2^2}{12} \varepsilon_2'') = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Вводя замену переменных $\frac{G_2 \bar{\ell}_2^2}{12 E_2} = b_2^2$, $\frac{G_1 \bar{\ell}_1^2}{12 E_1} = b_1^2$ в полученные дифференциальные уравнения второго порядка (19), имеем систему

$$\begin{cases} \frac{p}{E_1} - \varepsilon_1 + b_1^2 \varepsilon_1'' = 0, \\ \frac{p}{E_2} - \varepsilon_2 + b_2^2 \varepsilon_2'' = 0. \end{cases} \quad (20)$$

В силу осевой симметрии ПКМ при решении уравнений нечетные решения убираем из рассмотрения. Поэтому

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = 1 + C^* \frac{\text{ch}(b_1 y)}{\text{ch}(b_1 a_1)}, \\ \varepsilon_2 = 1 + C^{**} \frac{\text{ch}(b_2 y - a)}{\text{ch}(b_2 a_2)}. \end{cases} \quad (21)$$

Тогда искомое перемещение запишем в виде:

необходимо решить полное уравнение энергетического баланса:

функцию по переменной x в пределах от 0 до $\bar{\ell}$. В результате интегрирования получим

сумма работ всех действующих на систему сил на возможных перемещениях системы равняется нулю ($\delta L = 0$), получим:

$$w = w(x, y) = p x \begin{cases} \frac{1}{E_1} \left[1 + C^* \frac{\text{ch}(b_1 y)}{\text{ch}(b_1 a_1)} \right], \\ \frac{1}{E_2} \left[1 + C^{**} \frac{\text{ch}(b_2 y - a)}{\text{ch}(b_2 a_2)} \right] \end{cases} \quad (22)$$

Для нахождения констант интегрирования C^* и C^{**} используем следующие граничные условия:

а) скорости деформаций на границах элементарной ячейки равны нулю:

$$\frac{G_1 \bar{\ell}_1^2}{12} \varepsilon_1'(0) = 0, \quad (23)$$

$$\frac{G_2 \bar{\ell}_2^2}{12} \varepsilon_2'(a) = 0. \quad (24)$$

б) в слое матрицы деформации ε_1 и ε_2 равны $\varepsilon_1(a_2) = \varepsilon_2(a_2) = \varepsilon$.

Условие сдвига:

$$\frac{\bar{\ell}_2^2}{12} (G_2 \varepsilon_2' - G_1 \varepsilon_1') = -(M_2 - M_1). \quad (25)$$

Разность сдвигов матрицы и монокити противоположна по знаку и равна разности адгезионных модулей. Подставив граничные условия (23) в общее решение, получим константы интегрирования:

$$C^* = E_1 \frac{\varepsilon}{p} - 1, \quad (26)$$

$$C^{**} = E_2 \frac{\varepsilon}{p} - 1. \quad (27)$$

Значение относительной деформации будем искать по выражению:

$$\varepsilon = \varepsilon(a_2) = p \frac{a_2 \frac{\text{th}(a_2 b_1)}{a_2 b_1} + a_1 \frac{\text{th}(a_1 b_2)}{a_1 b_2}}{E_2 a_2 \frac{\text{th}(a_2 b_1)}{a_2 b_1} + E_1 a_1 \frac{\text{th}(a_1 b_2)}{a_1 b_2} + (M_1 + M_2)}. \quad (28)$$

Разделив все на числитель, получим приближенное решение:

$$\varepsilon = \varepsilon(a_2) \approx p \frac{1}{E_2(1-\psi) + E_1\psi + \frac{(M_1 + M_2)}{a^*}}. \quad (29)$$

Итоговое уравнение для определения перемещений равно

$$w(x, y) = x \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \frac{\text{ch}(b_1 y)}{\text{ch}(b_1 a_2)} + \frac{p}{E_1} \left(1 - \frac{\text{ch}(b_1 y)}{\text{ch}(b_1 a_2)} \right), \\ \varepsilon \frac{\text{ch}(b_2(y-a))}{\text{ch}(b_2 a_1)} + \frac{p}{E_2} \left(1 - \frac{\text{ch}(b_2(y-a))}{\text{ch}(b_2 a_1)} \right). \end{array} \right. \quad (30)$$

Результаты и обсуждение

Учитывая условия равновесия, определим максимальные напряжения при растя-

жении и сдвиге для модели, учитывающей адгезию (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Нормальные напряжения (растяжение)	Касательные напряжения (сдвиг)
Для мононити $\sigma(y) = \frac{E_1 \cdot w}{x}$	Для мононити $\tau(y) = \frac{G_1 \cdot w}{x}$
Для матрицы $\sigma(y) = \frac{E_2 \cdot w}{x}$	Для матрицы $\tau(y) = \frac{G_1 \cdot w}{x}$
Максимальное значение напряжений	
$\sigma_{1\max} = \frac{E_1 \cdot w(x, y)}{x} \approx \frac{E_1 p}{(E_1 a_1 + E_2 a_2 + M^*)} = \frac{E_1 p}{\gamma}$ $\gamma = E_1 a_1 + E_2 a_2 + M^*$ $\sigma_{2\max} = \frac{E_2 \cdot w(x, y)}{x} \approx \frac{E_2 p}{\gamma}$	$\tau_{2\max} = \frac{G_1 \cdot w(x, y)}{x} \approx \frac{12 p a_2 (E_2 - E_1) a_1 - M^* }{\ell E_1 a_1 + E_2 a_2 + M^* } =$ $= \frac{12 p a_2 \beta }{\ell \gamma}$ $\beta = (E_2 - E_1) a_1 - M^*$ $\tau_{1\max} \approx \frac{12 p a_1 \beta }{\ell \gamma}$

Силу адгезии определим как произведение разности ее модулей на деформацию:

$$F_A = M^* \varepsilon = M^* \frac{a_2 \frac{\text{th}(a_2 b_1)}{a_2 b_1} + a_1 \frac{\text{th}(a_1 b_2)}{a_1 b_2}}{E_2 a_2 \frac{\text{th}(a_2 b_1)}{a_2 b_1} + E_1 a_1 \frac{\text{th}(a_1 b_2)}{a_1 b_2} + M^*}. \quad (31)$$

В пределе (при $\frac{\text{th}(a_2 b_1)}{a_2 b_1} \rightarrow 1$ и $\frac{\text{th}(a_1 b_2)}{a_1 b_2}$

→ 1) сила адгезии примет вид:

$$F_A = M^* \frac{a_2 + a_1}{E_2 a_2 + E_1 a_1 + M^*} = \frac{M^* \cdot a}{\gamma}. \quad (32)$$

Определим условия прочности ПКМ с учетом адгезии и без учета адгезии (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

С учетом адгезии	Без учета адгезии
$\frac{E_1 p}{\gamma} \leq [\sigma_1]$	$E_1 \varepsilon \leq [\sigma_1]$
$\frac{E_2 p}{\gamma} \leq [\sigma_2]$	$E_2 \varepsilon \leq [\sigma_2]$
$\frac{12 p a_1 \beta }{\ell \gamma} \leq [\tau_1]$	$0 \leq [\tau_1]$

$\frac{12pa_2 \beta }{\ell\gamma} \leq [\tau_2]$	$0 \leq [\tau_2]$
$\frac{M^*}{\gamma h} \leq [\sigma_{12}]$	$0 \leq [\sigma_{12}]$
$h = \bar{a}$	

Определим выражение искомого модуля адгезии. Для этого проведем теоретический эксперимент. При одноосном растяжении результирующая сила F^* складывается из трех компонентов:

$$F_1 + F_2 + F_A = F^*, \quad (33)$$

где F_1 , F_2 , F_A – сила растяжения нити, сила растяжения матрицы и адгезионная сила соответственно.

С учетом подстановки $F^* = p \cdot a$ и выражений (4), (5), (12), (13), (14), (31) получим:

$$E_1 \varepsilon a \psi + E_2 \varepsilon a (1 - \psi) + M^* \varepsilon = pa. \quad (34)$$

Тогда модуль адгезии запишем в виде:

$$M^* = \frac{pa}{\varepsilon} - a(E_1 \psi + E_2(1 - \psi)). \quad (35)$$

ВЫВОДЫ

Таким образом, явление адгезии сведено в один параметр – модуль адгезии, зависимый от геометрических и физико-механических параметров системы, что позволит проводить экспресс-оценку адгезионных свойств материалов в сравнении с различными комбинациями параметров системы, будь то изменение толщины или формы нити, или изменение материалов наполнителя. Зная среднестатистические параметры напряжения, деформации, объемную долю мононитей в матрице и экспериментально определенные модули упругости первого рода для мононити и матрицы, можно определить параметр адгезии для контактной пары ПКМ. Конкретные свойства адгезионной пары зависят от процесса ее изготовления, поэтому даже в рамках нескольких образцов может существовать разница.

Дальнейшее развитие работы заключается в верификации результатов модели с практическим экспериментом, т.е. в определении силы вырывания одиночного волокна из изотропной однородной матрицы. Данное исследование позволит установить влияние допущения при идеальном взаимодействии волокно-наполнитель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нильсен Л., Бабаевский П.Г. Механические свойства полимеров и полимерные композиции. – М.: Химия, 1978.
2. Барабанщикова И.С., Смирнова Т.В., Карева Т.Ю. Композиционные материалы на текстильной основе // Междунар. научн.-практич. конф.: Текстильная химия: традиции и новации-2019 (Мельниковские чтения). – Иваново: ИГХТУ, 2019.
3. Карева Т.Ю. Особенности строения и тенденции развития структур текстильных полотен как основы композиционных материалов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – Иваново: ИВГПУ, 2016, № 1 (2). С. 25...30.
4. Scardino F. An introduction to textile structures and their behaviour Chou T.W., Ko F.K. (Eds.), Textile structural composites, chapter 1, composite materials series, vol. 3, Elsevier Science Publishers, Oxford (1989). P. 1...26.
5. Ko F. Textiles Composites for Automotive Structural Components, in Textile Advances in the Automotive Industry, ed. by R. Shishoo (Woodhead Publishing, Cambridge, 2008).

REFERENCES

1. Nielsen L., Babaevsky P.G. Mechanical properties of polymers and polymer compositions. – M.: Chemistry, 1978.
2. Barabanshchikova I.S., Smirnova T.V., Kareva T.Yu. Composite materials on a textile basis // Intern. scientific-practical Conf.: Tech-Style Chemistry: Traditions and Innovations-2019 (Melnikov Readings). – Ivanovo: IGHTU, 2019.
3. Kareva T.Yu. Features of the structure and trends in the development of structures of textile fabrics as the basis of composite materials // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (SMARTEX). – Ivanovo: IVGPU, 2016, No. 1 (2). S. 25...30.
4. Scardino F. An introduction to textile structures and their behavior Chou T.W., Ko F.K. (Eds.), Textile structural composites, chapter 1, composite materials series, vol. 3, Elsevier Science Publishers, Oxford (1989). P. 1...26.

УДК 664.4.059.3
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_50

**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
РЕЗИНОБИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО БИТУМА
И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ТОО "ЭКО-ШИНА"**

**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE OPERATIONAL PROPERTIES
OF RUBBER BITUMEN BINDERS BASED ON
DOMESTIC PETROLEUM BITUMEN
AND SECONDARY RAW MATERIALS OF ЕКО-SHINA LLP**

^{1,2} К.К. СЫРМАНОВА, ¹Ж.Б. КАЛДЫБЕКОВА, ¹Ш.Б. БАЙЖАНОВА,
¹А.Ж. СУЙГЕНБАЕВА, ¹Е.Т. БОТАШЕВ, ³А.Б. АГАБЕКОВА

K.K. SYRMANOVA, ZH.B. KALDYBEKOVA, SH.B. BAYZHANOVA,
A.ZH. SUIGENBAYEVA, E.T. BOTASHEV, A.B. AGABEKOVA

(Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, Республика Казахстан,
Университет "Мирас", Республика Казахстан,
Международный казахско-турецкий университет имени Х.А.Ясави, Республика Казахстан)

(M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan,
Miras University, Republic of Kazakhstan,
International Kazakh-Turkish University named after KH.A. Yasavi, Republic of Kazakhstan)

E-mail: Symanova.kulash@mail.ru

В статье приведены экспериментальные данные изменения основных эксплуатационных характеристик резинобитумных вяжущих – глубина проникновения иглы, при 0°C и 25°C, температура размягчения по кольцу и шару, растяжимость и эластичность, приготовленных в зависимости от времени смешения в температурном диапазоне 150...220°C в смесителе. Правильное определение температурного режима приготовления РБВ позволяют сэкономить рабочее время и энергоресурсы, увеличить производительность установки и наилучшим способом реализовать потенциал модифицированной резиновой крошки, как высокоэффективного модификатора битума. Анализ современных представлений о структуре нефтяных битумов и полимерно-битумных вяжущих показал, что перспективным направлением модификации битумов является использование добавок резиновой крошки. В связи с этим поиск эффективной технологии для получения резинобитумных вяжущих на основе местных материалов и техногенных отходов из отработанных шин является актуальной проблемой.

The article under review presents experimental data on changes in the main operational characteristics of rubber-bitumen binders - the depth of penetration of the needle, at 0°C and 25°C, the softening temperature along the ring and ball,

extensibility and elasticity, prepared depending on the mixing time in the temperature range 150-220°C in the mixer. Correct determination of the temperature regime for the preparation of RBV allows you to save working time and energy resources, increase the productivity of the installation and in the best way realize the potential of modified rubber crumb as a highly effective modifier of bitumen. Analysis of modern concepts of petroleum bitumen structure and polymer-bitumen binders showed that a promising direction for modifying bitumen is the use of crumb rubber additives. In this regard, the search for an effective technology for producing rubber-bitumen binders based on local materials and man-made waste from used tires is an urgent problem.

Ключевые слова: нефтяной битум, резиновая крошка, техногенные отходы, резинобитумные вяжущие, модификатор, структура, растяжимость, эластичность.

Keywords: petroleum bitumen, rubber crumb, industrial waste, rubber-bitumen binders, modifier, structure, extensibility, elasticity.

Введение. Известно, что наиболее универсальным материалом для применения в качестве вяжущего при устройстве дорожных покрытий является нефтяной битум, благодаря способности выдерживать без разрушения воздействие низких температур, температурных перепадов, различных деформационных нагрузок. Для повышения прочности и долговечности изоляционных, гидроизоляционных, герметизирующих и других строительных материалов, изготавливаемых на основе битумов, в последнее время к битуму стали добавлять различные минеральные и органические вещества. Так, с введением в битум небольшого количества резины резко увеличивается его эластичность при значительном относительном удлинении, повышаются водостойкость, температура размягчения и прочность. Резина оказывает и стабилизирующее действие, повышает пластические свойства битума, вследствие чего при деформациях материал не испытывает больших напряжений и увеличивается его срок службы. Резину для этой цели регенерируют из старых обестканенных автопокрышек, содержащих около 50% каучукового вещества, или используют отходы заводов резиновых изделий. Вводя в битум соответствующие добавки, получают различные гидроизоляционные и другие битуми-

нозные строительные материалы (бризол, изол, гидроизол, различные мастики и др.)

В настоящее время в Казахстане работают 4 завода по производству дорожного битума, суммарной мощностью 1,2 млн. тонн в год [1]. Отечественное производство полностью обеспечивает потребность дорожной отрасли. В 2016 г. запущено основное производство битума на предприятии Каспийбитум. Анализ основных показателей Министерства энергетики РК за 2016-2019 гг. показал, что объем производства битума с 2015 г. вырос в 2 раза (рис. 1 – развитие битумной отрасли Республики Казахстан за 2015-2020 гг.).

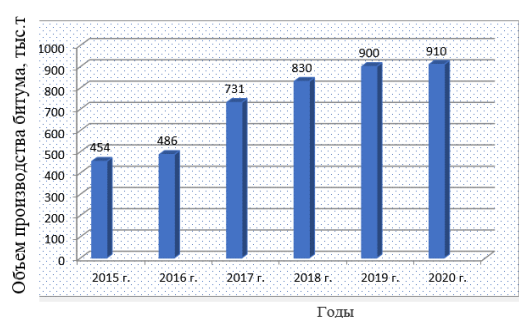


Рис. 1

В последнее время все большее распространение получают технологии модификации нефтяных битумов различными полимерами, в том числе и резиновой крошкой. И если большинство полимеров, применяе-

мых для модификации битумов, представляют собой продукцию химической промышленности, что не может не отражаться на повышении стоимости вяжущих, то резиновая крошка представляет собой продукт механической переработки резинотехнических многотоннажных отходов, имеющих стоимость, сопоставимую со стоимостью нефтяного битума. Согласно ориентировочным данным в Европе ежегодно образуется около 2 млн. т, а в США – 2,8 млн. т изношенных шин [2].

Данная проблема имеет важное экологическое значение. В настоящее время изношенные шины практически полностью уничтожаются путем сжигания или захоронения в оврагах, свалках, что сильно загрязняет окружающую среду. Например, в Швейцарии отходы автопокрышек сжигаются почти полностью, а в США – 75...80% [3]. В России 96 % отработанных автопокрышек просто вывозятся на свалки. Изношенная шина разлагается в земле 150 лет. Воздействие на шины солнечного света, воды и минеральных веществ приводит к тому, что они выделяют токсические вещества, которые загрязняют грунтовые воды и атмосферу.

Кроме того, места скопления отработанных шин служат благоприятной средой обитания и размножения грызунов и насекомых, которые часто являются разносчиками различных заболеваний. Необходимо также учитывать тот факт, что шины обладают высокой пожароопасностью. Кроме очевидного вреда от разлагающейся резины и проникновения в воздух, воду и землю, в одной тонне старых покрышек содержится около 650 кг резины и до 340 кг

корда, которые можно использовать снова, тем самым экономя природные ресурсы. Ежегодный объем образования изношенных шин в РК: 100000 т. Объем переработки изношенных шин (в 2016 г.), % 13...15%. Годовая суммарная производственная мощность реально действующих предприятий РК по переработке изношенных шин (приблизительно) 60000 т. По предприятию "ЭКО Шина" переработка изношенных шин составляет 4000 т в год, а выпуск резиновой крошки – 3200 т в год [1].

Методы исследований В работе был использован битум Шымкентского битумного завода ТОО "Газпромнефть-Битум Казахстан". Производительность завода 500 т битума в сутки. Резиновая крошка – это вторичное сырье ТОО "ЭКО Шина" [1]. Фотография резиновой крошки представлена на рис. 2. Физико-механические характеристики резиновой крошки ТОО "Эко-Шина" приведены в табл. 1.



Рис. 2

Таблица 1

№ п/п	Показатели	Значение
1	Чистота резиновой крошки	99,8%
2	Включения металла	менее 0,1%
3	Включения текстильного волокна	в пределах 0,2%
4	Чистота сепарации по фракциям	высокая
5	Цвет	черный
6	Эффект термоокисления	отсутствует
7	Плотность	0,35...0,45
8	Вулканизация, °С	155
9	Условная прочность растяжения, МПа	14,7
10	Относительное удлинение, %	500...750
11	Соппротивление раздиру, кН/м	59...88

Процесс получения полимерно-битумных вяжущих, модифицированных резиновой крошкой, составление рецептуры полимерно-битумного вяжущего с использованием отходов ТОО "ЭКО Шина", изучение физико-механических характеристик полимерно-битумных вяжущих на основе отечественных битумов и промышленных отходов местных производств: методы определения растяжимости на дуктилометре ДБ-150, глубины проникания иглы на пенетрометре ПНБ-02М, температуры размягчения по КиШ, эластичности проводили по известным методикам [5], [6].

Результаты и обсуждения. Сравнительные исследования эффективности разных способов модификации битумов показали, что перспективным направлением модификации битумов является использование добавок резиновой крошки. Показано, что, если резиновая крошка частично не растворяется в битуме и не дает существенного технического эффекта, то при термокаталитической девулканизации резины по серным "мостикам" (метод проф. Б. Розенберга), хорошо растворимы в битуме (до 20%) и придают им высокие эксплуатационно-технические свойства (теплостойкость, морозостойкость, водостойкость). Действительно, конечные свойства РБВ зависят от многих факторов, основными из которых являются количественное соотношение и качество исходных компонентов, последовательность их смешивания, аппаратное оформление, а также температурно-временной режим процесса. Благодаря многочисленным исследованиям [7] известно, что оптимальная температура (в зависимости от свойств исходных компонентов) для приготовления полимерно-битумных вяжущих при модификации полимерами находится в интервале 160...200°C. Температурный режим влияет на продолжительность общего процесса, а также на конечные свойства получаемого продукта, поэтому подбор оптимальной температуры смешивания компонентов является одной из приоритетных задач при формировании технологического регламента установки.

При высокой температуре процесс диспергирования резиновой крошки протекает

с большой скоростью, и производительность установки модифицирования, таким образом, повышается. Но при этом могут иметь место нежелательные процессы, связанные с окислением битума и термодеструкцией полимерных молекул [8]. Также верхний предел температуры ограничивают в соответствии с нормами пожарной безопасности. Нижний предел температуры диспергирования полимера для введения в битум устанавливают, исходя главным образом из продолжительности процесса. Длительное смешивание приводит к нерациональным тратам времени, энергетических ресурсов и в итоге к низкой рентабельности производства. На основе экспериментальных данных проводили определение оптимальной температуры введения модифицированной резиновой крошки в битум на основе анализа кривой зависимости времени смешивания от температуры в смесителе. Известно, что при увеличении температуры смешивания компонентов время, затрачиваемое на диспергирование резиновой крошки, уменьшается неравномерно, а зависимость имеет вид кривой, по которой можно установить наиболее приемлемые условия технологического процесса. Для построения этой зависимости потребовалось приготовить серию образцов РБВ при различной температуре и определить продолжительность процесса в каждом случае. Изменение характеристик получаемых образцов позволяет оценить влияние выбранной температуры и продолжительности смешивания на качество конечного продукта. Для этого для каждого приготовленного образца РБВ были определены температура размягчения, растяжимость 25°C и эластичность. Для испытаний была использована композиция: битум БНД 70/100 и модифицированная резиновая крошка, диспергированная в битуме. В результате проведенных экспериментов было установлено, что при температуре ниже 140°C время диспергирования резиновой крошки в битуме составляет более 4 ч. Это значение является максимальным, так как при большей продолжительности стадии диспергирования резиновой крошки производительность

всего процесса приготовления РБВ не может считаться рентабельной. Оптимальным является 5...7 ч перемешивания. Верхнее значение температуры эксперимента 220°C из-за того, что при этом начинает активно протекать термическая деструкция резиновой крошки.

На рис. 3...6 показаны изменения основных эксплуатационных характеристик РБВ (глубина проникновения иглы, при 0°C и 25°C, температура размягчения по кольцу и шару, растяжимость и эластичность), приготовленных в зависимости от времени

смешения в температурном диапазоне 150...220°C в смесителе (рис. 3 – зависимость глубины проникновения иглы при 0°C от времени смешения РБВ; рис. 4 – зависимость температуры размягчения по кольцу и шару от времени смешения РБВ; рис. 5 – зависимость растяжимости резинобитумных вяжущих от времени смешения при 25°C; рис. 6 – зависимость эластичности резинобитумных вяжущих от времени смешения).

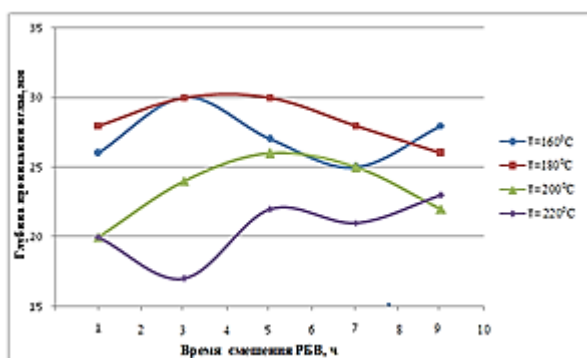


Рис. 3

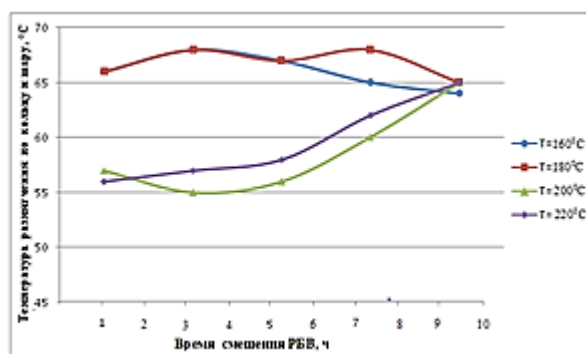


Рис. 4

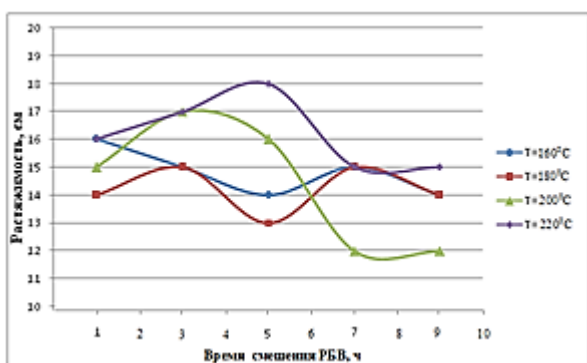


Рис. 5

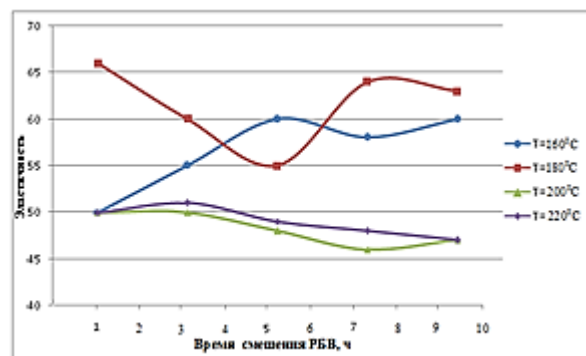


Рис. 6

Основными причинами этих изменений являются окисление битума и влияние высокой температуры на резиновую крошку. Окисление легких компонентов битума, таких как смолы и масла, приводят к возрастанию температуры размягчения образцов и снижению пенетрации, то есть изменяется первоначальная структура модифицированной резиновой крошки

Первоначальный рост растяжимости связан с увеличением степени диспергирования частиц резиновой крошки в массе РБВ и образованием разветвленной решетки из его молекул. Но после 181...185°C

этот показатель начинает снижаться, что отрицательно для эластичности ПБВ,

Таким образом, оптимальной температурой приготовления РБВ является температура в интервале 150...170°C. При этом необходимо отметить, что при сокращении продолжительности смешивания компонентов при одновременном увеличении температуры процесса в полимерно-битумном вяжущем интенсивно протекают процессы, при которых изменяются эксплуатационные показатели вяжущего. Можно отметить, что правильное определение температурного режима позволяет экономить ра-

бочее время и энергоресурсы, увеличить производительность установки и наилучшим способом реализовать потенциал резиновой крошки, как высокоэффективного модификатора битума.

ВЫВОДЫ

Анализ современных представлений о структуре нефтяных битумов и полимерно-битумных вяжущих показал, что перспективным направлением модификации битумов является использование добавок резиновой крошки. Впервые исследованы физико-химические свойства резиновой крошки ТОО "ЭКО-Шина", используемой для повышения качества битумов и асфальтобетон.

Анализ факторов, влияющих на эксплуатационные свойства резинобитумного вяжущего, показал, что при повышенных температурах в резиновой крошке преобладают деструктивные процессы, которые в зависимости от температуры и продолжительности смешивания с битумом могут привести к полной деструкции резины. Кроме того, вероятен процесс пиролиза активного наполнителя резины, за счет большой дисперсности частиц и образования сажи на поверхности резиновой крошки, что приведет к значительному ухудшению адгезионных и когезионных свойств вяжущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сырманова К.К., Алипбекова Ж.К., Боташев Е.Т. Анализ использования полимерно-битумных вяжущих в Казахстане и за рубежом // Тр. Междунар. научн.-практ. конф.: Ауэзовские чтения-17. – Шымкент, 2019. С. 280...283.
2. Разгон Д.Р. Вторичное использование и переработка изношенных шин. 2004/1/7 [Электрон. ресурс]: [статья] / Режим доступа: <http://www.recyclers.ru/modules/section/article.php?articleid=26> (дата обращения: 20.01.2007).
3. Прокопец В.С., Иванова Т.Л. Модификация дорожного асфальтобетона резиновыми порошками механоактивационного способа получения. – Омск: СибАДИ, 2012.

4. Долинская Р.М., Прокочук Н.Р. Влияние резиновой крошки на свойства нефтяного битума // Труды БГТУ. Сер.2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021, № 1(241). С.172...175.

5. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. – М.: Транспорт, 2013.

6. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. – М.: Химия, 2003.

7. Худякова Т.С., Масюк А.Ф., Калинин В.В. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами // Дорожная техника. – 2003. Апрель. С. 174...181.

8. Syrmanova K.K., Alipbekova Z. K., Suleimenov U.S., Kaldybekova Z.B., Kovaleva A.Y. and Botashev Y.T. Bitumen and asphalt concrete qualitative properties improvement depending on rubber crumb using Raszayan Journal of Chemistry. – Vol. 14, № 2, 2021. P.778...784.

REFERENCES

1. Syrmanova K.K., Alipbekova Zh.K., Botashev E.T. Analysis of the use of polymer-bitumen binders in Kazakhstan and abroad // Tr. International scientific-practical Conf.: Auezov Readings-17. – Shymkent, 2019. P. 280...283.

2. Acceleration D.R. Reuse and recycling of used tires. 2004/1/7 [Elec. resource]: [article] / Access mode: <http://www.recyclers.en/modules/section/article.php?articleid=26> (accessed 01/20/2007).

3. Prokopets V.S., Ivanova T.L. Modification of road asphalt concrete with rubber powders of mechanical activation method of obtaining. - Omsk: SibADI, 2012.

4. Dolinskaya R.M., Prokopchuk N.R. Influence of crumb rubber on the properties of petroleum bitumen // Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technologies, biotechnologies, geoecology. - 2021, No. 1 (241). P.172...175.

5. Kolbanovskaya A.S., Mikhailov V.V. Road bitumen. – М.: Transport, 2013.

6. Gun R.B. Oil bitumen. – М.: Chemistry, 2003.

7. Khudyakova T.S., Masyuk A.F., Kalinin V.V. Features of the structure and properties of bitumen modified with polymers // Road technology. - 2003. April. P. 174...181.

8. Syrmanova K.K., Alipbekova Z.K., Suleimenov U.S., Kaldybekova Z.B., Kovaleva A.Y. and Botashev Y.T. Bitumen and asphalt concrete qualitative properties improvement depending on rubber crumb using Raszayan Journal of Chemistry. – Vol. 14, No. 2, 2021. P.778...784.

Рекомендована Ученым советом ЮКГУ им. М. Ауэзова. Поступила 27.12.21.

**ТЕКСТИЛЬСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА И ИСПЫТАНИЯ ШИН С ОБРЕЗИНЕННЫМ КОРДОМ**

**TEXTILE-CONTAINING WASTES IN TECHNOLOGY OF PRODUCTION
AND TESTING OF TIRES WITH A RUBBERED CORD**

*В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Г.Ф. САГИТОВА, С.В. ПОНОМАРЕНКО, А.А. ЕШЖАНОВ,
А.Ж. СУЙГЕНБАЕВА, Д.А. ЖУНИСБЕКОВА*

*V. M. JANPAIZOVA, G. F. SAGITOVA, S.V. PONOMARENKO, A.A. YESHZHANOV,
A. ZH. SUIGENBAYEVA, D.A. ZHUNISBEKOVA*

(Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)

(M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)

E-mail: vasmir1@mail.ru

В данной статье исследуется технология создания резиноволокнистых композиционных материалов путем введения волокнистых наполнителей из отходов обрешиненных кордов в рецептуру резин обкладочного типа, что позволяет снизить ресурсоемкость изделий. В настоящее время большой интерес к композиционным материалам обусловлен их комплексом свойств, особенностей и расширением сырьевой базы на основе существующих продуктов путем изменения состояния и структуры материала. Для получения волокнистых наполнителей используют текстильсодержащие отходы, которые существенно влияют на когезионную прочность смесей. В работе показано производство резиновой смеси в резиносмесителе путем постепенного введения каучука, целевых добавок, технического углерода и волокнистых наполнителей из отходов обрешиненного корда от производства шин. Анализ полученных результатов исследований показывает, что тип волокна из отхода обрешиненного корда оказывает сильное влияние на когезионную прочность резиновых смесей и незначительно влияет на такие свойства, как пластичность и вязкость. Установлено, что применение волокнистых наполнителей из отходов обрешиненных кордов различных типов позволяет повысить когезионные и упругожесткостные свойства резин на основе каучука СКИ-3.

The article under review examines the technology of creating rubber-fiber composite materials by introducing fibrous fillers from waste rubberized cords into the formulation of cover-type rubbers, which makes it possible to reduce the resource products intensity. Currently, great interest in composite materials is due to their complex of properties, features and expansion of the raw material base of existing products by changing the state and structure of the material. To obtain fibrous fillers, textile-containing wastes are used, which significantly affect the cohesive strength of the mixtures. The work shows the production of a rubber compound in a rubber mixer by the gradual introduction of rubber, targeted additives, carbon black and fibrous fillers from rubber cord wastes from tire production. The analysis of the obtained research results shows that the type of fiber from the waste rubberized cord has a strong effect on the cohesive strength of rubber compounds and insignificantly affects properties such as plasticity and toughness. It has been established that the use of fibrous fillers from waste rubberized cords of various types

makes it possible to increase the cohesive and elastic-stiffness properties of rubbers based on SKI-3 rubber.

Ключевые слова: волокнистые наполнители, каучук, полимеры, композиты, пластичность, вязкость, когезионная прочность, резиновая смесь.

Keywords: fibrous fillers, rubber, polymers, composites, plasticity, viscosity, cohesive strength, rubber compound.

Одно из приоритетных направлений развития шинной промышленности состоит в том, чтобы обеспечить выпуск конкурентоспособной продукции за счет снижения ресурсоемкости изделий и создания современных конструкционных материалов. Снижение ресурсоемкости изделий возможно в результате разработки и реализации определенных организационно-технических мероприятий и, в первую очередь, за счет рационального использования вторичных ресурсов [1], [2].

Оценки экспертов свидетельствуют об экспоненциальном росте научных исследований и объема промышленного производства волокнаполненных полимерных композитов в последние годы. Подобное внимание к полимерам, наполненным волокнами, обусловлено несколькими причинами. Во-первых, волокнаполненные композиты характеризуются комплексом свойств и качеством, недостижимыми при использовании индивидуальных компонентов. Во-вторых, использование композиционных материалов позволяет практически неограниченно расширить сырьевую базу на основе существующих продуктов без синтеза и запуска в производство нового вида полимеров. В-третьих, производство изделий из эластомерных материалов может оказаться менее ресурсоемким, если решить задачу получения дешевого волокнистого компонента, определяющего значение нужного свойства или комплекса свойств [3], [4].

Следует отметить, что введение волокнистых наполнителей в полимерную матрицу преследует разнообразные цели, среди которых можно выделить следующие:

- модификация потребительских качеств изделий путем изменения состояния

и структуры материала;

- создание более дешевых композиций за счет введения наполнителя с низкой стоимостью;

- использование отходов производства и потребления текстильсодержащих материалов.

Альтернативными источниками получения волокнистых наполнителей являются отходы текстильсодержащих материалов, образующиеся в производстве технических тканей, при изготовлении продукции на заводах резиновой промышленности и при переработке изношенных шин и резинотехнических изделий. Эти "безвозвратные" отходы не могут быть возвращены в производство без соответствующей обработки [5].

Классификация текстильсодержащих отходов по источникам образования и составу позволяет оценить объемы сырьевой базы для получения волокнистых наполнителей.

Текстильсодержащие отходы по виду промышленности делятся на шинные, резинотехнические, резинообувные, регенеративные, текстильные. По виду ресурсов текстильсодержащие отходы классифицируются на отходы производства (остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, образующихся в процессе производства продукции, частично или полностью утративших свое качество и не соответствующих стандартам) и потребления (изношенные изделия и отработанные материалы, восстановление которых экономически нецелесообразно). Отходы производства, за исключением регенеративного, содержат в своем составе новые, не подвергшиеся эксплуатации материалы – эластомеры и волокна. Материалы, входящие в состав отходов потребления, в процессе эксплуатации претерпели некото-

рые изменения структуры и свойств, что, тем не менее, не умаляет их потребительской ценности [6...10].

В качестве объектов исследования были выбраны резиновые смеси обкладочного типа на основе изопренового каучука СКИ-

3 и их вулканизаты. В качестве исходных материалов для получения волокнистых наполнителей применялись полиэфирный и вискозный корд. Состав смесей приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование каучуков и ингредиентов	Содержание ингредиентов, масс. ч. на 100 масс. ч. каучука
	Для легковых шин
СКИ-3	100,0
Сера	2,1
Сульфенамид Ц	1,5
Оксид цинка	3,9
Кислота олеиновая	5,6
Кислота стеариновая	1Д
Масло ПШ-6	15,6
Битум марки "Г"	3,3
Ангидрид фталевый	0,3
Техуглерод П-514	40,0
Техуглерод П-234	20,0
Волокнистый наполнитель	Переменное количество

Резиновые смеси готовились в лаборатории Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова (Республика Казахстан). Изготовление резиновой смеси осуществляли в резиномесителе типа РС-270-40 путем последовательной загрузки каучука, целевых добавок, технического углерода и ООКШП (отходы обрезиненных кордовых шинного производства). Смешение с опущенным верхним прессом проводили в течение 120 с, при температуре 135...145°C. Далее смесь поступает в гранулятор и охлаждающий барабан.

Температура гранул при подаче на вторую стадию смешения 40...65°C; вторую стадию смешения осуществляют в резиномесителе типа РС-250-24 с целью введения серосодержащей вулканизирующей группы. Температура выгружаемой из резиномесителя смеси 100...105°C. Далее готовая резиновая смесь обрабатывается на агрегате из трех вальцов и подается на каландр для обрезинивания кордного полотна.

Отходы обрезиненных кордовых шинного производства вводились в обкладочные резины широкого ассортимента шин, выпускаемых на шинном заводе в г. Шымкенте, Республика Казахстан.

Тип волокна в ООКШП оказывает существенное влияние на когезионную прочность смесей. По степени усиливающего действия на когезионную прочность исследованные волокна располагаются в следующей последовательности: полиэфирное > вискозное. Объяснение указанному факту состоит в том, что, с одной стороны, волокна разных типов обладают различной прочностью, а с другой стороны – характеризуются разной гибкостью. Это приводит к тому, что они с различной скоростью диспергируются в процессе смешения с эластомерной матрицей и образуют макроструктуры, характеризующиеся различной степенью взаимозацепления волокон. Большая степень разрушения вискозных волокон в условиях вязкотекучего смешения, по-видимому, приводит к уменьшению их взаимозацепления и снижению усиливающего эффекта.

Пластичность композитов при увеличении содержания ООКШП снижается вследствие замещения части эластичной матрицы на практически не деформируемые волокна, вязкость системы возрастает.

Следует отметить, что когезионная прочность является единственным техно-

логическим свойством, на которое тип волокна в ООКШП оказывает значимое влияние. На другие технологические свойства резиновых смесей – пластичность и вязкость по Муни – тип волокна в ООКШП влияет незначимо.

Анализ полученных результатов (рис. 1) показал рост когезионной прочности композитов при увеличении содержания ООКШП. Это связано с увеличением количества взаимозацеплений между волокнами и образованием своеобразного каркаса, воспринимающего нагрузку.

Влияние типа волокна в ООКШП на физико-механические свойства резин представлено на рис. 1.

С применением ООКШП в обкладочных резинах каркаса в дозировках от 5 до 7 масс. ч. испытаны в условиях эксплуатации 201

штука опытных легковых шин и 149 эталонных шин.

Результаты эксплуатационных испытаний по конкретным размерам и партиям шин приведены в табл. 2.

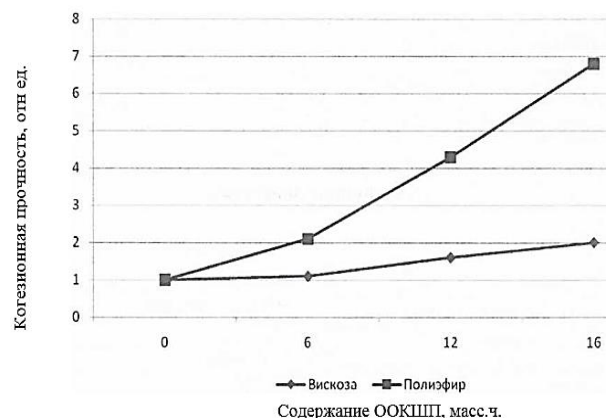


Рис. 1

Таблица 2

Размер шин	Характеристика шин	Количество шин		Средний пробег, тыс. км		Примечание
		опытных	эталонных	опытных	эталонных	
155/70R13	Применение в каркасе	63	63	15,2	13,8	по каркасу разрушений нет
165/70R13	ООКШП в дозировках	60	59	16,7	15,4	
175/70R14	от 5 до 7 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука	78	27	16,9	15,8	
Всего		201	149	48,8	45,0	

По результатам эксплуатационных испытаний из табл. 2 видно, что применение в рецептуре шинных резин ООКШП не оказывает отрицательного влияния на общую выносливость и износостойкость шин. Кроме того, при лабораторных испытаниях резины было выявлено, что свойства добавок ООКШП повышают когезионную прочность и упруго-жесткостные характеристики вулканизатов.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования показали, что использование ООКШП, полученного из отработанных резиновых кордов различного типа, приводит к улучшению когезионных и упруго-жесткостных свойств резины на основе изопренового каучука СКИ-3.

Увеличение содержания ООКШП приводит к росту когезионной прочности композитов за счет увеличения количества вза-

имозацеплений между волокнами и образования своеобразного каркаса, воспринимающего нагрузку.

Обобщенные результаты испытаний показали увеличение среднего пробега шин на 9,5% к эталону при уменьшении количества вышедших из эксплуатации шин из-за дефектов каркаса на 0,7%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности устройства шины автомобиля разных типов. Автомобильный информационный сайт: полезные статьи и новости о машинах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://365cars.ru/remont/ustroystvo-shinyiavtomobilya.html>
2. Корд. Технический словарь. Том IV [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ai08.org/index.php/term>
3. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Tarlanova B., Sagitova G., Shingisbayeva Zh. The study of physical and chemical properties of water-soluble polymer reagents and their compatibility with antibiotics // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 13, № 3, 11417-1423, July - September, 2020. ISSN: 0974-1496 | e- ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP

4. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Sagitova G., Bekzhigitova K., Shingisbayeva Zh. The investigation of physical and chemical properties of water solutions of polymers and their application in combination with drugs // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 14, № 1, 1-8, January - March, 2021. ISSN: 0974-1496 | e-ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP

5. Сагитова Г.Ф., Джанпаизова В.М., Арипчаева А.Е., Абилхаймызы Л., Сихимбаева М.Т., Консыбеков С.М. Исследование отходов обрезиненных текстильных кордов шинного производства как источника получения волокнистых наполнителей // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2020, №4. С. 49...54.

6. Туребекова Г.З., Шапалов Ш., Сакибаева С.А., Жарылкасын П.М., Пусурманова Г.Ж., Сагитова Г.Ф., Есентаева Г.Ф., Махамбетов М.Ж. Application of oil industry wastes (sludges and sulfur) in rubber production // *Известия национальной академии наук РК, Алматы НАН РК*. – №6 (420), 2016. С.185...189.

7. Сагитова Г.Ф., Джанпаизова В.М., Арипчаева А.Е., Абилхаймызы Л., Сихимбаева М.Т., Консыбеков С.М. Исследование влияния коротких обрезиненных кордных волокон на свойства резины для подрельсовых прокладок // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2020, №6. С.87...93

8. Туребекова Г.З., Сагитова Г.Ф., Алтамысова Г.Б., Жаппарбергенова Э.Б., Абилхаймызы Л., Сихимбаева М.Т. Способ повышения прочности связи резин с текстильными кордами из синтетических волокон // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2020, №5. С. 26...33.

9. Сагитова Г.Ф., Туребекова Г.З., Исаев Г.И., Абилхаймызы Л., Сихимбаева М.Т., Алтамысова А.Б. Пути повышения прочности связи системы "резина - капроновый текстильный корд" // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2020, №6. С. 81...87.

10. Сакибаева С.А., Сырманова К.К., Негим Э.С. *Технология эластомеров*. – Шымкент: "Элем", 2013.

REFERENCES

1. Features of the car tire device of different types. Automotive information site: useful articles and news about cars [Electronic resource]. Access mode: <http://365cars.ru/remont/ustroystvo-shinyiavtomobilya.html>

2. Cord. Technical dictionary. Volume IV [Electronic resource]. - Access mode a: <http://www.w.w.8.org/index.php/term>

3. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Tarlanova B., Sagitova G., Shingisbayeva Zh. The study of physical and chemical properties of water-soluble polymer reagents and their compatibility with antibiotics // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 13, No. 3, 11417-1423, July - September, 2020. ISSN: 0974-1496 | e-ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP

4. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Sagitova G., Bekzhigitova K., Shingisbayeva Zh. The investigation of physical and chemical properties of water solutions of polymers and their application in combination with drugs // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 14, No. 1, 1-8, January - March, 2021. ISSN: 0974-1496 | e-ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP

5. Sagitova G.F., Dzhapanpaizova V.M., Aripbaeva A.E., Abilkhaimkyzy L., Sihimbaeva M.T., Konysbekov S.M. Investigation of waste rubberized textile cords of tire production as a source of fibrous fillers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 4. P. 49...54.

6. G. Z. Turebekova, Sh. Shapalov, S. A. Sakibaeva, P. M. Zharylkasyn, G. Zh. Pusurmanova, G. F. Sagitova, G. F. Esentaeva, and M. Zh. Application of oil industry wastes (sludges and sulfur) in rubber production // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty NAS RK*. - No. 6 (420), 2016. P. 185 ... 189.

7. Sagitova G.F., Dzhapanpaizova V.M., Aripbaeva A.E., Abilkhaimkyzy L., Sihimbaeva M.T., Konysbekov S.M. Investigation of the influence of short rubberized cord fibers on the properties of rubber for rail pads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 6. P.87...93

8. Turebekova G.Z., Sagitova G.F., Alpamysova G.B., Zhapparbergenova E.B., Abilkhaimkyzy L., Sihimbaeva M.T. A method for increasing the bond strength of rubber with textile cords made of synthetic fibers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 5. P. 26...33.

9. Sagitova G.F., Turebekova G.Z., Isaev G.I., Abilkhaimkyzy L., Sihimbaeva M.T., Alpamysova A.B. Ways to increase the bond strength of the "rubber - kapron textile cord" system // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 6. P. 81...87.

10. Sakibaeva S.A., Syrmanova K.K., Negim E.S. *elastomer technology*. - Shymkent: "Elem", 2013.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 17.11.21.

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_61

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТКАНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ
АРМИРУЮЩИХ СТРУКТУР – КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО***

**COMPOSITE MATERIALS BASED ON THREE-DIMENSIONAL WOVEN
MULTILAYER REINFORCING STRUCTURES - STRUCTURAL MATERIALS
PRESENT AND FUTURE**

Д.А. ПИРОГОВ, Л.Б. МАСЛОВ, К.В. КЛОПОВА

D.A. PIROGOV, L.B. MASLOV, K.V. KLOPOVA

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University)**

E-mail: pirogov81@mail.ru

В настоящей статье представлен обзор научных работ, экспериментальных исследований и применения композиционных материалов в различных отраслях промышленности, отмечены их достоинства и недостатки. Особое внимание в работе уделяется композиционным материалам на основе трехмерных тканых многослойных армирующих структур из различного вида технических нитей. Обозначен круг задач, решение которых позволит наиболее эффективное исследование и проектирование композиционных материалов на основе трехмерных тканых многослойных структур.

In the present paper a review of scientific works, experimental researches and application of composite materials in different industries is presented, their advantages and disadvantages are noted. Particular attention is paid to composite materials based on three-dimensional woven multilayer reinforcing structures of different types of technical threads. The range of tasks is outlined, the solution of which will enable the most effective research and design of composite materials on the basis of three-dimensional woven multilayer structures.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

Ключевые слова: композиционный материал, специальное ткачество, 3D-тканая армирующая структура, техническая нить, физико-механические характеристики.

Keywords: composite material, special weaving, 3D woven reinforcing structure, technical thread, physical and mechanical properties.

Композитные материалы активно используются в мировой промышленности, начиная с середины двадцатого века. Преимущество использования композитов вместо металлических конструкций заключается в том, что они имеют малый вес, прочнее и не подвержены коррозии. Наиболее используемый в настоящее время в конструкциях, где требуется высокая прочность, в частности, в авиастроении и транспортном машиностроении, тип композитного материала – это многослойная структура, каждый слой которой представляет собой однонаправленные армирующие волокна, пропитанные связующим полимерным веществом. Подобные двумерные композиты хорошо себя зарекомендовали как элементы обшивки самолета, детали корпуса автомобиля, компоненты бытовой техники. При этом слоистые композитные материалы имеют достаточно развитую теоретическую базу в виде теории эффективных модулей и методов расчета периодических структур, а также устоявшиеся технологии производства.

Однако при производстве высоконагруженных конструкций сложной пространственной формы слоистые композитные структуры имеют ряд недостатков, которые могут быть преодолены с помощью композитных материалов, обладающих трехмерной структурой. Трехмерные текстильные композиты имеют широкий спектр физико-механических свойств, которые превосходят характеристики традиционных двумерных слоистых структур, что эффективно может быть применено в авиакосмической, судостроительной, автомобильной промышленности, в строительстве и тканевой инженерии.

В настоящее время к основным текстильным технологиям, производящим основу для трехмерных композитных матери-

алов, относят ткачество, плетение, вязание и др. Одним из наиболее перспективных подходов для создания сложных пространственных конструкций как единого композитного материала является технология ткачества, обеспечивающая формирование трехмерной тканой заготовки (преформы) требуемого вида, структуры, толщины.

Трехмерный материал, полученный с помощью процесса ткачества, обладает существенными преимуществами: стабильность структуры, естественная локализация места разрушения, необходимая плотность, возможность использования различного вида технических нитей (металлических, кремнеземных, кварцевых, стеклянных, синтетических, углеродных, магнитных и т.д.), что может существенно расширить область его применения.

В основе проектирования физико-механических свойств композита на основе объемной тканой структуры лежит понимание того, что его конечные упругие и прочностные свойства зависят от параметров процесса ткачества, существенно влияющих на структуру преформы. Создавая специальное пространственное переплетение нитей? можно управлять характеристиками напряженно-деформированного состояния объемной тканой структуры, а выбор вида нитей и подбор матрицы позволят получить композиционный материал с уникальными, но прогнозируемыми механическими свойствами.

По сравнению с теориями, разработанными для механики материалов и конструкций двумерных тканых структур из технических нитей, вышеуказанная область материаловедения имеет свои особенности и усложняется многими факторами, которые требуют изучения. Представляется актуальным разработка математической модели характерного тканого элемента как слож-

ной пространственной формы структуры с учетом взаимодействия нескольких систем нитей основы и утка при его формировании.

Существенной фундаментальной проблемой является отсутствие адекватных многомасштабных математических моделей напряженно-деформированного состояния объемного тканого элемента в типичных условиях нагружения, что в свою очередь является отправной точкой для исследования механических свойств композитных материалов и конструкций на основе тканых преформ. Для этого необходимо исследование напряженно-деформированного состояния элемента нити утка и нити основы в процессе формирования конкретной объемной тканой структуры, связывающее между собой силовые характеристики в поперечных сечениях этих элементов, их геометрические характеристики и физико-механические характеристики их материала, натяжения в начальном недеформированном состоянии и геометрические параметры вырабатываемой трехмерной тканой структуры.

Слоистые композитные материалы обладают уникальными свойствами и высокой технологичностью изготовления, но, несмотря на это, они имеют существенный недостаток – низкую межслоевую прочность, что существенно сокращает область их применения. Существенно увеличить межслоевую прочность позволяет применение пространственно армированных композитных материалов благодаря межслоевым связям, выполненным на уровне ячеек, что обеспечивает технология создания объемных тканых структур.

Применение трехмерных тканых композитов в промышленности стремительно растет, например, в автомобилестроении [1...3]; в строительстве [4] в конструкциях, требующих передачи нагрузки вокруг изгиба, например, в изогнутых балках использовались композитные тройники и кронштейны из объемных тканых структур; в [5] сообщается об использовании тканого композита в энергетике – в сверхлегких теплообменниках; кроме того, тканые композиты успешно применяются в авиационной промышленности – в проектах по изготовлению кожухов

двигателей и лопаток вентилятора для самолетов [6].

В условиях динамично изменяющихся внешних нагрузок требуется обеспечение возможности прогнозирования поведения и проектирования механических свойств рассматриваемых материалов с учетом внешних локальных нагрузок и повреждений.

Исследованиям тканых композитов посвящены работы многих авторов: Hexcel (США); VI Team (Швеция); 3Tex Inc. (США); Sigma Tex (США, Великобритания, Китай); Anping Xinpeng MeshBelt (Китай); ITA, г. Аахен (Германия); NCSU (США); MIT Массачусетс (США); TUL (Чехия); University Ghent (Бельгия); ENSAIT (Франция); RoyalInstituteofTechnology, UniversityBoras (Швеция); Кафр-Эль-Шэйх (Египет); Тяньцзиньский политехнический университет (Китай); Уханьский текстильный университет (Китай); University Osaka (Япония), Albany Engineered Composites (США), Tomi-Tex (Япония), BPM (США), 3TEX (США), 3D Wovens (Турция), Bally Ribbon Mills (США), J.H. Vom Baur Sohn GmbH&Co. KG (Германия) [7].

Можно отметить новые преимущественные свойства подобных материалов [8]:

- низкая анизотропия, обеспечивающая равномерное проявление механических характеристик во всех направлениях;
- исключение риска расслоения, локализация трещин и высокая стойкость к торцевому удару;
- имеют лучший межслойный сдвиг и сопротивление радиальному напряжению;
- повышение стойкости к деформациям, высокотемпературным воздействиям, абляции, радиопрозрачность;
- форма тканой заготовки практически соответствует заданной форме и требует минимальной обработки после пропитки связующим материалом;
- улучшение воспроизводимости процесса производства композитных изделий из-за отсутствия ручных операций;
- возможность обработки композитного материала резанием;
- уменьшение трудоемкости и стоимости изготовления серийно выпускаемых высокоэффективных изделий.

Для решения задач механики текстильных нитей, разработки и исследования 3D-тканых структур многими авторами использовались методы аналитической геометрии, вариационного исчисления, экспериментальные методы и др.

Одним из основоположников научного направления можно считать В.А. Гордеева. Его разработки в данной области известны еще с середины прошлого века, например, [9].

Теоретическими исследованиями по изучению механики текстильных нитей и тканей занимались отечественные ученые Мигушов И.И., Щербаков В.П., Минаков А.П., Светлицкий В.А. [10...12]

Например, авторы в статьях [13], [14] исследовали строение сотканной трехмерной структуры методом компьютерной томографии. В [13] после применения компьютерной томографии разрабатывалась геометрическая структура и модель взаимодействия нитей в ней. При определенных допущениях сделаны предположения о геометрии осей нитей и об их форме. В статье отмечается, что единой теории строения 3D-тканей для различных технологических процессов ее получения нет. Также приводится обширный обзор источников по данной теме исследований, в котором делается заключение о том, что существует необходимость разработки общего метода моделирования при рассмотрении разновидностей трехмерных тканых структур, с помощью которых можно было бы обсудить факторы, влияющие на свойства трехмерных тканых композитов, чтобы облегчить конструкцию трехмерных тканых заготовок. Различные авторы для описания структуры 3D-тканей предлагают многообразие моделей. В [14] на основе компьютерной томографии проводилась проверка адекватности разработанных теоретических моделей: уточнялись геометрические характеристики сотканной структуры, толщина стенок, содержание различных единиц элементарного "субобъема" будущего композитного материала и оценка технологических погрешностей.

Существенный вклад в развитие данной области науки внесла работа Ломова С.В.,

посвященная прогнозированию и математическому описанию строения технических тканей и изучению их механических характеристик в различных условиях нагружения [15].

В настоящее время наибольших успехов в этом направлении, по нашему мнению, достигла группа ученых университета г. Левен (KU Leuven), Бельгия, научные достижения которой представлены множеством научных трудов различного уровня, в которых решен целый ряд фундаментальных и прикладных задач [15...42].

Данная группа авторов провела полноценные исследования тканых композитов от экспериментальной составляющей до разработки собственного программного обеспечения "WiseTex" [16], позволяющего моделировать механические свойства рассматриваемых материалов и визуально определять наиболее опасные области армирующей ткани.

Предлагаемые авторами математические модели и программное обеспечение базируются на использовании элементарных периодических ячеек (периодических элементов переплетения объемной армирующей ткани) и направлены на определение эффективных механических свойств композитов.

Стоит отметить, что не до конца решенным остается ряд задач, например, характер изогнутой оси нити и форма ее сечения в сформированной трехмерной тканой структуре, оптимальные соотношения параметров нитей и объемной тканой структуры и многие другие вопросы, на которые однозначных ответов получить не удалось.

С.В. Ломов в работе [15] использовал вариационные методы для решения задач – нахождения формы оси нити, рассматривая математическое решение двух видов взаимодействия нитей в объемной тканой структуре "свободный изгиб" и "изгиб около опорного сечения".

В работе [22] показана практическая возможность изготовления деталей для автомобиля из композитных материалов на основе объемных тканых структур. Выработка объемного тканого полотна осуществлялась на стандартном ткацком

станке, оснащенный зевобразовательной кареткой "Добби", причем полученный тканый образец содержал зоны, выполненные на основе простейших переплетений типа: саржа, атлас и др. В работе отмечается, что проведены измерения плотности методами оптической микроскопии на содержание различного рода дефектов и пустот, которые показали отсутствие пустот. Также проведены испытания на растяжение и изгиб в направлении основы и утка, которые показали, что модуль и прочность значительно выше в направлении утка. Авторы считают, что снижение физико-механических характеристик происходит из-за увеличения пересечений нитей основы и утка, которые создают области высокого локального напряжения, снижают прочность и увеличивают риск разрушения материала.

На наш взгляд, необходима разработка иных математических моделей элементарных периодических элементов объемного ткацкого переплетения, которые более детально описывали бы ее поведение и вместе с тем упрощали математическое описание, например, вместо "ячейки" в рассмотрение принимать одиночную нить.

Также при решении вышеуказанных вопросов выгодно выступают методы компьютерного моделирования, опираясь на результаты которых можно глубже понять суть происходящих физических явлений, а также уточнять и дополнять разрабатываемые математические модели, при сокращении затрат на проведение натурных экспериментов.

В качестве исходных материалов для тканой основы широко используются материалы: стекло, хлопок, карбон и различные полимеры, так как композиты на их основе используются в авиа- и ракетостроении, где требуется достаточная прочность при ограниченной массе. Композиты на основе металлических нитей, на наш взгляд, имеют свои преимущества и нашли бы свое применение в других отраслях современного машиностроения. Это можно аргументировать тем, что механика многих металлов и сплавов достаточно глубоко изучена, а технологии получения и обработки давно известны и отработаны. Широкий ассорти-

ментный ряд металлов и сплавов позволит подобрать материалы от сверхпластичных (медь, бронза) до сверхпрочных (титан).

На сегодняшний день в высокотехнологичном машиностроении наблюдается необходимость в сверхпрочных материалах с уникальными физико-механическими свойствами [23...25]. Решение данной задачи осуществляется по разным направлениям: совершенствование существующих, применение нанотехнологий, создание принципиально новых материалов и др. Одним из наиболее перспективных является разработка различного рода композитов, преимущества которых очевидны.

В настоящее время перспективным направлением при разработке композитных материалов является использование в качестве основы объемного текстильного материала. Многими исследователями отмечаются преимущества композитов на основе объемных тканых структур и перспективность данного направления исследований [41...57].

Одним из важных преимуществ 3D-ткачества является то, что заготовки могут быть наиболее близки к форме конструкции со сложной геометрией. Эта способность 3D-ткачества – производить заготовки, близкие к форме конструкции, – может значительно снизить ее стоимость, уменьшив существенные потери, потребность в механической обработке и присоединении. Трехмерные тканые заготовки могут быть сделаны на стандартных промышленных ткацких станках, используемых для производства обычных тканей, путем модификаций оборудования. Это сводит к минимуму капитальные затраты, понесенные производителями композитов, потому что они не требуют дорогостоящих заказных станков для производства 3D-тканых заготовок. Тем не менее, в течение последних лет был разработан ряд специализированных станков, которые имеют более высокие скорости и способность ткачества более сложных форм, чем модифицированные традиционные ткацкие станки [41].

Другая преимущественная сторона 3D-ткачества заключается в том, что ткани с большим разнообразием архитектуры воло-

кон могут быть изготовлены с регулируемым количеством связующих нитей по всей толщине укрепления. Существуют два наиболее распространенных вида архитектуры – ортогональная и с переплетением слоев. Главным отличием является текстильный узор связующих нитей. Кроме того, количество и типы основы, утка и связующих нитей можно контролировать. Это нужно для того, чтобы адаптировать свойства композита для конкретной области применения. Доля связующих нитей в большинстве заготовок обычно менее 5%. Кроме того, можно производить и гибридные тканые заготовки с использованием более чем одного типа материала, однако механические свойства гибридных композитов, а также их использование в конструкциях требуют подробного изучения.

Таким образом, трехмерный материал, полученный с помощью технологии ткачества, обладает такими существенными преимуществами, как стабильность структуры, естественная локализация места разрушения, необходимая плотность, возможность использование различных нитей как натуральных, так и искусственных, в том числе углеродных и металлических.

Важнейшим преимуществом 3D-тканых композитов является их высокая ударопрочность [43...50], которая была одной из основных проблем в использовании 2D-слоистых материалов в военных авиационных конструкциях. Авторы [46] сообщают, что энергия удара, необходимая для того, чтобы инициировать повреждение в 3D-тканых композитах, на 60% больше, чем в 2D-слоистых материалах. Улучшенная стойкость к повреждениям, как правило, приводит к тому, что 3D-композиты испытывают меньшее снижение механических свойств. Улучшение стойкости к повреждениям 3D-соединений происходит, потому что связующая основа в состоянии зафиксировать или замедлить рост расслаивания, сформированного при динамической нагрузке [48], [51...53]. Связующие нити в значительной степени в 3D-тканых композитах отвечают за достаточно большое значение предела прочности [54] и значение межслойной вязкости, которая в 6...20 раз

выше, чем у углеродэпоксидных 2D-слоистых материалов [55].

Композиционные материалы перестали быть материалами из разряда фантастических и недостижимых – они наше настоящее и будущее.

Они находят широкое применение в инженерной практике, так как позволяют создавать конструкции с уникальными массовыми, прочностными, диссипативными и другими характеристиками, которых практически невозможно достичь использованием традиционных конструкционных материалов [58]. Поэтому их использование приносит материальные выгоды, эстетические, практические и многие другие преимущества. И остаются области инженерной деятельности, где эти материалы не теряют своей актуальности. Например, разработка летательных аппаратов специального назначения, автостроение и производство транспортных средств, военная промышленность, гражданское строительство и др.

Современной и своевременной явилась работа [59], в которой автор попытался решить ряд важных задач. Разработаны методики построения и проектирования геометрических моделей строения нетканых и 3D-тканых материалов, в том числе с использованием метода компьютерной томографии. Разработана методика, позволяющая оценить изотропность нетканого материала. Предложена новая методика проектирования цельнотканых 3D-преформ, которая позволяет создавать геометрические модели преформы произвольной объемной формы и моделировать ее структуру на уровне нити в масштабе всего изделия, на основе которой, разработано оригинальное программное обеспечение. Разработана методика прогнозирования механических свойств композиционных материалов, изготовленных на основе 3D-тканых каркасов, с использованием CAE-систем. Используется модель, учитывающая объемное содержание компонентов и игнорирующая форму и вид армирования, по совершенно объективным, указанным автором, причинам. В исследовании применялись различные виды переплетений. В резуль-

тате для принятых переплетений определены силовые, деформационные и энергетические характеристики, по которым проводился анализ прочности исследуемых образцов композиционных материалов.

ВЫВОДЫ

1. На сегодняшний день в высокотехнологичном машиностроении наблюдается необходимость в сверхпрочных материалах с уникальными физико-механическими свойствами.

2. Как показывает проведенный обзор, композиционные материалы на основе трехмерных тканых многослойных армирующих структур и технологии их получения успешно используются и способны восполнить существующую потребность в таких материалах.

3. Решение различного рода теоретических и прикладных задач по разработке и применению таких композитов актуально и необходимо для еще большего их совершенствования и использования.

4. Развитие данного направления в науке и промышленности оправданно, так как использование его результатов в современном наукоемком производстве современных конструкционных материалов открывает перспективы развития высокотехнологичных отраслей промышленности России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bayraktar H, Ehrlich D, Goering J, McClain M, Composites AE, Hampshire N, et al. 3D Woven Composites for Energy Absorbing // 20th Int. Conf. Compos. Mater. – Copenhagen; 2015. P. 19...24.

2. EL-Dessouky H., Snape A., Scaife R. et al. (4 more authors) (2016) Design, weaving and manufacture of a large 3D composite structures for automotive applications. In: 7th World Conference 3D Fabrics and their applications. 3D Fabrics and their applications, 08-09 Sep 2016, Roubaix, France. Jouve, Mayenne - France, P. 123-132. ISBN 978-2-9557912-0-2.

3. El-Dessouky HM, Snape AE, Turner JL, Saleh MN, Tew H, Scaife RJ. 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017;

4. Redman C., Bayraktar H., McClain M. Curved Beam Test Behavior of 3DWovenComposites. SAMPE Conf; 2014.

5. James G.Hemrick, EdgarLara-Curzio, Erick R. Lovelandb, Keith W. Sharp, Robert W. Scharp Woven

graphite fiber structures for use in ultra-light weight heat exchangers // Carbon. – V. 49, Is. 14, November 2011, P. 4820...4829: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.06.094>.

6. Jewell J., Kennedy R., Menard A. Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011;

7. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хиллов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов //Труды ВИАМ. – 2015. №9. С. 10 (viam-works.ru).

8. McClain M., Senior R., Organic T.E., Composites M. Overview of recent developments in 3D structures // Albany Engineered Composites. – 2012. P.1...12.

9. Гордеев В.А., Дудко Д.А., Мокеев М.Н. Тканый монтаж. – М.: Легпромбытиздат, 1989.

10. Мигушов И.И. Механика текстильной нити и ткани. – М.: Легкая индустрия, 1980.

11. Щербаков В.П. Прикладная механика нити. – М.: РИО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001.

12. Якубовский Ю.В., Живов В.С., Коритыцкий Я.И., Мигушов И.И. Основы механики нити. – М.: Легкая индустрия, 1973.

13. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E., Dickinson L.C., Singletary J.N. and Lienhart R.B. A new generation of 3D woven fabric preforms and composites // SAMPE Journal. – 2001. 37(3). P. 8...17.

14. Киселев А.М., Хиллов П.А., Пряхин В.С., Алейников П.А., Киселев М.В. Исследование структуры 3D-тканей методом компьютерной томографии // Сб. докл. участников Третьего междунар. научн.-практ. симпозиума научно-производственное партнерство: взаимодействие науки и текстильных предприятий и новые сферы применения технического текстиля. – 2018, С. 210...220.

15. Ломов С.В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: Дис. докт. техн. наук. – Санкт-Петербург: СПбГУ-ТиД, 1995.

16. Verpoest I. and Lomov S.V. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. Composites Science and Technology. – 65(15-16), 2005. P.2563...2574.

17. Lomov S.V. et al. Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms // Int. J. of Forming Processes. – 6(3-4), 2003. P.413...442.

18. Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation // Journal of the Textile Institute. – 98(1), 2007. P.1...13.

19. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // Composites: Part A. – V. 36, 2005. P. 173...181.

20. Bogdanovich A.E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites // Journal of Materials Science. – 41(20), 2006. P.6547...6590.

21. *Bogdanovich A.E.* Advancements in manufacturing and applications of 3D woven preforms and composites // The 16th International Conference on Composite Materials (ICCM-16). – 2007. Kyoto.
22. *Hassan M. El-Dessouky and Mohamed N. Saleh.* 3D Woven Composites: From Weaving to Manufacturing//Additional information is available at the end of the chapter. – <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74311>
23. *McHugh C.* Creating 3-D, One Piece, Woven Carbon Preforms Using Conventional Weaving and Shedding. SAMPE Conf. – V. 45, 2009. P. 33...41
24. *McHugh C.* The Manufacture of One Piece Woven Three Dimensional Carbon Fiber Nodal Structures. SAMPE Conf. – 2010.
25. *Chen X, Chen X, Taylor LW, Tsai L.* An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites // Textile Research Journal. – 81, 2011. P.932...944. DOI: 10.1177/0040517510392471
26. *Huysmans G., Verpoest I. and Van Houtte P.* A poly-inclusion approach for the elastic modelling of knitted fabric composites // Acta Materials. – 46(9), 1998. P.3003...3013.
27. *Lomov S.V., Huysmans G., Luo Y., Prodromou A., Verpoest I. and Gusakov A.V.* Textile Geometry Pre-processor for meso-mechanical and permeability modelling of textile composites // 9th European Conference on Composite Materials (ECCM-9). – 2000. Brighton: IOM Communications.
28. *Lomov, S.V., Huysmans G., Luo Y., Parnas R., Prodromou A., Verpoest I. and Phelan F.R.* Textile Composites: Modelling Strategies. Composites part A. – 32(10), 2001. P.1379...1394.
29. *Lomov S.V., Verpoest I., Bernal E., Boust F., Carvelli V., Delerue J.-F., De Luka P., Dufort L., Hirose S., Huysmans G., Kondratiev S., Laine B., Mikolanda T., Nakai H., Poggi C., Roose D., Tumer F., B. van den Broucke, Verleye B. and Zako M.* Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis // Proceedings of the 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15). – 2005: Durban. p. CD edition.
30. *Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H. and Hirose S.* MesoFE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms // Composites Science and Technology. – 67, 2007. P.1870...1891.
31. *Verpoest I. and Lomov S.V.* Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis // Composites Science and Technology. – 65(15-16), 2005. P.2563...2574.
32. *Desplentere F., Lomov S.V., Woerdeman D.L., Verpoest I., Wevers M. and Bogdanovich A.* Micro-CT Characterization of variability in 3D textile architecture // Composites Science and Technology. – 65, 2005. P.1920...1930.
33. *Lomov S.V., Ivanov D.S., Truong Chi T., Verpoest I., Baudry F., Vanden Bosche K. and Xie H.* Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test. Composites Science and Technology, in print.
34. *Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H., Molimard J. and Vautrin A.* Full field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites – Composites part A, in print.
35. *Koissin V., Ivanov D.S., Lomov S.V. and Verpoest I.* Fibre distribution inside yarns of textile composite: geometrical and FE modelling // Proceedings of the 8th International Conference on Textile Composites (Tex-Comp-8). – 2006: Nottingham. p. CD edition.
36. *Xu J., Lomov S.V., Verpoest I., Daggumati S.A.* progressive damage model of textile composites on meso-scale using finite element method: static damage analysis // Journal of Composite Materials. – 2014.
37. *Jain A., Van Paepegem W., Verpoest I., Lomov S.V.* A feasibility study of the Master SN curve approach for short fiber reinforced composites // International Journal of Fatigue. – 2016.
38. Micro-scale strain mapping in nano-engineered composites Mehdikhani M., Matveeva A., Aravand M., Brian L.W. // 17th European Conference on Composite Materials. – 2016.
39. *Xu J., Lomov S.V., Verpoest I., Daggumati S.* A progressive damage model of textile composites on meso-scale using finite element method: Fatigue damage analysis // Computers & Structures. – 2015.
40. Micromechanical modelling of textile composites Bacarreza O., Wen P., Aliabadi M.H., De Carvalho N.V. // Woven Composites. – 2015.
41. *Yamamoto T., Nishiyama S., Shinya M.* Study on weaving method for three-dimensional textile structural composites // Proceedings of the Fourth Japan International SAMPE Symposium, 25–28 September, Tokyo, Japan, SAMPE, 1975., P. 655...660.
42. *Lomov S.V. et al.* Experimental and theoretical characterization of the geometry of flat two- and three-axial braids // Textile Research J. – 72(1), 2002. P.706...712.
43. Lundblad W., Dixon C, Olher H. U.S. Patent 5,456,974, 10 October 1995.
44. *Ko F., Hartman D.* Impact behaviour of 2D and 3D glass-epoxy composites // SAMPE Journal. – 22, 1986. P.26...30.
45. *Reedy E.D., Guess T.R.* Additional comparisons of interlocked fabric and laminated fabric Kevlar 49/epoxy composites // Journal of Composite Technology and Research. – 8, 1986. P.163...168.
46. *Chou S., Chen H.C., Wu C.C.* BMI resin composites reinforced with 3D carbon-fibre fabrics // Composite Science and Technology. – 43, 1992. P.117...128.
47. *Voss S., Fahmy A., West H.* Impact tolerance of laminated and 3-dimensionally reinforced graphite-epoxy panels. In: Chandra T, Dhingra AK, editors. Advanced composites 93: international conference on advanced composite materials, The Minerals, Metals and Materials Society. – 1993. P.591...596.
48. *Billaut F., Roussel O.* Impact resistance of 3-D graphite/epoxy composites. In: Portsartip A, Street K,

editors. Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials, ICCM-10, Woodhead. – 1995 14–18 August, P. V551–V58.

49. Dickinson L., Mohammed M.H., Klang E. Impact resistance and compression properties of three-dimensional woven carbon/epoxy composites, ECCM-4, 25–28 September, Stuttgart, Germany, Amsterdam: Elsevier. – 1990 P. 659...664.

50. Ding Y.Q., Wenger W., McIlhagger R. Structural characterisation and mechanical properties of 3-D woven composites, European SAMPE. – 1993, P. 1...9.

51. Arendts F.J., Drechsler K., Brandt J. Manufacturing and mechanical performance of composites with 3-D woven fibre reinforcement, A.P. Mouritz et al // Composites: Part A. – 30, 1999. P.1445...1461.

52. Farley G.L., Smith B.T., Maiden J. Compressive response of thick layer composite laminates with through-the-thickness reinforcement // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 11, 1992. P.787...810.

53. Cox B.N., Dadkhah M.S., Morris W.L. On the tensile properties of 3D woven composites // Composites. – 27A, 1996. P.447...458.

54. Mouritz A.P., Bains C., Herszberg I. Mode I interlaminar fracture toughness properties of advanced textile fibreglass composites // Composites. – 30A, 1999. P.859...870.

55. Muller J., Zulliger A., Dorn M. Economic production of composite beams with 3D fabric tapes // Textile Month/ – 1994; September. P.9...13.

56. Wong R. Sandwich construction in the Starship // Proceedings of the 37th International SAMPE Symposium. – 9–12 March. – 1992, P. 186...197.

57. Limmer L., Weissenbach G., Brown D., McIlhagger R., Wallace E. The potential of 3-D woven composites exemplified in a composite component for a lower-leg prosthesis // Composites. – 1996.

58. Пурогов Д.А., Евграфова К.И. Математическое моделирование квазистатического процесса деформирования нити утка при формировании многослойной тканой структуры // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, №3(381). С.87...92.

59. Киселев А.М. Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения: Дис. ...докт.техн.наук. – 2019.

REFERENCES

1. Bayraktar H, Ehrlich D, Goering J, McClain M, Composites AE, Hampshire N, et al. 3D Woven Composites for Energy Absorbing // 20th Int. Conf. Compos. Mater. – Copenhagen; 2015. P. 19...24.

2. El-Dessouky H., Snape A., Scaife R. et al. (4 more authors) (2016) Design, weaving and manufacture of a large 3D composite structures for automotive applications. In: 7th World Conference 3D Fabrics and their applications. 3D Fabrics and their applications, 08-09 Sep 2016, Roubaix, France. Jouve, Mayenne - France, P. 123-132. ISBN 978-2-9557912-0-2.

3. El-Dessouky HM, Snape AE, Turner JL, Saleh MN, Tew H, Scaife RJ. 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017;

4. Redman C., Bayraktar H., McClain M. Curved Beam Test Behavior of 3DWovenComposites. SAMPE Conf; 2014.

5. James G.Hemrick, EdgarLara-Curzio, Erick R. Lovelandb, Keith W. Sharp, Robert W. Scharp Woven graphite fiber structures for use in ultra-light weight heat exchangers // Carbon. – V. 49, Is. 14, November 2011, P. 4820...4829: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.06.094>.

6. Jewell J., Kennedy R., Menard A. Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011;

7. K. I. Donetskskii, A. E. Raskutin, P. A. Khilov, Yu. Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials // Proceedings of VIAM. - 2015. No. 9. P. 10 (viam-works.ru).8. McClain M., Senior R., Organic T.E., Composites M.Overview of recent developments in 3D structures // Albany Engineered Composites. – 2012. P.1...12.

9. Gordeev V.A., Dudko D.A., Mokeev M.N. Woven montage. – M.: Legprombytizdat, 1989.

10. Migushov I.I. Mechanics of textile thread and fabric. - M.: Light Industry, 1980.

11. Shcherbakov V.P. Applied filament mechanics. – M.: RIO MSTU im. A.N. Kosygin, 2001.

12. Yakubovsky Yu.V., Zhivov V.S., Korityssky Ya.I., Migushov I.I. Fundamentals of thread mechanics. – M.: Light industry, 1973.

13. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E., Dickinson L.C., Singletary J.N. and Lienhart R.B. A new generation of 3D woven fabric preforms and composites // SAMPE Journal. – 2001. 37(3). P. 8...17.

14. Kiselev A.M., Khilov P.A., Pryakhin V.S., Aleinikov P.A., Kiselev M.V. Investigation of the structure of 3D tissues using computed tomography // Sat. report participants of the Third International scientific-practical Symposium scientific and industrial partnership: interaction of science and textile enterprises and new areas of application of technical textiles. – 2018, S. 210...220.

15. Lomov S.V. Forecasting the structure and mechanical properties of fabrics for technical purposes by methods of mathematical modeling: Dis. doc. tech. Sciences. - St. Petersburg: SPbGU-TiD, 1995.

16. Verpoest I. and Lomov S.V. Virtual composites textiles software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. Composites Science and Technology. – 65(15-16), 2005. P.2563...2574.

17. Lomov S.V. et al. Mathematical modeling of internal geometry and deformability of woven pre-forms // Int. J. of Forming Processes. – 6(3-4), 2003. P.413...442.

18. Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality imple-

- mentation // *Journal of the Textile Institute*. – 98(1), 2007. P.1...13.
19. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // *Composites: Part A*. – V. 36, 2005. P. 173...181.
20. Bogdanovich A.E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites // *Journal of Materials Science*. – 41(20), 2006. P.6547...6590.
21. Bogdanovich A.E. Advancements in manufacturing and applications of 3D woven preforms and composites // *The 16th International Conference on Composites Materials (ICCM-16)*. – 2007. Kyoto.
22. Hassan M. El-Dessouky and Mohamed N. Saleh. 3D Woven Composites: From Weaving to Manufacturing//Additional information is available at the end of the chapter. – <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74311>
23. McHugh C. Creating 3-D, One Piece, Woven Carbon Preforms Using Conventional Weaving and Shedding. *SAMPE Conf.* – V. 45, 2009. P. 33...41
24. McHugh C. The Manufacture of One Piece Woven Three Dimensional Carbon Fiber Nodal Structures. *SAMPE Conf.* – 2010.
25. Chen X, Chen X, Taylor LW, Tsai L. An overview on fabrication of three- dimensional woven textile preforms for composites // *Textile Research Journal*. – 81, 2011. P.932...944. DOI: 10.1177/0040517510392471
26. Huysmans G., Verpoest I. and Van Houtte P. A polyinclusion approach for the elastic modelling of knitted fabric composites // *Acta Materials*. – 46(9), 1998. P.3003...3013.
27. Lomov S.V., Huysmans G., Luo Y., Prodromou A., Verpoest I. and Gusakov A.V. Textile Geometry Preprocessor for mesomechanical and permeability modelling of textile composites // *9th European Conference on Composite Materials (ECCM-9)*. – 2000. Brighton: IOM Communications.
28. Lomov, S.V., Huysmans G., Luo Y., Parnas R., Prodromou A., Verpoest I. and Phelan F.R. Textile Composites: Modelling Strategies. *Composites part A*. – 32(10), 2001. P.1379...1394.
29. Lomov S.V., Verpoest I., Bernal E., Boust F., Carvelli V., Delerue J.-F., De Luka P., Dufort L., Hirose S., Huysmans G., Kondratiev S., Laine B., Mikolanda T., Nakai H., Poggi C., Roose D., Tumer F., B. van den Broucke, Verleye B. and Zako M. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis // *Proceedings of the 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15)*. – 2005: Durban. p. CD edition.
30. Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H. and Hirose S. MesoFE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms // *Composites Science and Technology*. – 67, 2007. P.1870...1891.
31. Verpoest I. and Lomov S.V. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis // *Composites Science and Technology*. – 65(15-16), 2005. P.2563...2574.
32. Desplentere F., Lomov S.V., Woerdeman D.L., Verpoest I., Wevers M. and Bogdanovich A. Micro-CT Characterization of variability in 3D textile architecture // *Composites Science and Technology*. – 65, 2005. P.1920...1930.
33. Lomov S.V., Ivanov D.S., Truong Chi T., Verpoest I., Baudry F., Vanden Bosche K. and Xie H. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test. *Composites Science and Technology*, in print.
34. Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H., Molimard J. and Vautrin A. Full field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites – *Composites part A*, in print.
35. Koissin V., Ivanov D.S., Lomov S.V. and Verpoest I. Fibre distribution inside yarns of textile composite: geometrical and FE modelling // *Proceedings of the 8th International Conference on Textile Composites (TexComp-8)*. – 2006: Nottingham. p. CD edition.
36. J Xu., Lomov S.V., Verpoest I., Daggumati S.A progressive damage model of textile composites on meso-scale using finite element method: static damage analysis // *Journal of Composite Materials*. – 2014.
37. Jain A., Van Paepegem W., Verpoest I., Lomov S.V. A feasibility study of the Master SN curve approach for short fiber reinforced composites // *International Journal of Fatigue*. – 2016.
38. Micro-scale strain mapping in nano-engineered composites Mehdikhani M., Matveeva A., Aravand M., Brian L.W. // *17th European Conference on Composite Materials*. – 2016.
39. Xu J., Lomov S.V., Verpoest I., Daggumati S. A progressive damage model of textile composites on meso-scale using finite element method: Fatigue damage analysis // *Computers & Structures*. – 2015.
40. Micromechanical modelling of textile composites Bacarreza O., Wen P., Aliabadi M.H., De Carvalho N.V. // *Woven Composites*. – 2015.
41. Yamamoto T., Nishiyama S., Shinya M. Study on weaving method for three-dimensional textile structural composites // *Proceedings of the Fourth Japan International SAMPE Symposium*, 25–28 September, Tokyo, Japan, SAMPE, 1975., P. 655...660.
42. Lomov S.V. et al. Experimental and theoretical characterization of the geometry of flat two- and three-axial braids // *Textile Research J.* – 72(1), 2002. P.706...712.
43. Lundblad W., Dixon C, Olher H. U.S. Patent 5,456,974, 10 October 1995.
44. Ko F., Hartman D. Impact behaviour of 2D and 3D glass-epoxy composites // *SAMPE Journal*. – 22, 1986. P.26...30.
45. Reedy E.D., Guess T.R. Additional comparisons of interlocked fabric and laminated fabric Kevlar 49/epoxy composites // *Journal of Composite Technology and Research*. – 8, 1986. P.163...168.

46. Chou S., Chen H.C., Wu C.C. BMI resin composites reinforced with 3D carbon-fibre fabrics // Composite Science and Technology. – 43, 1992. P.117...128.
47. Voss S., Fahmy A., West H. Impact tolerance of laminated and 3-dimensionally reinforced graphite-epoxy panels. In: Chandra T, Dhingra AK, editors. Advanced composites 93: international conference on advanced composite materials, The Minerals, Metals and Materials Society. – 1993. P.591...596.
48. Billaut F., Roussel O. Impact resistance of 3-D graphite/epoxy composites. In: Portsartip A, Street K, editors. Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials, ICCM-10, Woodhead. – 1995 14–18 August, P. V551–V58.
49. Dickinson L., Mohammed M.H., Klang E. Impact resistance and compression properties of three-dimensional woven carbon/epoxy composites, ECCM-4, 25–28 September, Stuttgart, Germany, Amsterdam: Elsevier. – 1990 P. 659...664.
50. Ding Y.Q., Wenger W., McIlhagger R. Structural characterisation and mechanical properties of 3-D woven composites, European SAMPE. – 1993, P. 1...9.
51. Arendts F.J., Drechsler K., Brandt J. Manufacturing and mechanical performance of composites with 3-D woven fibre reinforcement, A.P. Mouritz et al // Composites: Part A. – 30, 1999. P.1445...1461.
52. Farley G.L., Smith B.T., Maiden J. Compressive response of thick layer composite laminates with through-the-thickness reinforcement // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 11, 1992. P.787...810.
53. Cox B.N., Dadkhah M.S., Morris W.L. On the tensile properties of 3D woven composites // Composites. – 27A, 1996. P.447...458.
54. Mouritz A.P., Bains C., Herszberg I. Mode I interlaminar fracture toughness properties of advanced textile fibreglass composites // Composites. – 30A, 1999. P.859...870.
55. Muller J., Zulliger A., Dorn M. Economic production of composite beams with 3D fabric tapes // Textile Month/ – 1994; September. P.9...13.
56. Wong R. Sandwich construction in the Starship // Proceedings of the 37th International SAMPE Symposium. – 9–12 March. – 1992, P. 186...197.
57. Limmer L., Weissenbach G., Brown D., McIlhagger R., Wallace E. The potential of 3-D woven composites exemplified in a composite component for a lower-leg prosthesis // Composites. – 1996.
58. Pirogov D.A., Evgrafova K.I. Matematicheskoe modelirovanie kvazistaticheskogo protsessa deformirovaniya niti utka pri formirovanii mnogoslonoynoy tkanoy struktury // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2019, №3(381). S.87...92.
59. Kiselev A.M. Razrabotka metodologii proektirovaniya geometricheskikh struktur i prognozirovaniya svoystv tekstil'nykh materialov ob"emnogo stroeniya: Dis. ...dokt.tekhn.nauk. – 2019.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники. Поступила 27.07.21.

УДК 677.047.625
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_71

ПЕРЕРАБОТКА РАСТВОРОВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИЭФИРУРЕТАНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕМБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

PROCESSING OF THERMOPLASTIC POLYETHERETANE SOLUTIONS FOR PRODUCTION OF MEMBRANE MATERIALS

Е.С. БОКОВА, Г.М. КОВАЛЕНКО, Н.В. ЕВСЮКОВА, К.Э. РАЗУМЕЕВ

E.S. BOKOVA, G.M. KOVALENKO, N.V. EVSYUKOVA, K.E. RAZUMEEV

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: bokova-es@rguk.ru; kovalenko-gm@rguk.ru;
evsyukova-nv@rguk.ru; razumeev-keh@rguk.ru

В работе проведены систематические исследования по получению волокнисто-пористых полимерных композиционных материалов. Показана возможность процесса электроформования ультратонких волокон из раствора полиамида с последующей пропиткой нетканых основ растворами термопластичных полиэфируретанов. Исследован процесс формирования

пористой структуры полимерных композиционных материалов в процессе фазового разделения в среде нерастворителя, и доказано образование гетеропорозной структуры без ярко выраженного поверхностного градиентного слоя. Установлено, что полимерные композиционные материалы обладают высокой транспортной активностью по отношению к парам воды. Изучены рецептурно-технологические параметры получения нетканых полотен методом электроформования из растворов термопластичных полиэфируретанов. Реализована технология получения мембранных материалов по технологии Nanospider™. Показано, что наиболее бездефектные волокна (диаметр волокон от 200 до 350 нм) могут быть сформованы из раствора полиэфируретана с концентрацией порядка 15%. Исследованы показатели свойств полученных нетканых мембран, позволяющие прогнозировать возможность их применения в качестве составных элементов пакетных решений, путем комбинации с гидрофильными материалами.

The systematic research on the production of fibrous-porous polymer composite materials was carried out in this work. The possibility of the process of electrospinning ultra-thin fibers from a polyamide solution with subsequent impregnation of nonwoven substrates with solutions of thermoplastic polyether urethanes is shown. The process of porous structure formation of polymer composite materials in the process of phase separation in a non-solvent medium has been investigated, and the formation of a heteroporous structure without a pronounced surface gradient layer has been proved. It was found that polymer composite materials have a high transport activity with respect to water vapor. The prescription and technological parameters of nonwoven fabric production by the method of electrospinning from solutions of thermoplastic polyether urethanes have been studied. The technology for the production of membrane materials using the Nanospider™ technology has been implemented. It has been shown that the most defect-free fibers (fiber diameter from 200 to 350 nm) can be formed from a polyester urethane solution with a concentration of about 15%. The indicators of the properties of the obtained nonwoven membranes are investigated, which make it possible to predict the possibility of their use as the constituent elements of package solutions by combining them with hydrophilic materials.

Ключевые слова: мембраны, волокнисто-пористые полимерные композиционные материалы, полиэфируретаны, электроформование, фазовое разделение, гигиенические свойства.

Keywords: membranes, fibrous-porous polymer composite materials, polyetherurethane, electrospinning, phase separation, hygienic properties.

Введение

Переработка полимеров через растворы является одним из основных методов, используемых для производства волокнисто-пористых полимерных композиционных материалов (ВП ПКМ) различного назначения, структуры и свойств, таких как разделительные мембраны, эффективные сорбенты, полировальные материалы, синтети-

ческая кожа различного назначения, включая материалы, полученные с использованием волокон, полученных по различным технологиям [1], [2].

Популярным методом получения наноразмерных волокон и мембранных материалов из них является технология электроформования. Электроформование (ЭФВ) в качестве современного метода переработки

полимеров получило широкое распространение как технология, позволяющая получать нано- и микроволокнистые структуры с широким диапазоном размера пор, от микро- до субмикро- и наноразмерного ряда, из растворов различных полимеров [6...9].

Из анализа литературных данных, очевидно, что мембранные материалы для одежды и обуви должны обладать рядом специальных свойств, таких как паро- и газопроницаемость, износостойкость, водостойкость, прочность и т.д. Такой комплекс эксплуатационных характеристик может быть обеспечен только путем создания композиционных полимерных материалов.

Цель работы – получение и исследование мембранных материалов на основе нетканых волокнистых полотен, полученных методом электроформования из растворов новых марок термопластичных полиэфируретанов.

Объекты и методы исследования

Для получения нетканого материала методом электроформования использовали: полиэфируретан (ПЭУ) марки Витур ТМ-1413-85 (ООО "НПФ ВИТУР", г. Владимир) - продукт взаимодействия 4,4'- дифенилметандиизоцианата и полиэтиленбутиленгликольадипината при соотношении NCO:ОН, равном 1:1, полученный одностадийным синтезом, среднemasсовая молекулярная масса продукта - 40 кДа. В качестве растворителя для ПЭУ использовали N,N-диметилформамид.

Динамическую вязкость прядильного раствора определяли вискозиметром Brookfield DV-II-Pro (США), удельную объемную электропроводность - с помощью кондуктометра Эксперт-002 (РФ). Исследование структуры нетканых материалов проводили методом электронно-сканирующей микроскопии на приборе РНЕНОМ (США). Изучение структуры мембранных материалов проводили методом низкотемпературной сорбции азота на приборе Gemini VII 2390 фирмы Micromeritics (США).

Результаты и обсуждения

Одним из основных несущих элементов современных мембранных материалов яв-

ляются нетканые волокнистые основы.

В работе для их получения использовали метод электроформования нетканых материалов, как один из возможных способов получения высокопористых структур из широкого круга полимеров, в том числе гидрофильной природы.

В ранее проведенных работах были получены нетканые материалы из растворов ПА 6/66 в спиртоводной смеси [10].

Нетканые полотна были получены капиллярным методом: концентрация раствора полиамида - 15%, вязкость раствора - 0,4 Па·с, электропроводность - 0,11 См/м, напряжение – 30В, объемный расход 30 мл/ч, расстояние между электродами 20 см. Структура сформированного полотна приведена на рис. 1 (микрофотография нетканого материала из раствора ПА 6/66. Увеличение × 2500 раз).

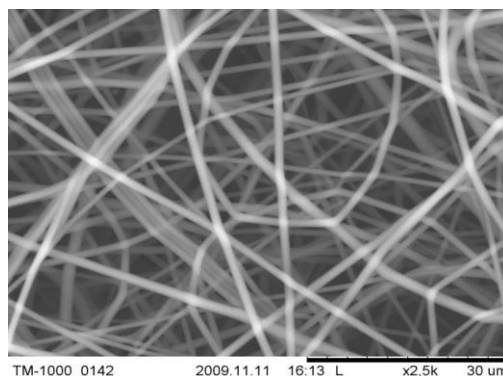


Рис. 1

Диаметр волокон в таком материале составляет от 0,8 до 1,3 мкм. Объемная плотность 100...110 кг/м³, поверхностная 25...30 г/м².

Для импрегнирования нетканых основ применяли 15%-ные растворы ПЭУ марок Витур ТМ-1413-85 и Витур ТМ-0533-90 в ДМФА. В качестве осадительной ванны использовали 30%-ный раствор ДМФА в воде при температуре 20±5°C. Промывку осуществляли в воде при T= 20±5°C, сушку в термокамере при температуре 100±10°C. При выборе температуры фазового разделения исходили из нежелательной усадки гидрофильной нетканой основы на стадиях пропитки и фазового разделения.

На рис. 2 представлены микрофотографии структуры мембранных материалов (а – на основе ПЭУ марки ТМ-0533-90 (увеличение $\times 1500$ раз); б, в – на основе ПЭУ марки ТМ-1413-85 (увеличение $\times 1500$ и 5000 раз соответственно). Состав осадительной ванны 30%-ный раствор ДМФА в воде. Температура фазового разделения - 20°C , температура сушки - 100°C).

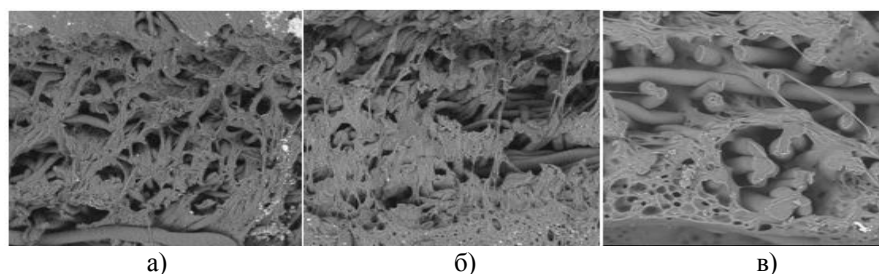


Рис. 2

В табл. 1 приведены показатели свойств волокнисто-пористых полимерных композиционных мембранных материалов на ос-

нове нетканых полотен из ПА-6/66, импрегнированных растворами полиэфируретана.

Таблица 1

Показатели	Мембранный материал на основе Витур ТМ-1413-85	Мембранный материал на основе Витур ТМ-1413-90
Толщина, мм	1,3	1,5
Паропроницаемость, мг/(см ² ·ч)	4,4	5,8
Гигроскопичность, %	10	8,6
Влагоотдача, %	9,8	7,4
Сорбционная емкость, г/г	0,2	0,25
Предел прочности при растяжении, МПа	3,5	4,1
Относительное удлинение при разрыве, %	210	240

Высокие показатели паропроницаемости, гигроскопичности, влагоотдачи синтетических мембранных материалов, полученных в работе, связаны с формированием высокоразвитой открытопористой структуры, включающей микроволокна гидрофильного полимера. Высокие показатели предела прочности при растяжении при малой толщине этих материалов обеспечены большим привесом связующего в экспериментальных синтетических мембранных материалах (до 2 г/г) [10].

Следует отметить, что нетканые материалы не всегда требуют дополнительного импрегнирования и могут быть самостоя-

тельно использованы в качестве мембран при проектировании пакетных решений.

В настоящей работе такие материалы получали по технологии NanospiderTM из раствора полиэфируретана марки Витур ТМ-1413-85. В табл. 2 и на рис. 3 (микрофотографии волокон, полученных методом электроформования из раствора ПЭУ с различными концентрациями: а – 25%, б – 20%, в – 15%. Увеличение $\times 2000$ раз) представлены рецептурно-технологические характеристики процесса электроформования из растворов полиэфируретана марки Витур ТМ-1413-85 различной концентрации.

Таблица 2

Характеристика раствора			Параметры процесса электроформования		Характеристика процесса электроформования	Средний диаметр волокон, нм
C*, %	η^* , Па·с	κ^* , См/м	U*, kV	Q*, см ³ /с		
15	0,4	0,11	19...30	$3,5 \cdot 10^{-4}$	Стабильное электроформование	200...350
20	0,7		26...40		Стабильное формирование с дефектами волокон	300...600
25	1,3		30...47		Нестабильное электроформование	> 600

Примечание. * C – концентрация раствора, η – динамическая вязкость, κ – электропроводность, U – напряжение, Q – объемный расход.

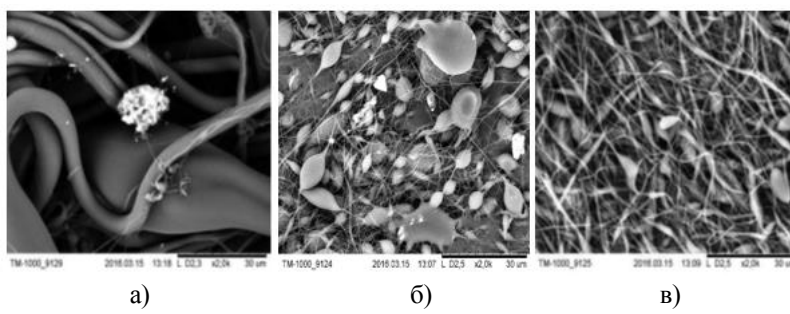


Рис. 3

Анализируя рецептурно-технологические характеристики нетканых материалов, полученных по технологии Nanospider™, можно сделать ряд выводов. Видно, что при уменьшении концентрации полимерного раствора снижается диаметр волокон, а также уменьшается количество дефектов в виде пленок, "груш" и капель. Снижение

диаметра волокон (до 200 нм) и уменьшение интервала распределения волокон по размеру (от 200 до 350 нм) положительно сказывается на процессе массопереноса различных сред (водяной пар, вода) (табл. 3 – показатели гигиенических свойств волокнисто-пористых полимерных композиционных мембранных материалов).

Таблица 3

Показатель	Концентрация прядильного раствора		
	15%	20%	25%
Гигроскопичность, %	0,93	0,7	0,55
Влагоотдача, %	0,93	0,67	0,51
Паропроницаемость, мг/(см ² ·ч)	2,5	1,5	0,75
Сорбционная емкость, г/г	0,04	0,03	0,01

При этом, как и в предыдущей работе, полученные материалы обладают достаточно высоким показателем паропроницаемости, который, главным образом, обеспечивается структурой мембраны, и имеет недостаточно высокие показатели гигроскопичности и сорбционной емкости по отношению к парам воды.

Однако в этом случае, даже без дополнительного импрегнирования, направленного на увеличение гигиеничности мембраны, возможны варианты ее комбинирования с другими материалами, в том числе

полученным в предыдущей работе, что будет являться предметом дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

В работе проведены систематические исследования получения мембранных материалов на нетканой основе, сформированной методом электроформования, из растворов ПЭУ и проведен их сравнительный анализ с ранее полученными неткаными материалами из растворов полиами-

дов. импрегнированных растворами термопластичных полиуретанов.

Разработаны условия получения мембран на основе раствора полиэфируретана марки Витур ТМ-1413-85. Показано, что наиболее бездефектные волокна (диаметр волокон от 200 до 350 нм) могут быть сформованы из раствора полиэфируретана с концентрацией 15%.

Исследованы показатели свойств полученных нетканых мембран, позволяющие прогнозировать возможность их применения в качестве составных элементов пакетных решений, путем комбинации с гидрофильными материалами, в частности, неткаными материалами из растворов полиамида.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В.В., Мchedlishvili Б.В., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // Российские нанотехнологии. – 2008. Т.3, №11-12. С.67...99.
2. http://www.keeptex.ru/dealer/membrany_porelle/. Дата обращения: 21.07.2021
3. Oprea S., Ciobanu C. Effect of the Temperature of Polyurethane Wet-Casting Membrane Formation on the Physico-Mechanical Properties // High Performance Polymers – № 20 (2), 2008. P.208...220.
4. Khil M.S., Cha D.I., Kim H.Y., Kim I.S. and Bhattarai N. Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing. // Journal of Biomedical Materials Research, Part B: Applied Biomaterials – V. 67B, Is. 2, 2003. P.675...679.
5. Yun K.K., Hee Ch., Kim J., Kang T.J. Application of electrospun polyurethane web to breathable water-proof fabrics // Fibers and Polymers. – Vol. 8, Is. 5, 2007. P.564...570.
6. Filatov Y., Budyka A., Kirichenko V. Electrospinning of Micro- and Nanofibers. Fundamentals in Separation and Filtration Processes, New York: Begell House Inc – 2007. 404.
7. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ процесс). – М.: Нефть и Газ, 1997. 297.
8. Bokova E.S., Kovalenko G.M., Rylkova M.V. Electrospinning of fibrous materials from solutions of functionally active water-soluble polymers // Fiber Chemistry. – №46, Is. 4, 2014. P.211...216.

9. Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W., Yong T., Ma Z., Ramaseshan R. Electrospun nanofibers: solving global issues// Materials today. – V. 9, № 3, 2006. P.40...50.

10. Bokova E. S., Kovalenko G. M., Lavrent'ev A.V., Kalinin M.V. Targeted Control of the Structure Formation Process in Production of New Synthetic Leathers // Fibre Chemistry. – Vol. 46, Is.5, 2015. P.312...316.

REFERENCES

1. Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I., Ivanchev S.S., Yaroslavtsev A.B. Membranes and nanotechnologies // Russian nanotechnologies. - 2008. V.3, No. 11-12. P.67...99.
2. http://www.keeptex.ru/dealer/membrany_porelle/. Date of access: 21.07.2021
3. Oprea S., Ciobanu C. Effect of the Temperature of Polyurethane Wet-Casting Membrane Formation on the Physico-Mechanical Properties // High Performance Polymers – № 20 (2), 2008. P.208...220.
4. Khil M.S., Cha D.I., Kim H.Y., Kim I.S. and Bhattarai N. Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing. // Journal of Biomedical Materials Research, Part B: Applied Biomaterials – V. 67B, Is. 2, 2003. P.675...679.
5. Yun K.K., Hee Ch., Kim J., Kang T.J. Application of electrospun polyurethane web to breathable water-proof fabrics // Fibers and Polymers. – Vol. 8, Is. 5, 2007. P.564...570.
6. Filatov Y., Budyka A., Kirichenko V. Electrospinning of Micro- and Nanofibers. Fundamentals in Separation and Filtration Processes, New York: Begell House Inc – 2007. 404.
7. Filatov Yu.N. Electrospinning of fibrous materials (EFV process). - M.: Oil and Gas, 1997. 297.
8. Bokova E.S., Kovalenko G.M., Rylkova M.V. Electrospinning of fibrous materials from solutions of functionally active water-soluble polymers // Fiber Chemistry. – №46, Is. 4, 2014. P.211...216.
9. Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W., Yong T., Ma Z., Ramaseshan R. Electrospun nanofibers: solving global issues// Materials today. – V. 9, № 3, 2006. P.40...50.
10. Bokova E. S., Kovalenko G. M., Lavrent'ev A.V., Kalinin M.V. Targeted Control of the Structure Formation Process in Production of New Synthetic Leathers // Fibre Chemistry. – Vol. 46, Is.5, 2015. P.312...316.

Рекомендована кафедрой химии и технологии полимерных материалов и нанокompозитов. Поступила 14.10.21.

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ 3D-ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ
ДЛЯ КОМПОЗИТОВ В СОСТАВЕ БРОНЕЖИЛЕТА***

**TECHNOLOGY OF FORMING 3D ORTHOGONAL FABRICS
FOR COMPOSITES AS PART OF BULLETPROOF VEST**

А.П. ГРЕЧУХИН, А. ХАБИБУЛЛОВ, П.Н. РУДОВСКИЙ, М.Д. РУДКОВСКИЙ
A.P. GRECHUKHIN, A. KHABIBULLOEV, P.N. RUDOVSKY, M.D. RUDKOVSKIY

(Костромской государственной университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы технологии формирования трехмерных ортогональных тканей для использования в составе средств индивидуальной бронезащиты. Указаны преимущества по сравнению с существующими технологическими решениями. Представлены подходы к виртуальному испытанию композитов на базе трехмерных ортогональных тканей и сравнению их с типовыми материалами. На основе численного моделирования установлено, что использование нити вертикального утка, сопоставимой по линейной плотности с нитями основы, и горизонтального утка улучшило способность ткани гасить кинетическую энергию пули. Подходы к созданию трехмерных текстильных материалов для использования в составе композита или в виде ткани должны отличаться. Для изделия в виде ткани вертикальные нити должны иметь минимальную линейную плотность, а для изделия в виде композита необходимо в дальнейшем определить оптимальное соотношение линейных плотностей нитей за счет более качественного численного моделирования и определить диапазон используемых линейных плотностей пряж для проведения натурных испытаний. Таким образом, на основе численного моделирования свойств 3D-ортогональных тканей возможно создание оптимального по свойствам продукта.

The article deals with the issues of technology for the formation of three-dimensional orthogonal tissues for use in the composition of personal armor protection. Advantages in comparison with existing technological solutions are indicated. Approaches to the virtual testing of composites based on three-dimensional orthogonal fabrics and their comparison with standard materials are presented. Based on numerical modeling, it was found that the use of a vertical weft thread, comparable in linear density with the warp and horizontal weft threads, improved the ability of the fabric to extinguish the kinetic energy of the bullet. Approaches to the creation of three-dimensional textile materials for use as part of a composite or in the form of a fabric should differ. For a product in the form of fabric, vertical threads should have a minimum linear density, and for a product in the form of a composite, it is necessary to further determine the optimal ratio of linear thread densities due to better numerical modeling and determine the range of linear yarn densities used for

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20089, <https://rscf.ru/project/22-29-20089/>

field tests. Thus, based on numerical modeling of the properties of 3D orthogonal fabrics, it is possible to create an optimal product in terms of properties.

Ключевые слова: трехмерная ортогональная ткань, параметры ткани, композит, пуля, 3D-модель ткани, бронезащита.

Keywords: three-dimensional orthogonal fabric, fabric parameters, composite, bullet, 3D model of fabric, armor protection.

Введение

Трехмерные цельнотканые материалы исследуются уже продолжительное время. При этом существует множество обоснований того, почему данные материалы имеют преимущества перед слоистыми изделиями, полученными склеиванием однослойных и многослойных тканей небольшой толщины. В последнее время производители начинают внедрение новых материалов на основе трехмерных тканей, так как двумерные текстильные материалы уже не позволяют добиться существенных преимуществ в прочности и снижении веса. Наиболее известным из таких технических решений являются авиационные двигатели LEAP, в производстве которых используются цельнотканые трехмерные изделия [1].

Более того, существует несколько принципиально различных технологических вариантов создания трехмерных текстильных изделий – классические многослойные ткани, слоисто-каркасные ткани, трехмерные ортогональные ткани и т.д. Поэтому говорить о преимуществах трехмерных тканых материалах надо не просто в контексте 3D-структуры, а в контексте вида нагрузки, типа переплетения и технологии изготовления.

3D-текстильный материал в различном виде (ткань и композит) по-разному работает при нагружении. Например, в исследовании [5] указано на важную роль армирования в третьем направлении на повышение ударной прочности композитного изделия. В то же время в работе [3] делается вывод о том, что нить, формирующая третье направление, гасит только 1 % энергии удара (по лицевой стороне ткани), и она должна быть максимально тонкой.

В отличие от прочих трехмерных текстильных материалов в 3D-ортогональных

тканях нити располагаются практически без изгибов [4]. В результате этого изделия имеют повышенную на 15...20% прочность к ударным воздействиям. Повышение прочности обеспечивается за счет того, что энергия удара или силовое воздействие на материал распространяется на большую площадь [5...9].

В Костромском государственном университете разработана технология формирования 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [10]. В [11] предложены оптимальные параметры заправки станка, а в [12] исследовано влияние параметров заправки на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей. На основе разработанной технологии возможно создание 3D-ортогональных тканей со сложной формой поперечного сечения. При этом нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования. Область применения 3D-ортогональных тканей различна. Поэтому предлагаемую технологию возможно использовать для получения широкого ассортимента изделий различного назначения. Это могут быть средства индивидуальной бронезащиты или конструкционные материалы, в которых 3D-ортогональные ткани используются в качестве армирующего наполнителя. Однако существующие технологические решения для производства таких текстильных изделий имеют ряд недостатков: сложная система перевязки изделия по контуру, невысокая плотность расположения нитей или расположение вертикальных слоев под углом, малая производительность оборудования. При этом нить, которая связывает слои, как правило, имеет низкую линейную плотность.

Целью настоящей работы является разработка технологии формирования 3D-ортогональной ткани для использования в качестве элементов средств индивидуальной бронезащиты, лишенной указанных недостатков.

В представленной работе численными методами анализируются различные варианты изготовления изделий на базе 3D-ортогональных тканей для использования в составе средств индивидуальной бронезащиты.

Методы

Для устранения недостатков технологического процесса разработана новая технология формирования 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [10], которая имеет следующие преимущества:

1. Ортогональные 3D-ткани по предлагаемой технологии обладают большей плотностью расположения слоев нитей по сравнению с существующей технологией.

2. Исключена встречная система нитей при прокладывании вертикальной системы утка – это упрощает конструкцию и позволяет вырабатывать изделия сложного профиля.

3. Расположение механизма прокладки нити в зоне "бердо-ткань" позволяет реализовать технологии создания тканей переменного профиля.

4. По сравнению с прочими 3D-тканями позволяют одновременно прокладывать до 20 уточных нитей одновременно, что существенно повышает производительность оборудования.

Опытный образец оборудования для получения ортогональных 3D-тканей представлен на рис. 1.



Рис. 1

Как отмечалось ранее, линейная плотность нити, формирующей третье направление ткани (связывающая горизонтальные слои), по-разному влияет на способность ткани противостоять ударному воздействию в зависимости от того, в каком виде используется 3D-ортогональное изделие – в виде ткани или в виде композита.

В данной работе проведено сравнение трех вариантов изделий в виде композита с использованием в качестве армирующего наполнителя: многослойного пакета ткани полотняного переплетения (9 слоев) и двух вариантов 3D-ортогональной ткани с различной линейной плотностью нитей вертикального утка.

Наиболее эффективным инструментом для сравнения являются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов и задачу в явной постановке.

Для моделирования использовали параметры нитей, представленные в табл. 1. Принимали материал нити ортотропным. Трансверсальные модули упругости и модули сдвига материала нити принимались на порядок меньше основного модуля упругости [13...15]. Линейная плотность нитей 300 текс, волокнистый состав – арамидное волокно. Основные характеристики нитей соответствуют арамидным волокнам.

Таблица 1

Модули упругости, ГПа	
E_x	140
E_y	14
E_z	14
Модули сдвига, ГПа	
G_{xy}	14
G_{yz}	14
G_{zx}	14
Удлинение при разрыве, %	3,5

Для связующего использовали следующие основные параметры: модуль упругости $E=3$ ГПа, разрывное удлинение $\varepsilon=4\%$, предел прочности при разрушении $\sigma = 120$ МПа, допускаемое напряжение $\sigma = 200$ МПа.

Параметры ткани полотняного переплетения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Линейная плотность пряж	
Основа, текс	300
Уток, текс	300
Плотность слоев по основе, шт/см	10
Плотность слоев горизонтального утка, шт/см	7,4
Поверхностная плотность ткани (9 слоев), кг/м ²	5,022

При построении геометрической 3D-модели ткани – аналога полотняного переплетения – нити основы в поперечном сечении моделировались эллипсами с размерами полуосей 0,15×0,5 мм. Это дает площадь поперечного сечения нити 0,236 мм². Если принять, что нить имеет объемную долю волокна около 90% и плотность 1440 кг/м³, что соответствует арамидным волокнам, то линейная плотность нити составит около 300 текс. Нити утка в поперечном сечении моделировались прямоугольниками с площадью поперечного сечения 0,236 мм². Параметры девятислойной 3D-ортогональной ткани представлены в табл. 3.

Таблица 3

Линейная плотность пряж:	
Основа, текс	300
Горизонтальный уток (в два сложения), текс	150×2
Вертикальный (в два сложения), текс	60×2
Кромка, текс	300
Плотность слоев по основе, шт/см	6,66
Плотность слоев горизонтального утка, шт/см	7,7
Поверхностная плотность (10 слоев), кг/м ²	4,894

Построение 3D-модели ткани – аналога полотняного переплетения – осуществляли следующим образом. Строилась средняя линия нитей. Допускали, что уточные нити выпрямлены полностью, основа их огибает. Поперечное сечение нити представлено в виде эллипса с параметрами, указанными выше. Далее методом экструзии (перемещение поперечного сечения вдоль средней линии нити) получаем твердотельную модель нити. Затем получали совокупность нитей, из которых формировалась твердотельная 3D-модель 3D-ортогональной ткани.

Для моделирования композита с использованием в качестве армирующей основы ткани полотняного переплетения и 3D-ортогональные ткани было использовано упрощение – поперечные сечения нитей были представлены в виде прямоугольников, площадь поперечного сечения составляла 0,236 мм². Это обусловлено тем, что при моделировании связующего пространство вокруг нити требует разбиения на количество элементов, превышающее 60 млн. штук для моделируемого образца 100×100 мм. Для модели ткани, где нити представлены в виде прямоугольников, требуется существенно меньшее количество, 20...30 млн., конечных элементов.

Для расчетов массу пули принимали 6 г и скорость 450 м/с, что соответствует кинетической энергии 607 Дж. Это соответствует ГОСТ 34282–2017 для расчета по классу бронезащиты БР-3 [17].

Для моделирования использовали ПО LS-Dyna. В расчетах использовали упрощенную модель пули MAT_001 (elastic) [16], так как разрушения материала пули от такого малого количества слоев не произойдет. Для нитей выбран материал MAT_221 mat_orthotropic_simplified_damage) [14]. Принимали, что материал нити подчиняется закону Гука. Критерий разрушения материала установлен по предельным значениям деформации в направлении оси материала нити (3,5%). Геометрия, моделирующая нить, разбивалась на конечные элементы гексаэдры, а материал связующего – на тетраэдры. Связующее моделировалось как тело, заполняющее все свободное пространство между нитями.

В эксперименте моделировали ¼ реального образца. Это связано с симметричностью задачи.

Моделировали 3 типа композита – на основе ткани полотняного переплетения, на основе 3D-ортогональной ткани, на основе 3D-ортогональной ткани с увеличенной толщиной нитей вертикального утка (равной линейной плотности нитей основы).

Результат взаимодействия пули и композита на основе 3D-ортогональной ткани и ткани полотняного переплетения представ-

лен на рис. 2 (а – полотно, б – 3D-ортогональная, 10 слоев, в – 3D-ортогональная, 10 слоев (увеличенные вертикальные нити)).

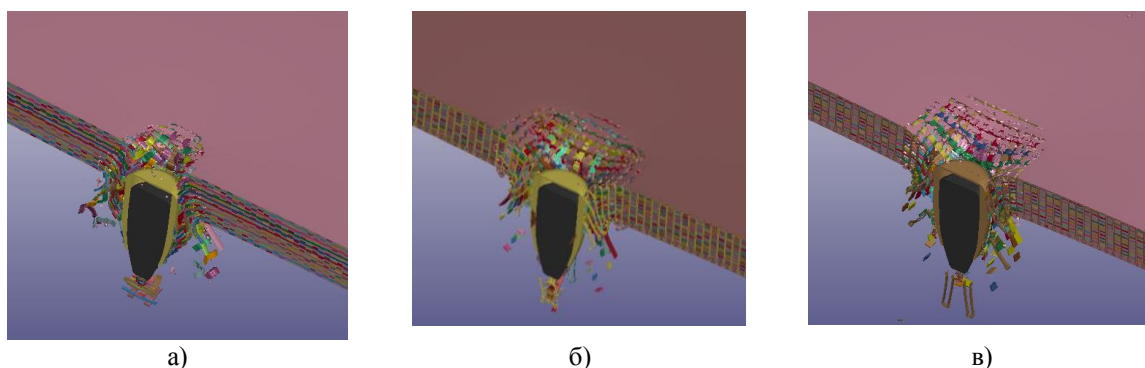


Рис. 2

Результаты и обсуждение

График изменения кинетической энергии пули по времени для изучаемых образцов представлен на рис. 3.

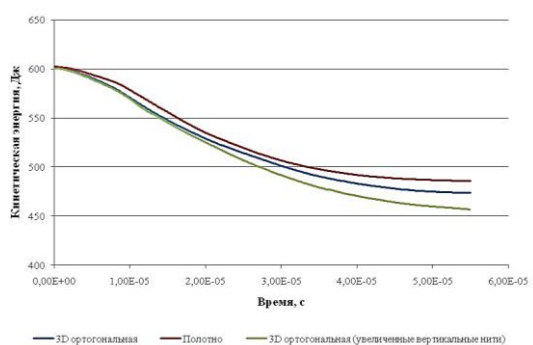


Рис. 3

Через 52 мкс после начала взаимодействия с композитом на основе ткани полотняного переплетения кинетическая энергия пули составила 485,58 Дж, для композита на основе 3D-ортогональной ткани – 473,39 Дж, а для композита на основе 3D-ортогональной ткани с увеличенными вертикальными нитями – 456,74 Дж. При использовании 3D-ортогональных тканей в качестве армирующей основы падение кинетической энергии пули больше на величину от 10 до 23%.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны новые структуры 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования и технология их формирования.

Результат расчета представлен путем совмещения образца вдоль оси симметрии.

2. На основе численного моделирования установлено, что использование нити вертикального утка, сопоставимой по линейной плотности с нитями основы и горизонтального утка, улучшило способность ткани гасить кинетическую энергию пули.

3. Подходы к созданию трехмерных текстильных материалов для использования в составе композита или в виде ткани должны отличаться.

4. Для изделия в виде ткани вертикальные нити утка должны иметь минимальную линейную плотность, а для изделия в виде композита необходимо в дальнейшем определить оптимальное соотношение линейных плотностей нитей за счет более качественного численного моделирования и определить диапазон используемых линейных прядей для проведения натурных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015, № 9. P.75...83.
2. Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – Vol. 1, 2009. P. 1...18.
3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. – Vol. 110, 2011. P.875...889.

4. KadirBilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxial Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving. *Textile Research Journal*. – Vol 80(8)/2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.
5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3Dwoven composites by using different fabric structures // *MaterDes*. – 23(7), 2002. 671...674.
6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, BohongGu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // *Journal of Composite Materials*. – 45(9), 2010. P.965...987.
7. Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. *Non-woven Fabrics*. Intec. – 2016. P. 81...141.
8. Xiwen Jia, Zihui Xia, BohongGu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells / JiaXiwen, Xia Zihui, GuBohong // *International Journal of Damage Mechanics*. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.
9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // *Journal of industrial textiles*. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.
10. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Зайцев Д.В., Тихомиров Л.А. Способ формирования 3D-ортогонального тканого волокнистого материала // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2016, № 6. С. 118...122.
11. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Определение рациональных параметров системы заправки нитей при формировании трехмерного ортогонального тканого волокнистого материала // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2018, № 5. С. 111...115.
12. Ушаков С.Н., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2018, № 6. С.96...100.
13. Dolganina N., Ignatova A., Sapozhnikov B., Shabley A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // *PNRPU Mechanics Bulletin* 4. – 2017. P. 121...137.
14. Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 553, 2014. P.757...762.
15. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts // *Advanced composite materials*. – Vol. 21, 2012. P.177...192.
16. LS-DYNA keyword user`s manual volume II. Material models – Livermore.: Livermore Software Technology Corporation. – 2018.
17. ГОСТ 34282–2017. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2017.
1. Donetskiy K.I., Raskutin A.E., Khilov P.A., Lukyanenko Yu.V., Bellini P.G., Korotygin A.A. Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials (review) // *Proceedings of VIAM*. – 2015, No. 9. P.75...83.
2. Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. – Vol. 1, 2009. P. 1...18.
3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 110, 2011. P.875...889.
4. KadirBilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxial Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving. *Textile Research Journal*. – Vol 80(8)/2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.
5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3Dwoven composites by using different fabric structures // *MaterDes*. – 23(7), 2002. 671...674.
6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, BohongGu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // *Journal of Composite Materials*. – 45(9), 2010. P.965...987.
7. Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. *Non-woven Fabrics*. Intec. – 2016. P. 81...141.
8. Xiwen Jia, Zihui Xia, BohongGu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells / JiaXiwen, Xia Zihui, GuBohong // *International Journal of Damage Mechanics*. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.
9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar epoxy composites // *Journal of industrial textiles*. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.
10. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Zaitsev D.V., Tikhomirov L.A. Method for forming a 3D orthogonal woven fibrous material // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2016, No. 6. P. 118...122.
11. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Determination of rational parameters of the threading system during the formation of a three-dimensional orthogonal woven fibrous material // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, No. 5. P. 111...115.
12. Ushakov S.N., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Influence of the offset value of the horizontal weft layer on the density of vertical layers of threads in the formation of three-dimensional orthogonal fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, No. 6. P.96...100.

13. Dolganina N., Ignatova A., Sapozhnikov B., Shabley A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // PNRPU Mechanics Bulletin 4. – 2017. P. 121...137.

14. Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 553, 2014. P.757...762.

15. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to

ballistic impacts // Advanced composite materials. – Vol. 21, 2012. P.177...192.

16. LS-DYNA keyword user's manual volume II. Material models – Livermore.: Livermore Software Technology Corporation. – 2018.

ГОСТ 34282–2017. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2017.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования тканей и трикотажа. Поступила 08.11.21.

УДК 677.055

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_83

БЕСПРИБОЙНОЕ ТКАЧЕСТВО НА МАШИНАХ КРУГЛОТКАЦКИХ МКТ

SURF-FREE WEAVING ON CIRCULAR WEAVING MACHINES (CWM)

Е.В. ЛАПИН, В.Ю. ЧУНАЕВ, А.Г. ЩУРИК

E.V. LAPIN, V.YU. CHUNAEV, A.G. SHCHURIK

(Акционерное общество "Уральский НИИ композиционных материалов")

(Ural Research Institute of Composite Materials)

E-mail: uniikm@yandex.ru

Ракетно-космическая техника развивается на основе массового и энергетического совершенства и эксплуатационной надежности. Необходимость сохранения свойств в широких диапазонах температур с быстрыми перепадами, на фоне разнообразных механических нагрузок, при их сочетаниях и резких изменениях, требует применения материалов, имеющих уникальные свойства. Создание легких жаростойких композиционных материалов, имеющих высокие характеристики, сохраняющиеся в широком диапазоне температур, велось в "Уральском НИИ композиционных материалов". При разработке и получении объемно армированных изделий из новых композиционных материалов в виде оболочек в качестве наполнителя использовали круглотканые многослойные каркасы. Такие каркасы обеспечивают максимальную межслоевую прочность материала изделий, способствуют снижению опасности появления расслоений и трещин при сочетаниях переменных силовых и температурных воздействий, в особенности в зонах концентраторов напряжений. Процесс изготовления круглотканых многослойных каркасов является труднейшей высокотехнологичной задачей, требующей наличия специальных круглоткацких машин. Такие машины (МКТ) созданы на предприятии. Разработана не имеющая аналогов технология "бесприбойного" ткачества. Паспортизованы новые композиционные материалы на основе круглотканых каркасов. Отработана технология изготовления круглотканых каркасов и заготовок, ведется их серийное производство.

Rocket and space technology is developing on the basis of mass and energy perfection and operational reliability. The need to preserve properties in wide temperature ranges with rapid changes, against the background of various mechanical loads, with their combinations and abrupt changes, requires the use of materials with unique properties. The creation of lightweight heat-resistant composite materials with high characteristics that persist over a wide temperature range was carried out at the Ural Research Institute of Composite Materials. During the development and production of extensively reinforced products from new composite materials in the form of shells, circular-woven multilayer frames were used as a filler. Such frames ensure the maximum interlayer strength of the product material, contribute to reducing the risk of delamination and cracks with combinations of variable force and temperature influences, especially in the areas of stress concentrators. The manufacturing process of circular-woven multilayer frames is the most difficult high-tech task that requires the presence of special circular-weaving machines. Such machines (CWM) are created at the enterprise. A unique technology of "surf-free" weaving has been developed. New composite materials based on round-woven frames have been certified. The technology of manufacturing of circular-woven frames and blanks has been worked out, their serial production is carried out.

Ключевые слова: объемное армирование, ортогональная структура, круглотканый многослойный каркас, машина круглоткацкая, углеродные нити, условный шов, саржевый эффект.

Keywords: three-dimensional reinforcement, orthogonal structure, round-woven multi-layer frame, round-winding machine, carbon filaments, conventional seam, shear effect

Введение

Существуют несколько способов изготовления углеродных волокнистых наполнителей композиционных материалов, в том числе: намотка волокнами, нитями, лентами; выкладка тканями, препрегами; плетение; вязание; ткачество [1...6]. Объемное плетение и объемное вязание технологически и технически сложные и трудоемкие процессы, низок уровень реализации свойств волокон. Главный недостаток намотки и выкладки заключается в отсутствии межслоевых связей, при этом дополнительные операции по созданию таких связей, например, прошивкой, иглопробивным способом, дают далеко не оптимальные результаты. Кардинальное увеличение межслоевой прочности обеспечивает объемно армированный каркас, например, полученный многослойным ткачеством. В объемном армировании зачастую особенно нуждаются композиты в виде оболочек.

Тканые многослойные оболочки впервые стали изготавливать на плоскоткацких

машинах. В России тканые объемно армированные оболочки, например, марок КПЦТЗ, ЦТМЗ, изготавливает предприятие "ТРИ-Д" (ранее подразделение "Всесоюзного научно-исследовательского института синтетических полимерных волокон", где и была создана отечественная технология) [7], [8]. Непрерывным утком формируют одновременно верхнее и нижнее полотна. Полотна раскрывают и формуют на оправках. Наряду с достоинствами (сравнительно низкая трудоемкость изготовления, возможность переработки широкого диапазона видов нитей, в том числе углеродных) оболочки, изготовленные таким способом, имеют принципиальный недостаток – наличие двух ослабленных зон в виде кромочных протяжек утка между полотнами. Подобного недостатка не имеют объемно армированные оболочки, изготовленные на круглоткацких машинах. Уток, прокладываемый в круговой зев, образует на оправке замкнутую ткань без каких-либо кромок. О такой машине известно из патента фирмы

"Монсанто Компани", США [9].

На предприятии "Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов" (АО "УНИИКМ") для изготовления цельнотканых объемно армированных оболочек созданы и производят продукцию машины круглоткацкие (МКТ). В России аналогов не имеется, о действующих в настоящее время иностранных аналогах информации не найдено.

Машины круглоткацкие МКТ

Круглоткацкие машины МКТ предназначены для изготовления оболочек из углеродных нитей, применяемых в качестве наполнителей новых композиционных материал-деталей. Каркасы получили условное название "круглотканые многослойные каркасы" (каркасы КТМК). На круглоткацком производстве предприятия отработано более сотни типоразмеров каркасов КТМК от крупногабаритных, диаметром до 2300 мм, с толщиной стенки до 30 мм, до миниатюрных, с диаметром от 12 мм, с толщиной стенки от 1,5 мм.

В 1983 г. на предприятии был создан экспериментальный стенд машины круглоткацкой ЭС МКТ. После доработки стенд был доведен до полноценной машины круглоткацкой. Машина занимает площадь диаметром около 17 м. Устройство зевобразования включает 8 механических жаккардовых механизмов зевобразования JNS 4820. Шпулярники вмещают 36 тысяч паковок с нитями основы.

С целью расширения технологических возможностей по габаритам изготавливаемых каркасов КТМК на предприятии была разработана и введена в эксплуатацию опытная машина круглоткацкая МКТ-250. Машина занимает площадь диаметром около 24 метров. Устройство зевобразования включает 16 механических жаккардовых механизмов зевобразования JNS 4820. Шпулярники вмещают 61 тысячу паковок с нитями основы.

В соответствии с возросшими потребностями в 2013 г. на предприятии была создана машина круглоткацкая МКТ-150. Машина является промышленной с возможностью тиражирования.

Устройство зевобразования состоит из 8 механизмов зевобразования МЗО с электронным программированием и управлением. Для катушек с нитями основы предусмотрено 24 шпулярника (одно-, двух- и трехсекционных, в зависимости от исполнения машины).

Машина разработана в трех исполнениях:

Базовое исполнение. Диаметр машины составляет 16 метров. Шпулярники вмещают около 36 тысяч паковок с нитями основы.

Исполнение -01: диаметр машины составляет 12 метров, шпулярники вмещают около 18 тысяч паковок с нитями основы.

Исполнение -02: диаметр машины составляет 20 метров, шпулярники вмещают около 55 тысяч паковок с нитями основы.

Введенная на предприятии в эксплуатацию машина МКТ-150 выполнена в базовом исполнении (рис. 1). Все машины МКТ в настоящее время производят продукцию, в том числе серийную. Характеристики машин МКТ обобщены в табл. 1.



Рис. 1

Основные узлы и механизмы машин МКТ

Остов машины образует многоуровневые зоны размещения узлов и механизмов машины. Основой остова является единый силовой каркас (станина). Станина установлена на опорах, закрепленных на усиленном железобетонном фундаменте. Остов включает опоры, стойки, площадки, переходы, лестницы, ограждения.

Машина	Занимаемая площадь (диаметр), м	Масса, т	Установленная мощность, кВт	Количество механизмов зевобразования	Количество шпуляриков	Суммарная емкость шпуляриков, катушек	Максимальные габариты оболочек, диаметр/толщина, мм
ЭС МКТ	17	80	80	8	24	36864	1500/30
МКТ-250	24	180	280	16	32	61440	2500/30
МКТ-150	16	100	60	8	24	36864	1500/30
-01	12	80	40	8	24	18432	750/30
-02	20	120	80	8	24	55296	2200/30

Механизмы зевобразования. На машинах ЭС МКТ и МКТ-250 в устройстве зевобразования применены механические зевобразующие жаккардовые механизмы JNS 4820.

В устройстве зевобразования машины круглоткачкой МКТ-150 применены механизмы МЗО собственной разработки (рис. 2) [10].



Рис. 2

Зевобразующий механизм МЗО выполнен с электронным программированием и управлением на основе контроллера, создан по аналогии с современными зевобразующими каретками. Механизм МЗО оснащен устройством отбора подвязей (задание количества рабочих нитей основы с возможностью ввода-вывода нитей основы). Механизм МЗО выполнен с открытым типом зева, с регулируемой высотой до 380 мм. Механизм МЗО включает три секции по 432 подвязи в каждой (18 ножей, по 24 крючка на каждом ноже). Контроллер, через сенсорный дисплей на щите управления, обеспечивает задание новых и запуск имеющихся в памяти программ зевобразо-

вания, задание всего необходимого комплекса команд, контроль и отражение текущей информации о выполнении, показывает информацию об отказах. Имеется возможность применения механизма МЗО на тихоходных плоскоткачных машинах, изготавливающих объемно армированные оболочки, в том числе сложного профиля.

Шпулярики. Установлены по периметру, вокруг центральной зоны машины. Предназначены для размещения паковок (катушек) с нитями основы для обеспечения непрерывной подачи нитей основы к оправке, на которую нарабатывается оболочка. Каждая катушка имеет фрикционное тормозное устройство, обеспечивающее задание натяжения нити в пределах от 30 до 300 г. Катушки размещаются на валах шпулярика по несколько штук. Валы расположены по рядам и по ярусам. Привод шпулярика обеспечивает вращение валов с заданной скоростью в заданный отрезок времени, чем обеспечивает отвод нитей основы из нитетрактв и создает нитям основы заданное натяжение.

Устройство перемещения оправки Предназначено для фиксирования оправки и осевого ее перемещения. Оправка перемещается циклично на заданную величину с точностью до 0,1 мм, через заданное количество оборотов челнока, в соответствии со скоростью наработки ткани.

Челнок. Прокладывает в образуемый из нитей основы круговой зев одну, две или три уточных нити, которые собственным натяжением прибивают нити основы к оправке и уплотняют опушку ткани. Ширителями, установленными на челноке, оптимизируется (увеличивается) угол зева, а

также создается провис нитей основы, чем уменьшается и калибруется их натяжение.

Направляющая челнока. Предназначена для обеспечения кругового движения челнока вокруг оправки. Челнок принудительно перемещается по роликам с заданной скоростью с обеспечением заданных параметры разгона и торможения. В состав направляющей входит зубчатое колесо. Диаметры делительных окружностей колес составляют для ЭС МКТ и МКТ-150 около 4 м, для МКТ-250 около 7 м. Колесо является промежуточным звеном передачи движения челноку от электроприводов. Вращение зубчатого колеса осуществляется от двух электроприводов через валы-шестерни. Челнок, имеющий зубчатый сектор, перемещается синхронно с колесом с помощью валов-шестерней.

Бесприбойное ткачество

Формирование многослойной ткани на машинах круглоткацких МКТ производится по вновь разработанному способу "бесприбойного" ткачества [11]. Круглотканую многослойную оболочку формируют на наружной поверхности оправки, определяющей внутреннюю поверхность оболочки. Нити основы подаются к оправке со шпуляриков радиально в горизонтальной плоскости. Между верхним и нижним настилами кругового зева, последовательно образуемого из нитей основы зевобразующим устройством, состоящим из нескольких механизмов зевобразования, принудительно движется челнок, прокладывая непрерывные нити утка по огибающей оправку траектории. Способ неприбойного ткачества основан на прибое утка и уплотнении опушки ткани только за счет натяжения нитей утка без применения каких-либо устройств прибое утка и уплотнения опушки ткани.

На машинах МКТ возможно формирование гаммы переплетений, основной из которых являются ортогональная. Ортогональные структуры обеспечивают армирование каркаса нитями в направлениях цилиндрической декартовой системы координат ("аксиально-радиально-окружное армирование").

Порядок прокладывания утка и условный шов. На машинах МКТ возможно применение двух челноков. Такая технология отработана при изготовлении "двухполотенных" оболочек, сформированных из отличающихся нитей основы и утка. В настоящее время на машинах применяется один челнок (двухполотенные каркасы применения не нашли). При формировании каркаса одним челноком используются две схемы прокладывания утка, так называемые, "порядок N" и "порядок П" (рис. 3).

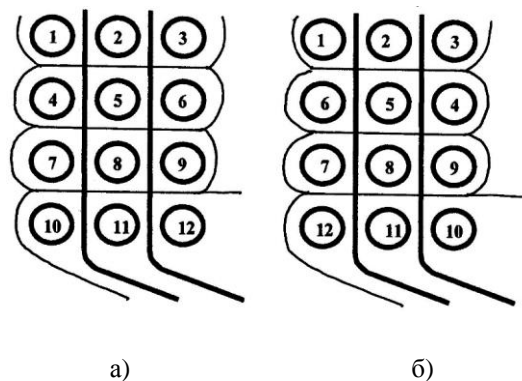


Рис. 3

При порядке N прокладывание витков утка по толщине начинается всегда от внутренней поверхности каркаса к наружной. Порядок N способствует получению ровной наружной поверхности каркаса. Это обеспечивается тем, что каждый из последующих уточных витков опирается на предыдущий и соответственно на оправку. Недостатком такого способа является переход утка из наружного сразу же во внутренний слой. Таким порядком предпочтительнее набивать каркасы, имеющие до трех уточных слоев по толщине. На каркасах, имеющих по толщине более трех уточных слоев, порядок N практически невозможен, так как в зоне перехода утка из наружного во внутренний слой образуется существенное искривление структуры, обусловленное значительным натяжением утка. При порядке П прокладывание витков утка производится последовательно от внутренней поверхности каркаса к наружной и наоборот. Применение порядка П возможно для изготовления каркасов с любым количеством слоев, но в этом случае

накладываются ограничения по натяжению утка, так как при прокладывании витков утка от наружной поверхности к внутренней они удерживаются только нитями основы. Такой порядок прокладывания уточных витков обеспечивает наличие так называемой "силовой ступени". Данная силовая ступень способна удержать уток фактически в одном месте опушки ткани при его натяжении в интервале от F_{\min} до F_{\max} (рис. 4).

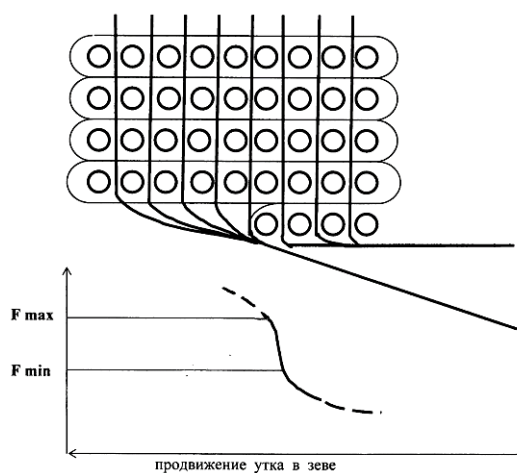


Рис. 4

При превышении утком F_{\max} произойдет необратимое искажение структуры из-за того, что утки, преодолев силовую ступень, сдвинут нити основы к оправке. В противном случае произойдет спонтанное увеличение толщины каркаса. Плавное изменение натяжения утка в пределах силовой ступени ведет к плавному изменению толщины каркаса без каких-либо сбоев структуры ткани. Повышенные требования при порядке II предъявляются к натяжению нитей основы.

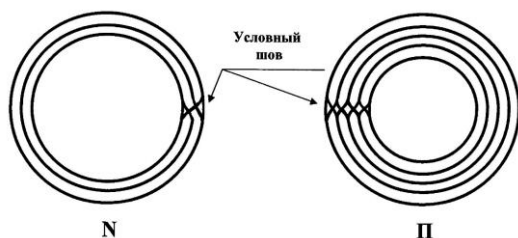


Рис. 5

Переход утка из слоя в слой происходит в зоне между зонами нитей основы первого

и последнего по порядку срабатывания механизмов зевобразования, может проявиться в виде небольшого рубчика и разряжения нитей основы, так называемого "условного шва" (рис. 5). Зона разряжения имеет тенденцию увеличиваться. Если не применять никаких мер, то ширина такого разряжения может достигать нескольких миллиметров, а у крупногабаритных каркасов – сантиметров.

Отработана технология устранения условного шва. На машинах МКТ установлены несколько механизмов зевобразования. Это дает возможность равномерно разносить условный шов между зонами этих механизмов. Для этого достаточно менять ведущий механизм зевобразования, что осуществляется повтором зева на этом механизме. Далее он становится последним в порядке формирования зева, а бывший последний становится ведущим. Место возможного условного шва переводится в соседнюю зону. Смену ведущего механизма зевобразования целесообразно производить через некоторое количество уточных настилов, при формировании которых условный шов не успевает значительно проявиться.

При смене ведущего механизма зевобразования уток в повторяющемся зеве сдвигается, из-за чего необходимо выбрать зев, при котором двойной уток окажется в месте, где не приведет к отрицательным последствиям.

Параметры армирования каркасов КТМК

Каркас ортогональной структуры многослойной ткани обеспечивает армирование в трех направлениях: в направлении образующей поверхности (z); в радиальном направлении (x); в кольцевом направлении (y). Название "многослойная" ткань – условное. Деление на слои также условное. Слой подразумевает ряд однонаправленных нитей.

Можно условно выделить следующие слои:

- слои в плоскостях zy – слои основы наполнительной, чередующиеся с уточными слоями (расположенные параллельно поверхностям каркаса, условно названы

"слоями");

- слои в плоскостях xy – слои основы перевязочной, чередующиеся с уточными слоями (расположенные в плоскостях, перпендикулярных к оси каркаса, условно названы "настилами");

- слои в плоскостях xz – слои основы наполнительной, чередующиеся со слоями основы перевязочной (расположенные радиально к оси и в направлении оси каркаса условно названы "пластами").

Плотностными характеристиками круглотканого многослойного каркаса являются плотности армирования по направлениям. Плотность армирования, характеризуется количеством однонаправленных нитей, расположенных перпендикулярно единице площади сечения (обычно, квадратному сантиметру):

- в направлении образующей (z) " P_o " (основы наполнительной);

- в кольцевом направлении (y) " P_k " (утков);

- в радиальном направлении (x) " P_p " (основы перевязочной).

Расчет плотностей армирования по направлениям:

$$P_o = P_x \cdot P_y ;$$

$$P_k = P_x \cdot P_z ;$$

$$P_p = P_y \cdot P_z ,$$

где P_x – плотность утков, а также наполнительной основы в радиальном (x) направлении, рассчитывается делением толщины (см) на количество слоев данного локального участка каркаса; P_y – плотность перевязочной основы, а также наполнительной основы в кольцевом (y) направлении, подсчитывается визуально; P_z – плотность утков, а также перевязочной основы в направлении образующей (z), подсчитывается визуально.

Толщина каркаса определяется в процессе наработки каркаса замером толщины опушки. Возможен замер проколом. Такие замеры применяют обычно при возникшей необходимости проведения контрольного замера толщины в готовом каркасе. Плотности нитей наполнительных и перевязочных нитей основы выполняются гарантиро-

ванно, так как задаются количеством рабочих нитей основы в механизмах зевообразования.

На образцах плотность армирования по направлениям может быть определена простым подсчетом количества нитей в каждом из направлений. Плотность каркаса может быть определена расчетом общей длины нитей L_o, L_k, L_p в 1 см^3 . Тогда плотность каркаса γ (масса единицы объема) в месте выреза испытуемого образца определяется в г/см^3 с учетом линейной плотности (текс) каждой из армирующих нитей по соотношению:

$$\gamma = \frac{T_o \cdot L_o + T_k \cdot L_k + T_p \cdot L_p}{100000} ,$$

где T_o, T_k, T_p – линейные плотности нитей трех направлений армирования.

Каркасы КТМК отличаются очень высокой плотностью армирования. Например, могут превосходить по плотности аналогичные плоскотканые каркасы до полутора раз. При изготовлении новых композиционных заготовок из углеродных нитей уплотнения каркасов КТМК практически не требуется. Прессование обычно применяется в минимальной степени для получения качественных поверхностей с усилием не более 8 кг/см^2 [12]. Вследствие этого в заготовке сохраняется высокое качество армирования, в особенности в кольцевом направлении.

Для волокон одинакового круглого сечения предельная степень заполнения объема каркаса волокнами (μ) возможна при параллельной укладке волокон в гексагональном (треугольном) порядке. В этом случае $\mu = 0,907$. При таких же условиях, но при прямоугольной укладке волокон $\mu = 0,785$. Для ортогональных структур ("ЗД") степень армирования значительно ниже. При условии одинакового круглого сечения нитей всех направлений армирования, при касании нитей $\mu \approx 0,47$ (даже при гексагональном расположении волокон в нитях). При прямоугольном сечении нитей (максимальная степень уплотнения структуры) $\mu \approx 0,60$. Если сечение нитей будет приближено к квадратному, то каждое из направлений армирования составит по 20%

объема [13]. Зная плотности армирования нитями по направлениям, можно приближенно рассчитать прочностные характеристики материала по каждому из направлений.

Осевое направление армирования Плотность нитей основы в слое определяется заданным количеством рабочих нитей (подвязей) в механизмах зевобразования. При проектировании каркаса КТМК обычно ориентируются на "теоретическую" плотность для нитей основы в слое (нити имеют круглое сечение и касаются друг друга). В расчете диаметры нитей устанавливают по их линейным плотностям с применением расчетных коэффициентов, каждый из которых соответствует конкретному материалу [14]. При отсутствии расчетного коэффициента для конкретной нити обычно применяют простой замер диаметра (без нажима) после максимальной подкрутки нити. В процессе обработки плотность оптимизируют обычно в пределах до 130 % от теоретической.

В процессе обработки технологии изготовления средне- и крупногабаритных каркасов применялись нити линейных плотностей от 600 до 2400 текс. Лучшие комплексные показатели осевого армирования каркасов получены с нитью линейной плотности 1200 текс. В качестве примера можно сравнить осевую прочность на растяжение при нитях с линейными плотностями 600 и 1200 текс. Так, при нитях с линейной плотностью 600 текс в конечном материале достигнута осевая прочность на растяжение 40÷50 МПа. При нитях с линейной плотностью 1200 текс эта же характеристика составляет 70÷90 МПа. Нити больших линейных плотностей ведут не редко к неудовлетворительной анизотропности материалов.

Применение нитей малых линейных плотностей оправдано при изготовлении малогабаритных каркасов с малыми толщинами. Так, при изготовлении миниатюрных каркасов оживальной формы, с внутренними диаметрами от 12 до 150 мм, с толщинами стенки от 1,5 до 3,5 мм, успешно применялись нити с линейной плотностью 200 текс. Следует подчеркнуть, что уменьшение диаметра нитей увеличивает трудоем-

кость изготовления каркаса (количество оборотов челнока) в квадратичной зависимости, что существенно отражается на производительности тихоходных машин, которыми являются машины МКТ (скорость челнока до 6 оборотов в минуту). При снижении линейной плотности наполнительной основы для той же толщины каркаса требуется большее количество слоев, что ухудшает качество каркасов – увеличивается волнистость наружной поверхности. Существенно также (в квадратичной зависимости, при снижении линейной плотности) увеличивается количество нитей основы, участвующих в процессе ткачества, что повышает обрывность, и соответственно увеличивает технологические расходы.

Кольцевое направление армирования Кольцевое направление армирования в каркасах КТМК формирует уток. Значительно натянутый уток образует концентричные витки. За счет этого в кольцевом направлении достигается максимальная степень реализации свойств волокон. Существенное влияние на кольцевую прочность оказывает также и то, что в качестве нитей утка обычно применяют углеродные высокопрочные нити (жгуты) УКН. Применение нитей УКН обусловлено необходимостью поддержания высокого натяжения нитей утка. Так, при изготовлении крупногабаритных каркасов натяжение нити утка может достигать до десяти килограммов. В настоящее время при формировании крупногабаритных каркасов диаметром более 1500 мм другие углеродные нити практически не используются, либо из-за недостаточной прочности, либо из-за недопустимых текстильных свойств. В зев одновременно вводятся до трех нитей утка. При формировании средне- и крупногабаритных каркасов применение в качестве утка единичной уточной нити не практикуется, так как в случае ее обрыва могут произойти необратимые деформации структуры.

Радиальное направление армирования Для деталей из новых углеродных композиционных материалов на основе каркасов КТМК повышенные требования зачастую предъявляют к прочностным свойствам

осевого и кольцевого направлений. Повышение их можно осуществить за счет уменьшения доли радиального армирования, если к межслоевой прочности требования не слишком велики. Оработаны и испытаны детали с армированием в радиальном направлении до 4% от массы каркаса. Применены перевязочные нити основы минимальной для машин МКТ линейной плотности, при этом количество перевязочных нитей может быть снижено в два раза (при шахматном порядке перевязки).

Получить максимальные прочностные свойства материалов на основе каркасов КТМК в осевом и кольцевом направлении позволило применение углеродных нитей утка и наполнительной основы с линейной плотностью 1200 текс и перевязочной основы с линейной плотностью 200 текс. Результаты такого армирования радиального направления в каркасах КТМК сопоставимы с известными положительными результатами испытаний аналогичных углеродных деталей французской фирмой Snesta. При достижении плотности радиального армирования до 3% в изделиях из углеродной ткани иглопробивным методом они получили заметный и достаточный прирост прочности на сдвиг в сравнении с двумерным каркасом.

Коэффициент смятия, плотностные параметры. Геометрическое состояние сечения нитей в каркасе показывает так называемые "коэффициенты смятия" нитей. Для многослойных тканей, в том числе для круглотканых каркасов, рассматриваются коэффициенты смятия в радиальном направлении $K_{см}^r$ (по толщине), в осевом направлении $K_{см}^o$ (по длине), в кольцевом направлении $K_{см}^k$ (по ширине). В качестве расчетной базы можно применить теоретическую плотность, когда подразумевается, что все нити ткани имеют круглое сечение и касаются соседних нитей. При этом коэффициенты смятия принимаются равными единице. В этом случае шаги армирования всех направлений (расстояние между центрами соседних нитей каждой из систем ткани) также приняты теоретическими. Коэффициент смятия рассчитывается как отношение теоретического шага армирования

к шагу армирования фактическому. Если сечение нитей приобретает овальную форму, вытянутую по данному направлению армирования, либо между нитями имеются зазоры, то коэффициент смятия в этом направлении меньше единицы. Соответственно шаг армирования в данном направлении больше теоретического. При превышении коэффициентом смятия единицы шаг армирования в данном направлении меньше теоретического. При увеличении коэффициента смятия во всех направлениях выше единицы сечение нитей приближается к квадратному, повышается плотность армирования. Коэффициент смятия зависит от величины натяжения утка, от натяжения нитей основы, от плотности нитей основы в слое, прочих технологических параметров.

Плотность нитей в кольцевом направлении задается с учетом их диаметров. Для каркасов КТМК в кольцевом направлении коэффициент смятия обычно варьируется до 1,3. За счет изменения коэффициента смятия в кольцевом направлении в процессе наработки каркаса имеется возможность изменения толщины каркаса, в том числе плавного.

Плотностные характеристики каркасов КТМК в осевом направлении зависят от уровня уплотнения слоев в опушке ткани. Это обусловлено тем, что на круглоткацких машинах МКТ уплотнение опушки ткани производится непосредственно утком, за счет его натяжения, в отличие от плоскоткацких машин, где плотность по утку и по основе формируется бердом (номером берда задается плотность по основе), который также прибавляет уток в опушке ткани, и товарным регулятором, который обеспечивает заданную скорость отвода ткани из зоны формирования, и этим формирует плотность утка.

Геометрические параметры каркаса

Толщина каркаса. Толщина каркаса КТМК задается количеством слоев, линейными плотностями нитей основы и реализованным коэффициентом смятия в радиальном направлении. Деталь с переменной толщиной можно изготовить из равнотолщинной заготовки механической обработ-

кой. Детали сложного профиля изготавливают именно так. При этом допускаются существенные отходы дорогостоящего сырья, повышенная трудоемкость на изготовление каркаса и композита. Обычно изменения толщин деталей достаточно просты и могут быть заложены уже на стадии изготовления каркаса. При изготовлении каркаса переменной толщины применяют различные способы изменения толщины.

Отработан ступенчатый способ изменения толщины. Ступенчатое изменение толщины производится изменением количества слоев по толщине со стороны наружной поверхности выводом (вводом) системы (систем) нитей основы и устранением (добавлением) утка соответствующего слоя (слоев).

При ступенчатом изменении в сторону увеличения толщины обычно производится ввод по одному слою. Ступенчатое изменение в сторону уменьшения толщины можно производить выводом как поочередно каждого из слоев, так и одновременным выводом нескольких слоев. Минимальная высота ступени равна толщине одного слоя.

При ступенчатом уменьшении толщины на несколько слоев одновременно выводится такое же количество систем (слоев) нитей основы, количество утков по толщине уменьшается на такое же количество. Когда требуется сглаживание ступеньки, у каркасов ортогональной структуры можно разделить данную операцию на два этапа. Сначала, например, убирают наружный точный слой без вывода системы нитей наполнительной основы. При этом в наружном слое соединяются две системы наполнительных нитей основы. Нити основы наружной наполнительной основы выводят из каркаса через заданное количество настилов.

При незначительных изменениях толщины каркаса применяется способ плавного изменения толщины за счет коэффициента смятия, например, изменением плотности нитей в слое или простым изменением натяжения утка. Величина изменения толщины в данном случае зависит от пределов возможностей по коэффициенту смятия, а также от прочностных свойств

точных нитей. В небольших пределах изменять толщину возможно другими технологическими параметрами процесса ткачества, например, снижением натяжения нитей основы. Изменение толщины каркасов КТМК такими способами возможно приблизительно до 30%. Способы изменения толщин каркасов КТМК обычно совмещают.

Плотностные вводы-выводы нитей основы. Для поддержания плотности армирования и толщин каркасов КТМК с изменяемым диаметром возникает необходимость ввода-вывода дополнительных нитей основы (плотностные вводы-выводы нитей). Для предотвращения скачков плотности локальных участков каркаса плотностные вводы-выводы равномерно разносят по окружности и по длине каркаса. Несколько механизмов зевобразования на машине и наличие на каждом из них секторов позволяет осуществлять вводы-выводы достаточно равномерно. Вводы-выводы осуществляются поочередно на секциях, придерживаясь диаметрального порядка. Такие вводы-выводы возможны при небольших углах конусности каркаса. При больших углах конусности вводы-выводы рекомендуется производить одновременно на двух диаметрально расположенных или на нескольких равномерно разнесенных секциях.

На каркасах с большим количеством слоев одновременный ввод-вывод всех нитей по толщине может привести к локальному нежелательному изменению плотности и толщины, а также к раздвижке нитей в структуре ткани. В этом случае производится поэтапный ввод нитей основы по толщине. Оптимальным является ввод по одной нити основы, начиная с внутреннего слоя, в каждом соседнем настиле. Однако для такого ввода, при большом угле конуса, может не хватить количества настилов в каркасе. В этом случае производится одновременный ввод двух, или нескольких нитей основы в один настил.

Волнистость наружной поверхности каркаса. Каркас нарабатывается на оправке, задающей его внутреннюю поверхность. Волнистость внутренней по-

верхности каркаса при наработке не допускается. Волнистость наружной поверхности каркаса в большей или в меньшей степени присутствует на всех каркасах КТМК. Волнистость тем больше, чем больше слоев в каркасе, причем в прогрессирующей зависимости. На волнистость каркаса оказывают влияние многие факторы, важнейшим из которых является натяжение утка. За время отработки технологии изготовления каркасов КТМК принципиально изменился подход к регулировке натяжения утка. Изначально отработывалась версия о необходимости максимально точного поддержания натяжения утка. Для этого были проведены работы по созданию электрического натяжного устройства. Попытки получить качественный каркас с помощью точного поддержания натяжения успеха не имели. Это можно объяснить невозможностью одновременного учета всех факторов, влияющих на процесс структурообразования: точность позиционирования опушки, скоростные режимы, диаметр уточных витков, толщина каркаса и многие другие, даже температура и влажность. Причем при изменении диаметра каркаса его натяжение необходимо также изменять, и при этом для разных типоразмеров каркасов алгоритм изменений сугубо индивидуален. Фактически равномерность толщины зависит от равновесного состояния всех элементов системы, участвующих в формировании каркаса. Любые отклонения от равновесия системы ведут к изменению толщины. С использованием натяжения утка, как инструмента в поддержании равновесия системы, был отработан способ, основанный на принципе поддержания номинальной толщины каркаса. Способ заключается в изменении натяжения утка в зависимости от фактической толщины опушки каркаса, для чего устанавливается номинальная толщина каркаса с двусторонними допусками. Контроль толщины опушки каркаса производится непрерывно. Если толщина каркаса становится больше номинальной, натяжение утка увеличивают. В противном случае – уменьшают. Это производится в пределах допустимой волнистости наружной поверхности.

Изменения каркаса в процессе жизненного цикла. При наработке на оправке у каркаса формируются первоначальные геометрические размеры и до съема с оправки остаются неизменными. После съема происходят релаксационные изменения. Увеличиваются длина и толщина. Через несколько суток релаксационные изменения прекращаются. Впоследствии каркас уплотняют или снаружи, или изнутри. Для плотной посадки каркаса на формообразующую оправку оправка для наработки каркаса подгоняется на величину релаксации каркаса. Последующий передел возможен без съема каркаса с оправки. В этом случае релаксация каркаса исключается.

Обрывность нитей основы и утка
Восстановление целостности основы и утка является первостепенной задачей для традиционного ткачества. Отсутствие одной нити в ткани зачастую считается браком. Контроль обрывности нитей основы и утка уделяется особое внимание. Для этого плоские ткацкие машины оборудованы устройствами автоматического останова при обрыве каждой из нитей основы и утка. Для машин МКТ устройства автоматического останова при обрыве каждой из нитей основы разрабатывались, но применения не нашли. Отсутствие некоторого рассредоточенного количества отсутствующих нитей основы (из нескольких тысяч) фактически не влияет на прочностные свойства. Останавливать машину для восстановления каждого обрыва нити основы нецелесообразно. Оработка технологического процесса изготовления каркасов показала достаточность визуального контроля обрывности работниками, обслуживающими центральную зону машины. При этом для каркасов устанавливается индивидуальный допуск пропусков (обрывности) нитей основы. Обычно предел допуска на обрывность нитей основы не превышает 3 % от количества рабочих нитей основы по рассредоточенным зонам, например, для каждого из шпулярников в отдельности, с запретом концентрации, например, одновременного отсутствия соседних нитей.

При обрыве нити утка автоматический останов челнока не требуется, так как на

машинах МКТ нити утка находятся под постоянным контролем работников, обслуживающих центральную зону машины, имеющих возможность быстрого ручного останова. Челнок движется со скоростью до шести оборотов в минуту и для останова челнока при обрыве нити утка вполне достаточно времени. При ликвидации обрыва целостность уточной нити восстанавливается.

Формование заготовок не круглого сечения. На машинах МКТ, за редким исключением, изготавливают каркасы КТМК в виде тел вращения. При последующих переделах имеется возможность получения заготовок, отличных от тел вращения. Формирование заданного сечения выполняется на формообразующих оправках. При этом внутренний диаметр каркаса на соответствующем уровне должен быть равен периметру желаемого профиля. Недостатком здесь является возможность появления заломов ткани, так как соответствие диаметра и периметра касается только внутренней поверхности каркаса. Более толстые каркасы подвержены этому в большей степени.

Толстостенные каркасы. На предприятии разработан способ получения каркаса с толщиной стенки, существенно превосходящей возможности заправочного количества нитей основы. Способ основан на возможности изготовления, так называемых, "ребристых" полотен, имеющих кольцевые выступы на поверхностях. При этом способе ребристые структуры нарабатывают друг на друга [15]. Выступы последующего полотна входят в углубления предыдущего полотна. Большое натяжение утка способствует заполнению углублений практически без пустот. Такой каркас, без разрезки, фактически является цельнотканым. Соединение ребристых поверхностей в композите не уступает межслойным сдвиговым характеристикам цельнотканого каркаса. Толщина одного полотна в данном случае устанавливается с учетом качества, производительности, оптимального количества рабочих нитей основы. Ограничения по толщине и по размерам накладывают только возможности центральной зоны машины МКТ.

Каркасы с кольцевыми ребрами и фланцами

На машинах МКТ возможна горизонтальная наработка каркаса, когда формирование ткани осуществляется от оправки в радиальном направлении. Это дает возможность наработки кольцевых ребер, монолитно связанных с каркасом КТМК. Для этого из каркаса в зоне планируемого ребра выводятся нити основы, из которых и формируют ребро. При дальнейшей наработке каркаса выведенные нити вводятся обратно. Таким образом, возможно формирование нескольких ребер на одном каркасе. Можно перед зоной ребра произвести ввод в каркас дополнительных нитей основы, которые в зоне ребра выводятся из каркаса [16].

Возможно формирование ребра у торца каркаса. В этом случае получается фланец. При необходимости посадки каркаса с фланцем на формообразующую оправку имеется возможность сохранения у торца каркаса части наполнительных нитей основы с целью использования их в натяжных приспособлениях [17].

При необходимости производят аппретирование ребер. Но обычно они имеют достаточную жесткость, которая позволяет производить последующие переделы без аппретирования или других дополнительных мероприятий.

Каркасы с саржевым эффектом

На предприятии проведены работы по созданию каркасов КТМК с диагональным рисунком на наружной поверхности. Диагональный рисунок создает саржевое переплетение. На многослойных тканях возможно создание саржевого эффекта на глубину нескольких слоев. На каркасах КТМК возможно получение саржевых структур. Саржевый рисунок на наружной поверхности и на требуемую глубину создается из перевязочных нитей основы. Технология изготовления таких каркасов опробована. Но, так как рисунок создают нити перевязочной основы минимально возможной для переработки линейной плотности, то для требуемого эффекта необходимо заменить их на более толстые, что существенно сни-

жает прочностные свойства материал-деталей.

Имитация саржи. На каркасах КТМК саржевый эффект можно получить точечными уплотнениями. Такие точечные уплотнения получаются выводом на наружную поверхность нитей основы в пределах одной ячейки или нескольких соседних ячеек. Уплотнение можно создать на любую глубину, например, созданием в заданных местах петель из одной или из нескольких наполнительных нитей основы от требуемого по глубине слоя к наружной поверхности и обратно. Саржевый эффект достигается за счет распределения уплотнений по диагонали с заданным углом к оси каркаса, с заданным расстоянием между диагоналями. По аналогии с имитацией саржевого эффекта локальными разряжениями имеется возможность формирования диагонального рисунка сочетанием локальных разряжений. Это достигается выборкой на заданную глубину нитей основы. Эффект усиливается при использовании одновременно уплотнений и разряжений [18].

Каркасы с винтовым армированием Максимально возможный саржевый эффект достигнут на каркасах КТМК с осевым армированием под углом к образующей (так называемые "винтовые" каркасы). Способ изготовления винтового каркаса основан на принудительном повороте оправки вокруг оси в какую-либо сторону. При этом равновесие сил при структурообразовании нарушается, нити основы стремятся сместиться в сторону, противоположную повороту оправки, чем и достигается армирование нитями наполнительной основы под углом относительно образующей каркаса. Величина угла достигается величиной поворота оправки. Величина поворота оправки ограничена. При обработке технологии изготовления конических винтовых каркасов из углеродных нитей был получен угол закрутки армирования до 10 градусов. Необходимо учитывать снижение осевой прочности, связанное с отклонением осевого армирования. Имеется возможность совмещения винтового каркаса с

каркасом нормального осевого армирования. В этом случае можно на каркас нормального осевого армирования наработать винтовой каркас, например, с ребристыми структурами, когда выступы на внутренней поверхности винтового полотна входят в углубления на наружной поверхности внутреннего полотна с нормальным армированием. Винтовые каркасы обычно достаточно стабильные, но для гарантированного сохранения геометрии применяется операция аппретирования, либо всего каркаса, либо точечно.

Удаление шлихты и аппретов из каркасов

Поставляемые нити в той или иной степени содержат замасливатели и шлихту. С целью повышения текстильных свойств перед переработкой на машинах МКТ углеродные нити подвергаются дополнительной обработке, в том числе аппретированию (шлихтованию). Наличие включений шлихты, замасливателей и аппрета (полиуретана) обычно ухудшает смачиваемость волокон структуры каркаса связующим при пропитке, и может существенно снизить качество пластика. Ухудшение качества пластика выражается в заниженном содержании матричного материала, в наличии пустот, непропитанных участков. На предприятии отработана технология удаления полиуретана и других включений из каркаса без потери массы углерода самих нитей. В воздушной среде каркас из углеродных нитей следует выдержать 30...60 мин при температуре 300...350°C. В результате окисления образуется остаток в количестве не более 5 % массовых от первоначального количества покрытий, то есть, в абсолютном выражении, не более 0,15 % от массы углеродных нитей в каркасе, что не повлияет на результаты последующих технологических операций и на конечные свойства изделий [19]. Повышение температуры не влечет существенного уменьшения остатка полиуретана, но резко повышает процесс окисления углеродных волокон, что недопустимо.

Следует отметить, что данная операция, выполненная непосредственно перед про-

питкой, позволяет также устранить излишнюю влагу, что способствует улучшению качества и повышению стабильности характеристик углепластиков.

При изготовлении новой композиционной углеродной заготовки не требуется проведения предварительной операции по удалению технологических включений из каркаса, так как процесс термообработки заготовки происходит при температуре вблизи 1000°C. Нити основы-перевязки имеют значительно меньший (в 2...3 раза модуль упругости [20], [21]. Нити имеют значительные отличия по коэффициенту линейного термического расширения (КЛТР). Все это придает композиту разные свойства по направлениям армирования [22].

Подготовка нитей к текстильной переработке

Для технических нитей, каковыми являются углеродные, кремнеземные и кварцевые, требуется подготовка к текстильной переработке на машинах МКТ для придания им требуемых свойств и геометрических параметров (достижение требуемой линейной плотности и схемы при трощении-кручении, обработка шлихтой, аппретами для придания необходимых текстильных свойств). Подготовка нитей к текстильной переработке осуществляется непосредственно на предприятии. На предприятии для этого разработан и эксплуатируется комплекс специального оборудования.

- Станок тростильно-крутильный, созданный на предприятии специально для углеродных нитей. Предназначен для трощения (соединения) двух нитей и подкрутки до 50 кручений на метр нити.

- Установка шлихтовальная, предназначенная для шлихтования (аппретирования) раствором полиуретана в ацетоне одновременно до 32 нитей, на каждой из двух сторон, линейной плотности от 100 до 1500 текс. Ацетон удаляется с помощью системы вентиляции. Температура в камере от 110 до 150 °С. Скорость протяжки нитей до 15 м в минуту в зависимости от необходимого времени полимеризации полиуретана.

- Станок для параллельной намотки утка на штатные паковки с регулируемым натяжением до 15 кгс.

- Станок для намотки основы на штатные паковки.

Технология для подготовки углеродных нитей, используемых на МКТ, отработана в достаточной степени. Технология подготовки кремнеземных и кварцевых нитей, нитей СВМ отработана экспериментально.

В Ы В О Д Ы

На предприятии "Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов" ("УНИИКМ"), г. Пермь, отработано новое направление ткачества – "бесприбойное" ткачество на уникальных машинах круглоткацких МКТ. Создано круглоткацкое производство. За время его существования отработана технология изготовления от миниатюрных до крупногабаритных каркасов КТМК и заготовок на их основе. Благодаря уникальным свойствам они применяются в ответственных деталях современных образцов ракетно-космической техники. Осуществляется серийное производство комплектов каркасов и заготовок. Поступают новые предложения и технические задания. Разрабатываются каркасы и заготовки для перспективных изделий.

Изложенное здесь свидетельствует о приоритете АО "УНИИКМ" в направлении создания круглотканых многослойных каркасов и уникальных композиционных материалов на их основе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Производство стеклянных волокон и тканей / Под ред. М.Д. Ходаковского. – М.: Химия, 1973.
2. Высокопрочные армирующие волокна // Обзорная информация / Сер. Промышл. хим. волокон. – М.: НИИТЭХИМ, 1983.
3. Углеродные волокна / Пер. с япон./ Под ред. С. Симамуры. – М.: Мир, 1987.
4. Сурнина Н. Ф. Технология и оборудование ткацкого производства. – М., 1981.
5. Текстильные материалы на основе углеродных волокон и методы определения их свойств//Об

зорная информация/Сер. Промышл. хим. волокон. – М.: НИИТЭХИМ, 1985.

6. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 1998.

7. Пат. 2023073 Российская Федерация, С1 D03D11/00. Способ получения полой многослойной тканой заготовки / Р.В. Райков, В.Л. Бабанова, В.И. Еровенкова; заявл. 14.05.1991; опубл. 15.11.1994.

8. Пат. 2466219 Российская Федерация, С1 D03D11/00. Способ изготовления многослойной контурно-профильной ткани / И.Ю. Павлихина, В.Т. Сергеев, М.Н. Никулина, Т.Л. Доброва; заявл. 02.08.2011; действ. пат. 02.08.2011.

9. Pat. 3719210 US, МКИ D03d 37/00 CIRCULAR WEAVING APPARATUS PRODUCT AND PROCESS / Paul D. Emerson et al.; March 6, 1973.

10. Пат. 2748556 Российская Федерация, D03C 11/00 Устройство для образования зева ткацкой машины / Е.В. Лапин, В.И. Тестов, В.М. Бушуев; заявл. 11.12.2019; действ. пат. 11.12.2019.

11. Пат. 2130093 Российская Федерация, D03d 37/00 Способ изготовления тканых оболочек / Е.В. Лапин; заявл. 02.03.1998; действ. пат. 02.03.1998.

12. Изготовление деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов // Руководящие технические материалы РТМ-1.4.401-78. – М.: НИИТ, ВИАМ, 1979.

13. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. – М.: Машиностроение, 1987.

14. Гордеев В.А., Арефьев Г.И., Волков П.В. Ткачество. – М.: Легкая индустрия, 1970.

15. Пат. 2707100 Российская Федерация, D03d 37/00 Полое изделие в виде тканого полотна, способ его формирования и способ формирования на его основе толстостенного изделия, в том числе крупногабаритного / Е.В. Лапин, В.М. Бушуев, А.А. Черепанов, А. М. Шагеев; заявл. 14.06.2019; действ. пат. 14.06.2019.

16. Пат. 2713990 Российская Федерация, D03d 37/00 Цельнотканая многослойная оболочка с ребрами жесткости и способ ее формирования / Е.В. Лапин, В.М. Бушуев, А.А. Черепанов; заявл. 14.06.2019; действ. пат. 14.06.2019.

17. Пат. 2714146 Российская федерация, D03d 37/00 Цельнотканая многослойная оболочка с фланцем и способ ее формирования / Е.В. Лапин, В.М. Бушуев, А.А. Черепанов; заявл. 31.08.2019; действ. пат. 31.08.2019.

18. Пат. 2751123 Российская федерация, D03d 1/00, D03d 11/00, D03d 23/00 Полая многослойная тканая заготовка объемной структуры с имитацией саржевого эффекта и способ ее изготовления / Е.В. Лапин, А.А. Черепанов, В.М. Бушуев; заявл. 11.12.2019; действ. пат. 11.12.2019.

19. Щурик А.Г., Чунаев В.Ю., Пуков П.В. Окисление углеродных материалов и покрытия на углеродных волокнах // Вестник ПГТУ Аэрокосмическая техника. – 2006, № 25. С. 135...140.

20. Пат. 2201893 Российская Федерация, С01В 31/00, С04В 35/52. Композиционный материал / А.Г. Щурик, Е.В. Лапин, П.Г. Удинцев, В.Ю. Чунаев; заявл. 19.09.2000; действ. пат. 19.09.2000.

21. Пат. 2201894 Российская федерация, С01В 31/00, С04В 35/52. Композиционный материал / А.Г. Щурик, Е.В. Лапин, П.Г. Удинцев, В.Ю. Чунаев; заявл. 19.09.2000; действ. пат. 19.09.2000.

22. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы. – Пермь, 2009.

REFERENCES

1. Production of glass fibers and fabrics / Ed. M.D. Khodakovsky. - M.: Chemistry, 1973.

2. High-strength reinforcing fibers // Overview information / Ser. Industrial chem. fibers. – М.: НИТЕХИМ, 1983.

3. Carbon fibers / Per. from Japanese / Ed. S. Simamura. – М.: Mir, 1987.

4. Surnina N. F. Technology and equipment of weaving production. - М., 1981.

5. Textile materials based on carbon fibers and methods for determining their properties//Overview information/Ser. Industrial chem. fibers. – М.: НИТЕХИМ, 1985.

6. Bulanov I.M., Vorobey V.V. Technology of rocket and aerospace structures from composite materials. – М.: Ed. MSTU im. Bauman, 1998.

7. Pat. 2023073 Russian Federation, С1 D03D11/00. The method of obtaining a hollow multilayer woven blank / R.V. Raikov, V.L. Babanova, V.I. Erovenkov; dec. May 14, 1991; publ. 11/15/1994.

8. Pat. 2466219 Russian Federation, С1 D03D11/00. Method for manufacturing multilayer contour-profile fabric / I.Yu. Pavlikhin, V.T. Sergeev, M.N. Nikulina, T.L. Dobrov; dec. 08/02/2011; action Pat. 08/02/2011.

9.Pat. 3719210 US, МКИ D03d 37/00 CIRCULAR WEAVING APPARATUS PRODUCT AND PROCESS / Paul D. Emerson et al.; March 6, 1973

10. Pat. 2748556 Russian Federation, D03C 11/00 Device for forming the throat of a weaving machine / E.V. Lapin, V.I. Testov, V.M. Bushuev; dec. 12/11/2019; action Pat. 12/11/2019.

11. Pat. 2130093 Russian Federation, D03d 37/00 Method for manufacturing woven casings / E.V. Lapin; dec. 03/02/1998; action Pat. 03/02/1998.

12.Manufacture of parts and assemblies from polymer composite materials // Guiding technical materials RTM-1.4.401-78. – М.: NIAT, VIAM, 1979.

13. Tarnopolsky Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. Spatially reinforced composite materials. - М.: Mashinostroenie, 1987.

14. Gordeev V.A., Arefiev G.I., Volkov P.V. Weaving. – М.: Light industry, 1970.

15. Pat. 2707100 Russian Federation, D03d 37/00 A hollow product in the form of a woven fabric, a method for its formation and a method for forming a thick-walled product on its basis, including a large-sized one

/E.V. Lapin, V.M. Bushuev, A.A. Cherepanov, A. M. Shageev; dec. 06/14/2019; action Pat. 06/14/2019.

16. Pat. 2713990 Russian Federation, D03d 37/00 Solid-woven multilayer shell with stiffeners and method of its formation / E.V. Lapin, V.M. Bushuev, A.A. Cherepanov; dec. 06/14/2019; action Pat. 06/14/2019.

17. Pat. 2714146 Russian Federation, D03d 37/00 Solid-woven multilayer shell with a flange and method of its formation / E.V. Lapin, V.M. Bushuev, A.A. Cherepanov; dec. 08/31/2019; action Pat. 08/31/2019.

18. Pat. E.V. Lapin, A.A. Cherepanov, V.M. Bushuev; dec. 12/11/2019; action Pat. 12/11/2019.

19. Shchurik A.G., Chunaev V.Yu., Pukov P.V. Oxidation of carbon materials and coatings on carbon fibers // Bulletin of PSTU Aerospace engineering. - 2006, No. 25. S. 135 ... 140.

20. Pat. 2201893 Russian Federation, C01B 31/00, C04B 35/52. Composite material / A.G. Shchurik, E.V. Lapin, P.G. Udintsev, V.Yu. Chunaev; dec. 09/19/2000; action Pat. 09/19/2000.

21. Pat. 2201894 Russian Federation, C01B 31/00, C04B 35/52. Composite material / A.G. Shchurik, E.V. Lapin, P.G. Udintsev, V.Yu. Chunaev; dec. 09/19/2000; action Pat. 09/19/2000.

22. Shchurik A.G. Artificial carbon materials. - Perm, 2009.

Рекомендована заседанием Президиума НТС АО "УНИИКОМ". Поступила 15.10.21.

УДК 677.023

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_98

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР АРМИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

WAYS TO OPTIMIZE THE STRUCTURES OF REINFORCING COMPONENTS OF SPECIAL PURPOSE COMPOSITE MATERIALS

И.Н. ПАНИН, А.И. ПАНИН, А.Н. СЕЛЕЗНЕВ. I.N. PANIN, A.I. PANIN, A.N. SELEZNEV

(ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ",
ПАО "АК Рубин")

(LLC "Oil and Gas Technologies MIFI",
PSC "AK Rubin")

E-mail: inpanin@maul.ru; selesnev1955@mail.ru; panteks@yandex.ru

В статье рассмотрены пути оптимизации процессов армирования композиционных материалов специального назначения, к которым относятся изделия, подвергаемые высоким нагрузкам при их эксплуатации.

Теоретически обоснованы способы упрочнения армирующих структур композитов с помощью намоток сомкнутой структуры, а также возможности получения облегченных конструкций без потери прочности изделий из них.

Показано, что сомкнутые намотки с расчетной степенью замыкания намотки, выполняемые из термостойких нитей по предлагаемой технологии, позволяют расширить области их применения.

Полученные теоретические положения позволили, на основе проведения предварительных расчетов, сформировать новые, высокопрочные структуры армирующих композиционных материалов.

The article discusses ways to optimize the processes of reinforcement of composite materials for special purposes, which include products subjected to high loads during their operation.

The methods of strengthening the reinforcing structures of composites using windings of a closed structure, as well as the possibility of obtaining the "lightest"

and strongest products from them, are theoretically substantiated.

It is shown that closed windings with a calculated degree of winding closure, made of heat-resistant filaments according to the proposed technology, make it possible to vary the areas of their application.

The obtained theoretical provisions allowed to form new, high-strength structures of reinforcing composite materials on the basis of preliminary calculations.

Ключевые слова: композит, структура, прочность, армирование, углеродное волокно, авиация, нить, намотка.

Keywords: composite, structure, strength, reinforcement, carbon fiber, aviation, thread, winding.

Создание и разработка новых высокопрочных и максимально "легких" полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1] основываются на применении текстильно-армированных композитов. В настоящее время в качестве армирующих компонентов (наполнителей) ПКМ применяются текстильные структуры в виде тканей, нетканых полотен, намотки, кулирного трикотажа и др.

Такое разнообразие текстильных структур армирования ПКМ [2] определяется областями и условиями использования конечного продукта. Наряду со свойствами нитевидных материалов, из которых формируются наполнители (их термостойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред, прочностные характеристики и т.д.), конечные эксплуатационные характеристики создаваемых изделий во многом определяются выбранной структурой армирования. От избранного способа армирования зависят не только физико-механические свойства ПКМ, но и вес конечного продукта, что особенно важно для аэрокосмической отрасли [3]. Оценка весовой доли армирующего компонента в ПКМ приведена в работе [4], которая разделяет их на три группы:

- "сильнонаполненные", с долей наполнителя по весу более 70%;
- "средненаполненные", с долей наполнителя по весу от 30...70%;
- "слабонаполненные", с наполнением по весу менее 30%.

Однако данное разделение не позволяет определять конкретные границы весовых

характеристик проектируемых конечных изделий.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования мотальных паковок "сомкнутой структуры", "замкнутых" и "спиралевидных" намоток показали, что, изменяя структуру намотки нитей на формируемом изделии, можно управлять и коэффициентом заполнения объема матриц ПКМ армирующим компонентом.

Следует также отметить, что многослойные текстильные структуры [5] армирования ПКМ (формируемых на базе послойной укладки тканей в пакеты, намоткой из многониточных жгутов, многослойные нетканые) при приложении к ним значительных внешних нагрузок подвержены расслоению и разрушению композиционного материала вследствие малой внутренней связанности отдельных слоев.

Для решения этой проблемы при создании высокопрочных и максимально легких ПКМ специального назначения нами предлагаются новые способы упрочнения конструкции изделий специального назначения, на поверхности которых может быть сформирован упрочняющий слой в виде ПКМ, армированного сомкнутой намоткой с заданной степенью замыкания p .

Под степенью замыкания намотки p понимают двойное число ходов нитеводителя вдоль образующей паковки (слева-направо и обратно), по истечении которого витки $p+1^{\text{й}}$ пары слоев намотки пойдут рядом (слева или справа) с первым витком, то есть цикл намотки замкнется, после чего характер намотки нитей будет повторяться.

Сомкнутые намотки с различной степенью замыкания могут широко применяться в качестве армирующих компонентов композиционных материалов, в том числе при упрочнении тел вращения специального назначения. При этом коэффициент заполнения будет составлять $k_3 = 0,785$ [6]. Это максимально возможное значение наполнения матрицы ПКМ армирующим компонентом среди всех возможных текстильных структур, что позволяет получать самые легкие конечные продукты.

Различают "опережающие" и "отстающие" сомкнутые намотки [7], у которых витки нити после совершения одного цикла движения нитеводителя ложатся соответственно правее или левее первой пары слоев намотки. На торце паковки это будет обусловлено тем, в каком направлении от первого витка будет откладываться угол сдвига витков ψ_c . У "опережающих" сомкнутых намоток он будет откладываться по ходу часовой стрелки, а у "отстающих" – против хода часовой стрелки. На рис. 1-а и 1-б соответственно показаны развертки и круговые диаграммы односомкнутой "отстающей" и односомкнутой "опережающей" намоток.

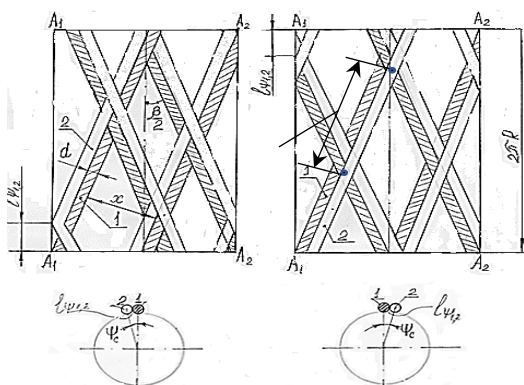


Рис. 1

Данные отличия и особенности формирования структур сомкнутых намоток необходимо учитывать при использовании их в качестве упрочняющих оболочек ПКМ, а именно такие изделия имеют "верх" и "низ". При приложении к ним внешних осевых усилий витки нити, идущие в одну сторону, будут опираться на витки ранее сформированного слоя, а витки, идущие в противоположную сторону, опираться на

нити ранее сформированного слоя не будут и, следовательно, могут смещаться (слетать) с паковки, снижая ее прочность [8].

Очевидно, что чем выше степень замыкания намотки p , тем меньше будут размеры ромбовидных пор у замкнутых намоток, которые будут являться граничными для "опережающей" и "отстающей" сомкнутых намоток с той же степенью замыкания [9]. Главное отличие p -сомкнутых намоток от односомкнутых заключается лишь в длине "настилов", нити между взаимно-пересекающимися витками l_{ab} – в одном объемном слое намотки толщиной $\delta=2d$, где d – условный диаметр нити. Это очень важно для прочностных характеристик создаваемого армирующего компонента ПКМ.

Все вышеприведенные положения свидетельствуют о том, что они влияют на прочность создаваемого (ПКМ) – конечного изделия, так как расположение нитей в структуре смежных слоев армирующего компонента влияет на их подвижность относительно друг друга.

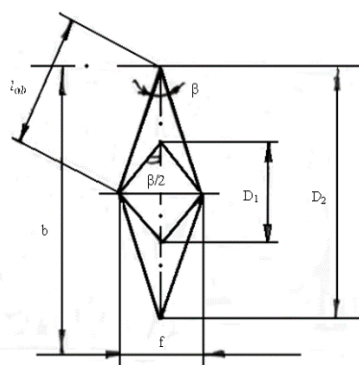


Рис. 2

Так, анализ рис. 2 показывает, что длина "настилов" нити между пересечениями их в одном объемном слое l_{ab} определяется степенью замыкания p . Точки пересечения витков нити образуют ромбы, у которых малые диагонали f будут оставаться неизменными с ростом диаметра намотки, а большие диагонали l_{ab} будут расти пропорционально диаметру намотки паковки (упрочняющей оболочки) – D . При этом угол подъема витков $\beta/2$ будет уменьшаться.

Для расчета требуемых параметров армирующих структур ПКМ и определения

длины "настилов" нити у сомкнутых намоток различной степени замыкания p необходимо определить, прежде всего число витков в слое намотки:

$$W_c = \frac{H}{h}, \quad (1)$$

где $h = \frac{h_k}{i_0} = \frac{2H}{ki_0}$ – шаг витков намотки; h_k – шаг кулачка нитеводителя; H – высота намотки паковки; i_0 – общее передаточное отношение от веретена к кулачку нитеводителя.

Тогда число витков в одном объемном слое намотки будет:

$$W_c = \frac{Hki_0}{2H} = \frac{ki_0}{2}. \quad (2)$$

В этом случае размеры пор и длина "настилов" ℓ нити могут быть определены из соотношений:

$$\ell_{\psi} = \ell = \frac{\pi D}{P}. \quad (3)$$

$$f = \frac{H}{PW_c} = \frac{2H}{W_c P} = \frac{2H}{ki_0 P}, \quad (4)$$

где $n_1 = [ki_0]$ – целая часть числа; k – число оборотов кулачка нитеводителя за цикл движения нити.

Длина "настилов" ℓ для p -сомкнутых намоток может быть определена по формуле:

$$\ell_{ab} = \frac{\ell_{\psi_{1,2}}}{\cos \beta/2}. \quad (5)$$

Так как

$$\ell_{\psi_{1,2}} = \frac{\pi D}{P},$$

то

$$\ell_{ab} = \frac{\pi D \cos \beta/2}{P}. \quad (6)$$

Анализ формулы 8 показывает, что чем больше степень замыкания намотки p , тем меньше длина "настилов" ℓ_{ab} нити, а следовательно, ниже и подвижность витков нити относительно друг друга, что следует учитывать при определении областей применения создаваемых (ПКМ).

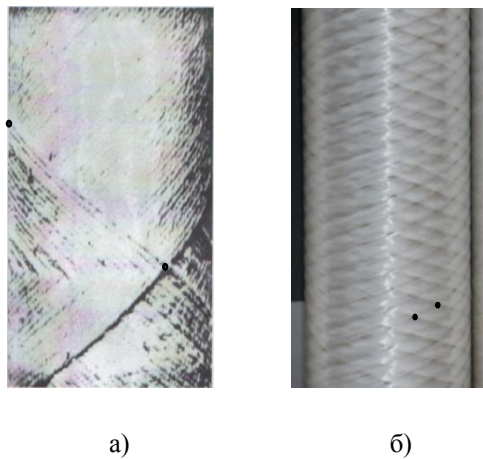


Рис. 3

На рис. 3 показаны структуры одно- (а) и двенадцатисомкнутых (б) намоток.

Из рис. 3 видно, что чем выше степень замыкания намотки p , короче будут "настилы", а следовательно, и прочнее связь витков нити друг с другом в смежных слоях армирующего компонента.

Постоянная и максимальная, по сравнению с любыми иными текстильными наполнителями (ПКМ), объемная плотность данных структур намотки, а также высокая прочность закрепления малых "настилов" витков обеспечивают легкость и высокую прочность (ПКМ) выходного продукта.

Полученные теоретические положения позволили, на основе проведения предварительных расчетов, сформировать новые, высокопрочные структуры армирующих композиционных материалов (формируемых на базе тел вращения). На рис. 4 представлены: а) – изделия специального назначения, армированные 23-сомкнутыми "опережающими" намотками; и б) – композиционные теплоизоляционные оболочки из углеродных нитей [10].

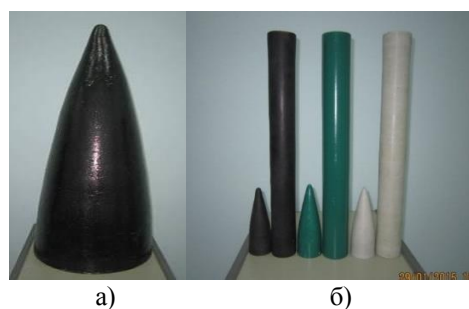


Рис. 4

ВЫВОДЫ

1. Прочность полимерных композиционных материалов и изделий специального назначения, в виде тел вращения, можно повышать за счет формирования на их поверхности армирующих структур в виде сомкнутой намотки, с заданной степенью замыкания намотки p .

2. Чем выше степень замыкания сомкнутой намотки p , тем мельче будут настилы нитей в смежных слоях, размеры пор в структуре армирующего компонента полимерного композиционного материала, а следовательно, и меньше масса связующего компонента в выходном продукте (что позволит снизить вес конечного изделия).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cyrus J.R., Kosztownya Anthony, M.Waas.* Postbuckling response of unitized stiffened textile composite panels: Experiments // *International Journal of Non-Linear Mechanics.* –2021, September.

2. *Hao Li, Yang Wei, Libin Wang.* A general model for predicting the off-axis performance of fiber reinforced composite materials // *Structures.* – V. 34, 2021, December. P. 2087...2097.

3. *G. Kastratović, A. Grbović, A. Sedmak, Ž. Božić, S. Sedmak.* Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties // *Procedia Structural Integrity.* – V. 31, 2021. P. 127...133.

4. *Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Молоснов К.А.* Полимерные композиты с кулирным трикотажным наполнителем. – СПб.: СПбГУПТД, 2020.

5. *Jin Huang, Philippe Boisse, Nahiène Hamila.* Simulation of the forming of tufted multilayer composite preform // *Composites Part B: Engineering.* – V. 220, 2021, September. 108981.

6. *Панин М.И.* Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения: Дис.... канд. техн. наук. – МГТА им. А.Н. Косыгина, 2012.

7. *Гордеев В.А., Зайцев В.П., Панин И.Н.* О замкнутых и сомкнутых крестовых намотках // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 1987, №2.

8. *Щербаков В.П., Заваруев В.А., Поляков В.И.* Теория и критерии устойчивости нити при вязании // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2013, № 6. С. 35...36.

9. *Панин А.И., Сухотерин Л.Я., Калмыков А.А., Цимбалюк А. Е.* Исследование структур сомкнутых

намоток, применяемых в качестве паковок специального назначения // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2012, № 1. С. 131...134.

10. *Фитцер Э., Дифендорф Р., Калнин И., Ягер Х., Хейес Б., Стензенбергер К., Адаме Д., Брунш К., Бергман Х., Гастингс Г., Нагабхушанам Т., Зенг Х., Ким С., Ри Б.* Углеродные волокна и углекомпозиаты / Пер. с англ./ под ред. Фитцера. –М.: Мир, 1988.

REFERENCES

1. *Cyrus J.R., Kosztownya Anthony, M.Waas.* Postbuckling response of unitized stiffened textile composite panels: Experiments // *International Journal of Non-Linear Mechanics.* –2021, September.

2. *Hao Li, Yang Wei, Libin Wang.* A general model for predicting the off-axis performance of fiber reinforced composite materials // *Structures.* – V. 34, 2021, December. P. 2087...2097.

3. *G. Kastratović, A. Grbović, A. Sedmak, Ž. Božić, S. Sedmak.* Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties // *Procedia Structural Integrity.* – V. 31, 2021. P. 127...133.

4. *Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Molosnov K.A.* Polymer composites with knitted filler. - St. Petersburg: SPbGUPTD, 2020.

5. *Jin Huang, Philippe Boisse, Nahiène Hamila.* Simulation of the formation of tufted multilayer composite preform // *Composites Part B: Engineering.* – V. 220, 2021, September. 108981.

6. *Panin M.I.* Development of composite materials based on winding packages for special purposes: Dis.... cand. tech. Sciences. - MGTA them. A.N. Kosygin, 2012.

7. *Gordeev V.A., Zaitsev V.P., Panin I.N.* On closed and closed cross windings // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1987, No. 2.

8. *Shcherbakov V.P., Zavaruev V.A., Polyakov V.I.* Theory and criteria for thread stability during knitting // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2013, No. 6. S. 35...36.

9. *Panin A.I., Sukhoterin L.Ya., Kalmykov A.A., Tsymbalyuk A. E.* Investigation of the structures of closed windings used as special purpose packages // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2012, No. 1. pp. 131...134.

10. *Fitzer E., Diefendorf R., Kalnin I., Jager X., Hayes B., Stensenberger K., Adams D., Brunsch K., Bergman X., Hastings G., Nagabhusanam T., Zeng X., Kim S., Ri B.* Carbon fibers and carbon composites / *Trans. from English/ ed. Fitzer.* –М.: Mir, 1988.

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ". Поступила 11.10.21.

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЛЕКСНЫХ НИТЕЙ
ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**THE USE OF COMPLEX FILAMENTS
FOR REINFORCEMENT OF FIBROUS COMPOSITE MATERIALS
USED IN THE OIL AND GAS INDUSTRY**

М.И. ПАНИН, В.М. КАПУСТИН, А.Е. ЦИМБАЛЮК, Р.В. ХАКИМОВ
M.I. PANIN, V.M. KAPUSTIN, A.YE. TSIMBALYUK, R.V. KHAKIMOV

**(ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ",
Российский государственный университет нефти и газа
(научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина)**

**(LLC "Neftegazovye tekhnologii MIFI",
Gubkin Russian State University of Oil and Gas)**

E-mail: m.panin87@yandex.ru; vmkapustin@mail.ru; gip-ngp@mail.ru; hakimovroman@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы создания для нефтегазовой отрасли новых видов гибридных волокнистых композиционных материалов, формируемых на базе армирования их комплексными нитями различной природы, устойчивых к воздействию агрессивных сред.

Гибридные волокнистые композиционные фильтры могут широко использоваться для разделения различных фракций, осушки и очистки нефти и газов от различных примесей.

Таким образом, комплексные нити, применяемые в качестве армирующих компонентов ВПКМ, благодаря своим специфическим свойствам, и свойствам связующих элементов, позволяют создавать новые материалы с уникальными параметрами.

The article deals with the creation of new types of hybrid fibrous composite materials for the oil and gas industry, formed on the basis of their reinforcement with complex threads of various nature, resistant to the effects of aggressive media.

Hybrid fiber composite filters can be widely used for the separation of various fractions, drying and purification of oil and gases from various impurities.

Thus, complex yarns used as reinforcing components of VPCM, due to their specific properties and properties of binding elements, allow creating new materials with unique parameters.

Ключевые слова: нефть, нефтяной газ, волокно, нить, композит, экология, механические примеси.

Keywords: petroleum, petroleum gas, fiber, thread, composite, ecology, mechanical impurities.

Нефтегазовая отрасль страны остро нуждается в получении высокопрочных, устойчивых к воздействию агрессивных сред, термостойких материалов [1]. Данные

материалы могут использоваться для разделения, осушки и очистки нефти и газов от различных примесей, например, в процессе очистки попутного нефтяного газа (ПНГ)

от сероводорода [2], для отделения водных фракций и механических примесей. Существующие виды фильтровальных материалов не в полной мере позволяют решить эти сложные комплексные задачи эффективно, поэтому вопрос изыскания новых решений является актуальным.

Решение этой сложной задачи возможно за счет создания новых видов волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) и их производных с текстильным армирующим компонентом на основе комплексных нитей [3]. Это открывает новые пути расширения ассортимента создаваемых изделий с наперед заданными свойствами. Именно специфичные свойства комплексных нитей позволяют получить заданные функциональные характеристики (разную прочность по разрывной нагрузке, различную плотность, пористость и проницаемость структур по объему материала, и т.д.) композиционных материалов и их производных требуемых в нефтедобывающей отрасли [4].

Существует большое многообразие комплексных нитей. Синтетические и искусственные комплексные нити могут формироваться кручением нескольких элементарных нитей различной природы (из различного сырья) текстурированием элементарных монопнитей, трощением, созданием бикомпонентных, фасонных или сложением моно пленочных нитей.

Известно [5], [6], что механические свойства синтетических и искусственных комплексных нитей, вырабатываемых из элементарных волокон различной линейной плотности, в значительной степени зависят от их укрутки. Поэтому в процессе армирования ВПКМ следует учитывать равновесность комплексных нитей, а также то, что сохранение их целостной структуры может достигаться термофиксацией или точечным проклеиванием элементарных волокон в нитях.

Следует отметить, что при создании композиционных материалов намоткой комплексных нитей на тела вращения (трубы, конуса) устойчивая форма "препрегам" (полуфабрикат) может придаваться с помощью полимерного связующего,

включая аппретуры (с заданными теплофизическими параметрами). В данных случаях их свойства определяются не только природой и соотношением основных компонентов [7], но также технологией армирования, структурой и количеством воздушных (газовых) включений, которые могут занимать значительную долю в конечных изделиях.

Эти включения обеспечивают, наряду с отрицательными (образование трещин, пор, раковин), приобретение и специфичных положительных качественных характеристик, а именно:

- заданную (на участках использования композита) прочность;
- диэлектрические и теплофизические свойства;
- переменную плотность и проницаемость для жидких и газообразных фаз [8].

Исследование данных материалов приводит к тому, что распространенные общепринятые методики не работают, и требуется решение специфичных, порою многостадийных сложных аналитических задач. Тем не менее, известные методы, такие как классический метод микроструктурного анализа и бесконтактная (неразрушающий контроль) электронная микроскопия, широко используемые в промышленности при производстве армированных пластиков, вполне применимы и для изучения свойств данных материалов.

Большой интерес для производства ВПКМ с заданными параметрами пористости и проницаемости (армированных комплексными нитями) [9] имеют методики исследования их свойств, не требующие специального оборудования, которые позволяют оперативно, с достаточной степенью точности, получить данные о соотношении наполнителя, связующего и пористости материала, что в свою очередь позволяет прогнозировать свойства конечного продукта.

Так, плотность и пористость композитов, сформированных, например, намоткой комплексных нитей и связующими термоактивными смолами, обладающими высокой пластичностью, можно определять методом гидростатического взвешивания. Для этого сухой образец материала сначала

взвешивают на воздухе, а затем в жидкости, хорошо смачивающей образец (без образования воздушных пузырей на его поверхности, например, в керосине).

Объем открытых пор в образцах компонентов:

$$V_0 = \frac{G_2 - G_1}{G - G_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где G – вес образца на воздухе; G_1 – вес образца в жидкости до насыщения; G_2 – вес образца в жидкости после насыщения.

Процесс насыщения образцов смачиваемой жидкостью можно проводить в вакуумной упаковке.

Изменение температурных режимов таких материалов приводит к изменению их структуры и свойств, в частности, пористости и газопроницаемости. Для определения объема пор в армирующем компоненте таких материалов, до и после изменения температурного воздействия при известном содержании связующего, может использоваться метод выжигания связующего в керамических тиглях.

Умение оценивать и управлять пористостью, а также газопроницаемостью композиционных материалов, формируемых на базе комплексных нитей, открывает возможности создания новых "управляемых" фильтровальных перегородок, которые с успехом могут применяться для очистки жидких и газообразных сред. Причем использование комплексных нитей в армировании структур ВПКМ с заданной пористостью и проницаемостью [10] позволяет обеспечивать требуемую производительность процессов фильтрации, а применение комплексных нитей различной природы – селективность взаимодействия с фильтруемыми средами.

Таким образом, комплексные нити, применяемые в качестве армирующих компонентов ВПКМ, благодаря своим специфическим свойствам и свойствам связующих элементов, позволяют создавать новые материалы с уникальными параметрами.

На рис. 1 представлен фрагмент композиционного фильтра, сформированного из

комплексных нитей (углеродных и полипропиленовых), применяемый для очистки от механических примесей и осушки (от водяных паров) попутного нефтяного газа. В данном случае на профильной перфорированной трубе формируется фильтровальный слой из комплексных нитей (полученный на основе углеродных и полипропиленовых нитей).



Рис. 1

При нанесении связующего компонента только на углеродные нити они образуют упрочняющий каркас ВПКМ, а полипропиленовые мультифиламентные нити обеспечивают заданные фильтровальные свойства. При этом производительность композиционного фильтра может задаваться его типоразмерами и толщиной намотки комплексных нитей на профильный каркас.

В Ы В О Д Ы

1. Использование комплексных нитей в качестве армирующих компонентов волокнистых полимерных композитов обуславливает, за счет большого разнообразия свойств волокон, составляющих комплексную нить, возможности создания материалов (конечных продуктов) с новыми структурами и с заданными свойствами.

2. В нефтегазовой отрасли наиболее перспективными направлениями использования композиционных материалов, армированных комплексными нитями, являются процессы тонкой фильтрации различных нефтегазовых сред.

1. *Carlos Rafael, Silvade Oliveira, Afonso Henrique, da Silva Júnior, Jéssica Mulinari, Ana Paula, Serafini Immich.* Textile Re-Engineering: Eco-responsible solutions for a more sustainable industry // Sustainable Production and Consumption. – V. 28, 2021, October. P. 1232...1248.

2. *Визель Я.М., Игумнов В.С., Чижиков Ю.В.* Безотходная сероочистка отходящих газов с помощью активных щелочных сорбентов: технология и экономика // Экология и промышленность России. – 2010.

3. *Панин М.И.* Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения: Дис... канд. техн. наук. – М.: МГТА им. А.Н. Косыгина, 2012.

4. *Панин М.И.* Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок // Актуальные проблемы проектирования и технологии изготовления текстильных материалов специального назначения // Сб. мат. Всерос. научн.-технич. конф. с международным участием (ТЕКСТИЛЬ – 2010). – Дмитровград: ДИТУД, 2010 (414). С.48.

5. *Белицин М.Н.* Синтетические и искусственные нити. – М.: Легкая индустрия, 1976.

6. *Белицин М.Н., Дмитриев С.А.* Влияние различных факторов на структуру синтетических комплексных нитей // Текстильная промышленность. – 1969, № 10. С.71...74.

7. *Райтлингер С.А.* Успехи химии. – 1951. Т.20.

8. *Шленский О.Ф., Хованская Н.Н., Лаврентьев В.В.* // Пластические массы. – 1966, № 5.

9. *Tao Jia, Shiping Zhanga, Yan Heb, Xiaoying Zhangc, Xiong Zhangd, Weihua Lie.* Enhanced thermoelectric property of cement-based materials with the synthesized MnO₂/carbon fiber composite // Journal of Building Engineering. – Vol. 43, November 2021, 103190

10. *Николаев С.Д., Зайцев В.П., Панин И.Н.* О тонкости очистки фильтрата и производстве трубчатых текстильных фильтров // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, № 6.

1. *Carlos Rafael, Silvade Oliveira, Afonso Henrique, da Silva Júnior, Jéssica Mulinari, Ana Paula, Serafini Immich.* Textile Re-Engineering: Eco-responsible solutions for a more sustainable industry // Sustainable Production and Consumption. – V. 28, 2021, October. P. 1232...1248.

2. *Wiesel Ya.M., Igumnov V.S., Chizhikov Yu.V.* Waste-free desulphurization of waste gases with the power of active alkaline sorbents: technolo-geography and economics // Ecology and industry of Russia. – 2010.

3. *Panin M.I.* Development of composite materials based on winding packs of special purpose: Dis.... Candidate of Technical Sciences. - M.: Kosygin Moscow State Technical University, 2012.

4. *Panin M.I.* Development of composite materials based on winding packs // Actual problems of design and technologies for the manufacture of textile materials for special purposes // Sb. mat. Vseros. nauchn.-technich. conf. with international participation (TEXTILE – 2010). – Dimitrovgrad: DITUD, 2010 (414). p.48.

5. *Belitsin M.N.* Synthetic and artificial threads. – M.: Light Industry, 1976.

6. *Belitsin M.N., Dmitriev S.A.* Influence of various factors on the structure of synthetic complex filaments // Textile industry. – 1969, No. 10. p. 71...74.

7. *Reitlinger S.A.* Successes of chemistry. – 1951. Vol.20.

8. *Shlensky O.F., Khovanskaya N.N., Lavrentiev V.V.* // Plastic masses. – 1966, № 5.

9. *Tao Jia, Shiping Zhanga, Yan Heb, Xiaoying Zhangc, Xiong Zhangd, Weihua Lie.* Enhanced thermoelectric property of cement-based materials with the synthesized MnO₂/carbon fiber composite // Journal of Building Engineering. – Vol. 43, November 2021, 103190

10. *Nikolaev S.D., Zaitsev V.P., Panin I.N.* On the fineness of filtrate purification and production of tubular textile filters // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2005, № 6.

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО "Нефтегазовые технологии МИФИ". Поступила 11.10.21.

**ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ
ТЕКСТИЛЬНЫМИ И ШВЕЙНЫМИ МЕТОДАМИ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**TECHNOLOGIES OF 3D REINFORCING OF POLYMER COMPOSITE
CONSTRUCTIONS BY TEXTILE AND SEWING METHODS**

Г.П. ЗАРЕЦКАЯ, Е.М. БАЗАЕВ, Т.В. РУДНЕВА, Е.В. ЛУНИНА

G.P. ZARETSKAYA, E.M. BAZAEV, T.V. RUDNEVA, E.V. LUNINA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: zaretskaya-gp@rguk.ru; bazaevem@mail.ru; Rudneva.tv@yandex.ru; katushty@hotmail.com

В статье представлены текстильные и швейные технологии изготовления преформ, в том числе трехмерных, сложной пространственной формы, для конструкций из композиционных материалов. К основным преимуществам высоконагруженных армированных деталей из полимерных композиционных материалов отнесены целостность и неразрушимость. Рассмотрены виды волокнистых структур для армирования. Показана возможность получения преформ с локальным распределением физико-механических свойств. Описаны традиционные и мультиаксиальные тканые и вязаные армирующие материалы. Выявлено, что наиболее перспективны в этой области армированные преформы с нерегулярной структурой, а также со структурой природных оболочек.

The article presents textile and sewing technologies for preform manufacturing for composite materials, including three-dimensional preforms of complex spatial shape. Integrity and indestructibility are the main advantages of highly loaded reinforced parts made of polymer composites. Types of fiber structures for reinforcement have been considered. The possibility of obtaining preforms with local distribution of physical and mechanical properties is shown. Traditional and multiaxial woven and knitted reinforcing materials are described. It has been revealed that the most promising in this area are reinforced preforms with irregular structure, as well as with the structure of natural shells.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, трехмерное армирование, мультиаксиальные материалы, нерегулярная структура, природные оболочки, тканая деталь, плетеные изделия.

Keywords: polymer composites, 3D reinforcement, multiaxial materials, irregular structure, natural shells, woven article, braided goods.

В современном мире, где летательные аппараты (ЛА) постоянно совершенствуются, а их конструкции усложняются, в

уюду возрастающим эксплуатационным требованиям, полимерные композиционные материалы (ПКМ), а именно методы их

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13044.

* The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-13044.

конструирования и технологии изготовления, требуют пересмотра и преобразования за счет внедрения нового технологического оборудования с целью повышения надежности структуры и деталей из ПКМ в целом.

При разработке конструкций из ПКМ основное внимание уделяется весу готовой детали или изделия, поскольку энергозатраты на перемещение ЛА во многом зависят от его массы. Помимо проектирования легких конструкций всегда стоит задача создания технологий, обеспечивающих минимальные материальные вложения на производство ЛА [1]. Именно внедрение конструкций из ПКМ в производство ЛА позволило не только снизить вес аппаратов по сравнению с ранее используемыми металлическими конструкциями, но и улучшить их прочностные показатели, а также сократить себестоимость. Однако с развитием технологий производства авиационных конструкций этого становится недостаточно, и требуются все более эффективные подходы к решению поставленной задачи совмещения прочности и легкости.

Изготовление авиационных конструкций из ПКМ сложного профиля традиционными швейными и текстильными методами становится проблематичным, так как в этом случае требуется раскрой и последующее соединение деталей кроя или ручная выкладка, что значительно снижает прочность конструкции в местах соединений. Одним из эффективных решений данной задачи является использование трехмерных армирующих преформ, обладающих высокой подвижностью нитей и способностью принимать сложные пространственные формы [2].

На основании структурной целостности, а также линейности и непрерывности волокон волокнистые структуры можно разделить на 4 типа: дискретные, непрерывные, плоские (2D) и трехмерные (3D).

В трехмерной волокнистой системе волокна ориентированы в трех направлениях. С помощью непрерывной нити трехмерная сеть формируется как единое целое. Главной особенностью трехмерной структуры является армирование не только по плоскости, но и по всей толщине, что практически

исключает расслаивание композиционного материала при эксплуатации. Еще одним важным свойством многих трехмерных структур, таких как тканые, трикотажные, плетеные и нетканые материалы, является их способность принимать сложные пространственные формы.

В настоящее время авиационные конструкции из ПКМ изготавливаются преимущественно с использованием традиционных технологий армирования, заключающихся в послойной укладке слоев тканевого наполнителя с последующим формованием автоклавными и безавтоклавными методами. Такие композиционные материалы обладают рядом недостатков – низкой прочностью на удар, сдвиг и расслаивание материала, так как соединение слоев происходит только за счет связующего.

3D-армированный композиционный материал имеет значительное преимущество перед распространенными на сегодняшний день препрегами. Механические свойства композитов, изготовленных из препрега, характеризуются высокой жесткостью и прочностью в плоскости и меньшей жесткостью и прочностью вне плоскости [1]. Применяемая на настоящий момент технология изготовления деталей из препрегов заключается в раскрое, укладке и придании нужной формы 2D-препрегов. Основные проблемы использования препрегов для изготовления деталей из ПКМ заключаются в сложности фиксирования слоев препрега в нужном положении перед отверждением, а также достижении удовлетворительных механических характеристик по толщине материала [1].

Армирующая структура композиционного материала играет решающую роль в его механических характеристиках [3], [4]. Так как в роли армирующего каркаса выступают нити или волокна, образующие целостную систему, немаловажным фактором при проектировании сетчатых армирующих материалов является теория сетей. Согласно этой теории возможность искривления и смещения линий сети относительно друг друга приводит к изменению трех основных признаков ячеек сети: сетевых углов, длин сторон и расстояний между сто-

ронами, что характерно и для формообразования тканевых и тканых оболочек и является их особенностью [5]. Улучшить формообразующие свойства тканой структуры можно путем изгиба сторон ячеек, причем в этом случае появляется возможность проектировать армирующие материалы с нерегулярными формообразующими свойствами.

Ткачество широко используется в области изготовления деталей из ПКМ, поскольку именно этим методом производится подавляющее большинство однослойных, широкополотных углеволокнистых и стекловолокнистых тканей, которые в настоящее время используются в качестве армирующего материала для композитных компонентов. Однако традиционное ткацкое оборудование может быть использовано для производства более сложных, трехмерных сетчатых преформ с сетчатой структурой [6].

В некоторых источниках [6...8] 3D-тканые материалы разделяются на 2D-тканые 3D-материалы (то есть получаемые традиционными методами 2D-ткачества) и 3D-тканые 3D-материалы (то есть получаемые методом 3D-ткачества).

3D-ткачество характеризуется операцией двойного зевобразования. Такая система зевобразования позволяет основным нитям переплетаться одновременно с горизонтальными и вертикальными системами уточных нитей. Соответственно основные нити, горизонтальные и вертикальные уточные нити, перпендикулярны друг другу.

3D-ткачество позволяет напрямую изготавливать тканые профильные материалы – сплошные, трубчатые, сферические, криволинейные и их комбинации, а также комбинировать ткацкие переплетения – полотняное, саржевое и атласное – в различных областях преформы [1]. 3D-ткачеством можно получить различные структуры волокна, включая панели с ортогональным расположением нитей, панели переменной толщины, полые детали или жгуты. Одни из примеров таких деталей показаны на рис. 1 (образцы трехмерных деталей, полу-

ченных методом ткачества: а – тканая деталь с цельноткаными ребрами жесткости; б – кубическая деталь, в которой нити основы переходят в нити утка и наоборот).

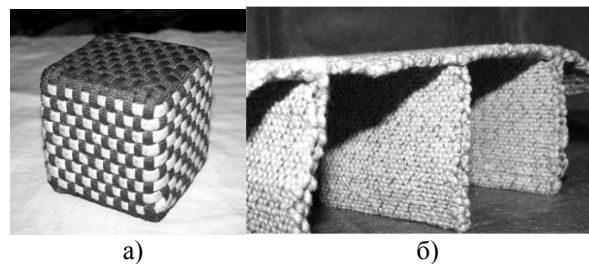


Рис. 1

Ткачество позволяет использовать несколько разных по свойствам и составу нитей и разных ткацких переплетений в одной преформе. Более того, при ткачестве возможно изменять поперечное сечение и размер преформы в процессе изготовления путем введения или удаления нитей. Таким образом можно получить преформу с локальным распределением физико-механических свойств.

Основное различие между вязаным материалом и материалом, изготовленным при помощи других текстильных процессов, заключается в высокой степени извитости пряжи, которая возникает в процессе вязания. В результате полученный вязаный материал обеспечивает меньшую структурную прочность композита, но достаточную формообразующую способность для производства деталей сложной формы. Особенность строения вязаного материала придает ему достаточную эластичность для покрытия всей поверхности формы без необходимости разрезать и перекрывать участки. Это снижает количество технологических операций, отходов материала и затраты на производство деталей сложной формы.

Изменение структуры вязаного материала может значительно изменить свойства самого вязаного полотна. Такие характеристики, как растяжимость ткани, плотность, толщина, текстура поверхности и т.д., можно контролировать достаточно точно. Это позволяет изготавливать вязаное полотно с требуемыми свойствами для конкретного компонента [6].

Стандартные основовязаные и уточновязаные полотна считаются 2D-материалами, однако машины с двумя или более игольными фонтурами способны производить многослойные полотна с нитями, проходящими между слоями. Такие полотна также могут быть изготовлены с переменной шириной, отверстиями, а также разделениями, позволяющими формировать несколько параллельных тканей [6].

Мультиаксиальные основовязаные материалы состоят из систем нитей, расположенных по основе (0°), утку (90°) и диагонали (45°) и скрепляемых вместе цепочной или трикотажной строчкой. Перспективным направлением развития технологии изготовления мультиаксиальных основовязаных материалов является получение кругловязаных мультиаксиальных структур.

По сравнению с традиционными ткаными материалами, мультиаксиальные ткани обладают большей гибкостью. Нити в таких тканях могут быть уложены под углами от 0 до 90° , включая 45 , 90 , 30 , 60 и

22° , и затем прошиты, образуя слои скрепленных строчкой мультиаксиальных слоев нитей, тогда как тканые материалы изготавливаются в основном из ровинга, расположенного под углами 0 и 90° . Мультиаксиальные основовязаные материалы превосходят по прочностным показателям традиционные тканые, так как нити не переплетаются друг с другом, соответственно отсутствует извитость нитей, свойственная для материалов, полученных традиционными методами ткачества и вязания. Особенности технологического процесса, благодаря которому слои ткани сохраняют способность сдвигаться на определенную величину относительно друг друга, позволяют такому материалу принимать заданную форму без образования складок, которые обычно образуются в стандартной тканой ткани (рис. 2-а) [6], [10], [11]. Рис. 2 – примеры вязаных материалов: а – мультиаксиальный основовязанный материал; б – вязаная деталь сложной пространственной формы [6]; в – 3D-вязанный материал [9]).

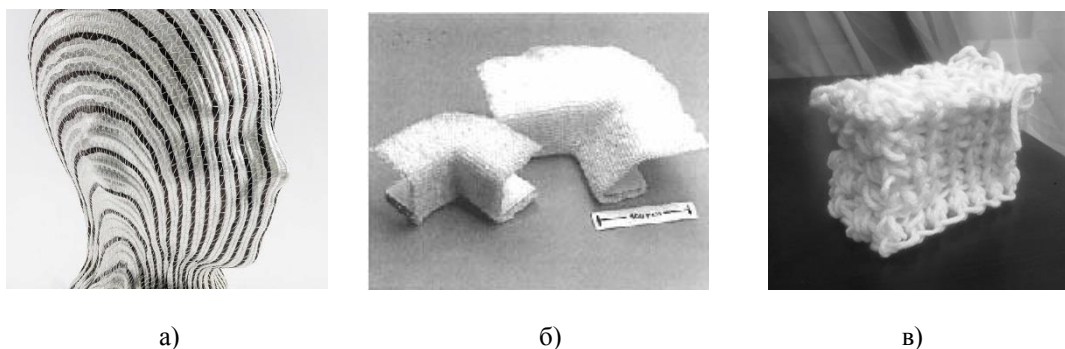


Рис. 2

Триаксиальные основовязаные ткани ($0^\circ, \pm 45^\circ$) используются тогда, когда нужно увеличить продольную и торсионную жесткость, тогда как триаксиальные уточновязаные ткани ($90^\circ, \pm 45^\circ$) используются для увеличения поперечной и торсионной жесткости [10].

Разработки, приведенные в работе [6], позволяют получить вязаный материал с требуемой трехмерной формой с минимальными потерями материала (рис. 2-б) без нахлеста ткани или швов и изменения свойств ткани, и таким образом сократить

затраты времени и материалов на производство деталей сложной формы.

3D-вязанный материал, указанный в работе [9], отличается возможностью создания 3D-структур, эластичных в трех направлениях хуз и практически любых пространственных форм: куб, конус, пирамида, цилиндр, сфера и др., включая внутренние полости, а также возможностью изготавливать как регулярные, так и нерегулярные изделия, меняя регулярность в процессе производства в трех направлениях хуз (рис. 2-в). За счет комбинирования ни-

тей с различными свойствами в одном материале можно придать готовому изделию требуемые свойства, например, повысить прочность, жесткость, эластичность, проводимость и т.д. Указанный материал имеет достаточно широкий спектр областей применения: от бытовой и специальной одежды до наполнителей для матрасов и подушек. В последнем случае преимуществом применения объемного трикотажа являются его хорошие релаксационные свойства, позволяющие создать материал с памятью формы.

3D-плетение – один из текстильных технологических процессов, благодаря которому можно получить большое разнообразие сложных цельных форм, обладающих высоким сопротивлением к разрушению. Технология 3D плетения является развитием технологии 2D-плетения, в которой материал получают путем переплетения двух или более систем нитей, образуя таким образом цельную конструкцию. Технологией плетения можно получить изделие с заданными параметрами длины, ширины, толщины, углом наклона нитей [12]. В процессе плетения могут быть использованы оправки сложных форм с переменным поперечным сечением или длиной, с узлами крепления или отверстиями, которые также оплетаются при выработке материала, что позволяет сократить количество этапов отделки детали и улучшить механические характеристики за счет непрерывности армирующего волокна в месте крепления [6].

Технология 3D-плетения имеет ряд недостатков. Основным недостатком традиционной технологии плетения заключается в трудности получения деталей с требуемой толщиной, если только оправка не подвергается многократной оплетке. При этом в этом случае получится многослойная структура без связности по толщине материала. По сравнению с другими текстильными процессами плетением можно изготовить преформы небольшого размера относительно размера оборудования. Кроме того, производство преформ большой длины может быть медленным из-за необходимости повторной подачи пряжи на движущиеся носители, которые в идеале

должны быть маленькими и легкими для быстрого производства оплетки [6].

Современные технические возможности позволяют объединить несколько текстильных методов, получив таким образом материал с новыми свойствами. Текстильные гибридные композиты, состоящие из тканых, вязаных и плетеных материалов – новое направление в текстильных композициях.

Механические характеристики вязаных композитов ниже, чем тканых и плетеных, из-за строения петель волокон, с другой стороны, вязаные материалы обладают более высокими формообразующими характеристиками, чем тканые и плетеные [13...16]. Например, можно получить, с одной стороны жесткость тканого слоя и гибкость вязаного. Более того, вязаные материалы более объемные, таким образом можно достичь большой толщины композита меньшим количеством слоев, по сравнению с ткаными материалами [16].

Комбинированием текстильных материалов, полученных различными технологиями, можно повысить механические характеристики и снизить затраты на производство композиционного материала [16].

Комбинированные материалы, объединяющие в себе текстильный метод изготовления нетканых полотен и швейный метод технической вышивки, могут использоваться в качестве защитных накладок для бронежилетов и защитной одежды [17].

К швейным методам изготовления преформ для ПКМ относятся методы прошивки и автоматической вышивки – настрачивание и тафтинг.

Прошивка – наиболее простая из приведенных здесь технологий и не требует значительных затрат на специализированное оборудование. Стандартное швейное оборудование подходит для прошивки преформ из стекло- и углеволокна [6].

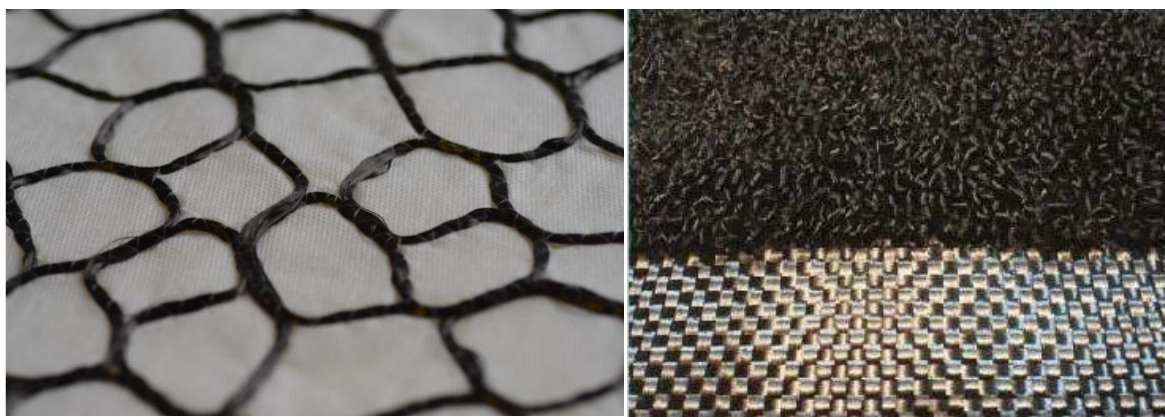
Процесс прошивки имеет свои недостатки, главным из которых является снижение свойств в плоскости получаемого композиционного материала (то есть при растяжении, сжатии, сдвиге и т.д.). При проколе ткани иглой возникают локальные повреждения волокон и деформация ткани,

что снижает механические характеристики композита [6], [18].

Разновидностью прошивки, которая может быть использована для локализованного плоского армирования вместе с армированием по толщине, является техническая вышивка. В этом процессе армирующая нить подается на траекторию движения вышивальной головки и пришивается к поверхности преформы (рис. 3-а). С помощью современных вышивальных головок с компьютерным управлением возможно точное настраивание армирующей нити по довольно сложным траекториям, что позволяет армировать участки детали с высокой нагрузкой волокнами, уложенными в направлении максимальной нагрузки. Современное оборудование ограничивает размер преформ, изготовленных таким способом, но преимуществом процесса является

высокий уровень автоматизации. Этот метод производства также можно рассматривать как вариант технологии укладки волокон [6].

Значительный интерес представляет технология трехмерного армирования слоистых преформ способами тафтинга, позволяющими локально и в заданном направлении вводить в структуру наполнителя армирующих нитей различных видов практически без их повреждения. Процесс тафтинга заключается в прошивании стежками нити основы в вертикальном направлении (рис. 3-б). В качестве первичной основы может выступать тканое или нетканое полотно. Рис. 3 – швейные методы армирования: а — техническая вышивка на водорастворимой основе; б – тафтинг.



а)

Рис. 3

б)

В этом случае трехмерное армирование осуществляется за счет введения в наполнитель Z-направленных нитей в заданных зонах и направлениях, что позволит повысить прочности на удар, сдвиг и расслаивание [19].

По сравнению с традиционной технологией прошивки, в процессе которой в толщине преформы образуется узел, что ухудшает прочностные характеристики готовой детали, при тафтинге можно избежать натяжения и снижения прочности.

Преимущества тафтинга заключаются также в том, что можно получить разнотолщинные и/или сетчатые полотна в процессе их выработки, с заданной плотностью

наполнения в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Вес преформы, изготовленной методом тафтинга, зависит от материала нити и основы, плотности прошивки и высоты ворса.

В процессе тафтинга возможно армировать преформу по толщине практически под любым углом, что недоступно при армировании другими текстильными и швейными методами. Чаще всего углы при армировании тафтингом составляют 45, 60 и 90°. Армирование преформы под углом 45° улучшает прочностные характеристики при изгибе и сдвиге, а при армировании под углом 60° возрастает прочность на сжатие [19], [20].

Кроме того, преимущество тафтинга заключается в малой истираемости нити и малом повреждении структуры материала в процессе вышивки, по сравнению с методом прошивки.

Все рассмотренные технологии армирования позволяют получить более прочные и легкие армированные конструкции, по сравнению с традиционными текстильными и швейными технологиями. Еще больше возможностей предоставляют конструкции со структурой природных оболочек

Одним из примеров нерегулярных сетчатых структур являются структуры природных оболочек, которые, кроме того, обладают малым весом и большой прочностью. В природе встречается много примеров армированных 2D (крылья насекомых, листья растений, паутина) и 3D-структур (человеческая кость, стебель бамбука, древесина, кость каракатицы, пчелиные соты).

Легкие сетчатые композиты, спроектированные по принципу строения природных объектов и состоящие из взаимосвязанной сети нитей (жилок), образующих стороны ячеек, представляют собой новый класс высокоэффективных конструкционных материалов [21], [22].

Так же, как и в текстильных материалах, на свойства природных структур влияет их геометрическое строение [23...25], но их сложность и многообразие позволяют найти новые подходы к проектированию композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Используя особенности строения, присущие природным материалам и формам, становится возможным разработать новые подходы к проектированию конструкционных изделий с улучшенными прочностными и весовыми показателями, так как природные объекты обладают уникальными характеристиками, включающими эффективное использование материала и распределение сил при значительной прочности конструкции [23], [27]

В области проектирования инновационных эффективных армирующих структур все большее развитие получает применение

принципов геометрического строения природных оболочек. С точки зрения разработки методов проектирования особый интерес представляют принципы роста растений [28] и построения диаграммы Вороного, позволяющий достаточно быстро получить схему армирования, подобную рисунку жилкования крыла стрекозы в автоматизированном режиме [22], [29], [31].

Проведенный анализ существующих текстильных и швейных методов армирования преформ для деталей из ПКМ позволяет заключить, что постоянно возрастающие сложность авиационных конструкций и предъявляемые к ним требования диктуют направление развития методов армирования и совершенствования и автоматизации оборудования. Наряду с традиционными технологиями все большее распространение получают инновационные методы получения преформ и материалов нового поколения, более эффективных по прочностным, весовым и экономическим показателям. Наибольшие перспективы в этой области представляет проектирование армированных преформ с нерегулярной структурой, а также со структурой природных оболочек, так как они обладают оптимальным соотношением весовых и прочностных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stig F.* 3D-woven Reinforcement in Composites. Doctoral Thesis // KTH School of Engineering Sciences. – Stockholm, Sweden, 2012.
2. *Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А.* Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017, №1(39). С. 22...27.
3. *Chiu C. H., Cheng C.C.* Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials // Textile Research Journal. – Vol. 73(1), 2003. P.37...41. doi:10.1177/004051750307300107
4. *Gu H., Zhili Z.* Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures. Materials and Design. 2002. – vol. 23(7). pp. 671 – 674. doi: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5
5. *Базаев Е.М.* Геометрия формообразования структур тканевых и тканых оболочек // Дизайн и Технологии. – 2008, № 8(50). С. 47...52.
6. *Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K.* 3D fibre reinforced polymer composites // Elsevier Science Ltd. – Oxford. 2002. ISBN 0-08-043938-1

7. *Khokar N.* 3D-weaving: Theory and practice // Journal of the Textile Institute. – Vol. 92(1), 2001. P.193...207. DOI:10.1080/00405000108659570
8. *Khokar N.* 3D fabric-forming process: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process // Journal of the Textile Institute. – Vol. 87(1), 1996. P.97...106. ISSN 00405000, 17542340
9. *Марченко Д.В.* Объемный трикотаж. 2018. Патент RU 2 689 446 С1.
10. *Mazumdar S. K.* Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. – CRC PRESS LCC. 2002. ISBN 0-8493-0585-3
11. *Lomov S. V.* Non-crimp fabric composites. Manufacturing, properties and applications. – Woodhead Publishing Limited, 2011. ISBN 978-1-84569-762-4
12. *Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А.* Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Электронный научный журнал "ТРУДЫ ВИАМ". – 2015, № 9. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26
13. *Sugimoto K., Fukui T., Inoda M., Nakai A., Hamada H.* Mechanical Properties of Knitted Composite with Flexible Interphase // 8th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, November 18-21, 2003.
14. *Ramakrishna S., Hamada H., Hull D.* The Effect of Knitted Fabric Structure on the Crushing Behaviour of Glass-Epoxy Composite Tubes // Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites. – John Wiley and Sons Ltd, 1995.
15. *Hirai Y., Hamada H., Kim J.K.* Damage Modes in Impact Loading of Glass Woven Fabric Composites. Advanced Composites Letters. – Vol. 5, №2, 1996. P.59...63. ISSN 0963-6935.
16. *Inoda M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H.* Mechanical Properties of Textile Hybrid Composite. Composites technologies for 2020 // Proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-4) University of Sydney. – Australia, 6-9 July 2004.
17. *Тамбовцева Е.П., Зарецкая Г.П., Руднева Т.В., Мезенцева Т.В.* Применение армирующих основ при изготовлении волокнистых наполнителей для деталей одежды из композиционных материалов // Light Conf 2021. "Наука - Технологии - Производство": Мат. Международн. науч.-технич. конф. 29-31 марта 2021 г. –СПб.: ФГБОУВО "СПбГУПТД", 2021. С. 10. ISBN 978-5-7937-1990-2
18. *Mouritz A.P., Leong K.H., Herszberg I.* A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites. Composites Part A // Applied Science and Manufacturing. – Vol. 28, Is. 12, 1997. P. 979...991. doi:10.1016/S1359-835X(97)00057-2
19. *Lingshan Liu.* Development and optimisation of the tufting process for textile composite reinforcement. Doctoral Thesis. Universite de Lille. – 2017.
20. *Dell'Anno G., Treiber J.W.G., Partridge I.K.* Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – Vol. 37. P. 262...272. Doi:10.1016/j.rcim.2015.04.004
21. *Thiyagarajan K.* Bio Inspired Lightweight Composite Material Design for 3D Printing. Master Thesis. South Dakota State University.– 2017.
22. *Mirzaani M.J.* Using Bio-Inspired design elements in the fabrication of cellular materials with special properties and functionalities. Doctoral Dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. – Milano, Italia, 2017.
23. *Darvishani-Fikouhi S.* Honeycomb Topologies; Design Rationalization of a free-form space frame structure. Master Thesis. – University College London. 2009.
24. *Thompson D.A.W.* On growth and form // Cambridge University Press. – Cambridge, 1992.
25. *Руднева Т.В.* Разработка метода проектирования швейных изделий по принципу строения природных оболочек: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУДТ, 2015.
26. *Руднева Т.В., Базаев Е.М.* Армирование композитов по принципу строения природных оболочек // Сб. докл. Междунар. научн.-практ. конф.: Интеграция науки и образования. – Уфа: РИО "Омега Сайнс", 2014. С. 162...164.
27. *Milwich M., Speck T., Speck O., Stegmaier T., Planck H.* Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom // American Journal of Botany. – Vol.93(10), 2006. P.1455...1465.
28. *Pochel T.* Simple Model for the Growth of Ramified Leaf Structures // Chaos, Solitons & Fractals. – Vol. 4, №10, 1994. P. 1883...1888.
29. *Dimcic M.* Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms. Institut fuer Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen. – Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-922302-32-2
30. *Saraptzian K.* Irregular structural grid systems: The design of non-standard architectural forms with structural complexity. – PhD Thesis. Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Thessaloniki, 2017.
31. *Махмудова Г., Руднева Т.В., Базаев Е.М., Стаханова С.И., Таишулатов С.Ш., Сулейменова У.Т.* Разработка классификации характеристик строения природных армирующих оболочек //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, №1. С. 85...88.

REFERENCES

1. Stig F. 3D-woven Reinforcement in Composites. Doctoral Thesis // KTH School of Engineering Sciences. – Stockholm, Sweden, 2012.
2. Bogomolov P.I., Kozlov I.A., Birulya M.A. Review of modern technologies for the manufacture of volume-reinforcing preforms for advanced composite materials. Technical and technological problems of service. – 2017, No. 1 (39). P. 22...27.
3. Chiu C.H., Cheng C.C. Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials //Textile Research Journal. – Vol. 73(1), 2003. P.37...41. doi:10.1177/004051750307300107

4. Gu H., Zhili Z. Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures. *Materials and Design*. 2002. - vol. 23(7). P. 671 – 674. doi: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5
5. Bazaev E.M. Geometry of shaping structures of fabric and woven shells // *Design and Technologies*. - 2008, No. 8 (50). P. 47...52.
6. Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K. 3D fiber reinforced polymer composites // Elsevier Science Ltd. — Oxford. 2002. ISBN 0-08-043938-1
7. Khokar N. 3D-weaving: Theory and practice // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 92(1), 2001. P.193...207. DOI:10.1080/00405000108659570
8. Khokar N. 3D fabric-forming process: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 87(1), 1996. P.97...106. ISSN 00405000, 17542340
9. Marchenkov D.V. Bulky knitwear. 2018. Patent RU 2 689 446 C1.
10. Mazumdar S. K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. – CRC PRESS LCC. 2002. ISBN 0-8493-0585-3
11. Lomov S. V. Non-crimp fabric composites. manufacturing, properties and applications. – Wood-head Publishing Limited, 2011. ISBN 978-1-84569-762-4
12. K. I. Donetskskii, A. E. Raskutin, P. A. Khilov, Yu. Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials (review) // *Electronic scientific journal "WORKINGS OF VIAM"*. – 2015, No. 9. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26
13. Sugimoto K., Fukui T., Inoda M., Nakai A., Hamada H. Mechanical Properties of Knitted Composite with Flexible Interphase // 8th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, November 18-21, 2003.
14. Ramakrishna S., Hamada H., Hull D. The Effect of Knitted Fabric Structure on the Crushing Behaviour of Glass-Epoxy Composite Tubes // *Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites*. – John Wiley and Sons Ltd, 1995.
15. Hirai Y., Hamada H., Kim J.K. Damage Modes in Impact Loading of Glass Woven Fabric Composites. *Advanced Composites Letters*. – Vol. 5, No. 2, 1996. P.59...63. ISSN 0963-6935.
16. Inoda M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H. Mechanical Properties of Textile Hybrid Composite. *Composites technologies for 2020 // Proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-4) University of Sydney*. – Australia, 6-9 July 2004.
17. Tambovtseva E.P., Zaretskaya G.P., Rudneva T.V., Mezentseva T.V. The use of reinforcing bases in the manufacture of fibrous fillers for clothing parts from composite materials // *Light Conf 2021. "Science - Technology - Production": Mat. International. scientific and technical conf. March 29-31, 2021 - St. Petersburg: FGBOUVO "SPbGUPTD"*, 2021. P. 10. ISBN 978-5-7937-1990-2
18. Mouritz A.P., Leong K.H., Herszberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing*. – Vol. 28, Is. 12, 1997. P. 979...991. doi:10.1016/S1359-835X(97)00057-2
19. Lingshan Liu. Development and optimization of the tufting process for textile composite reinforcement. doctoral thesis. University of Lille. – 2017.
20. Dell'Anno G., Treiber J.W.G., Partridge I.K. Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. – Vol. 37. P. 262...272. Doi:10.1016/j.rcim.2015.04.004
21. Thiyagarajan K. Bio Inspired Lightweight Composite Material Design for 3D Printing. Master Thesis. South Dakota State University.– 2017.
22. Mirzaani M.J. Using Bio-Inspired design elements in the fabrication of cellular materials with special properties and functionalities. doctoral dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. – Milano, Italia, 2017.
23. Darvishani-Fikouhi S. Honeycomb Topologies; Design Rationalization of a free-form space frame structure. Master Thesis. – University College London. 2009.
24. Thompson D.A.W. On growth and form // Cambridge University Press. – Cambridge, 1992.
25. Rudneva T.V. Development of a method for designing garments based on the principle of the structure of natural shells: Dis. ... cand. tech. Sciences. – M.: MGUDT, 2015.
26. Rudneva T.V., Bazaev E.M. Reinforcement of composites according to the principle of the structure of natural shells // *Sat. report International scientific-practical Conf.: Integration of science and education*. - Ufa: RIO "Omega Science", 2014. S. 162 ... 164.
27. Milwich M., Speck T., Speck O., Stegmaier T., Planck H. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom // *American Journal of Botany*. – Vol.93(10), 2006. P.1455...1465.
28. Pochel T. Simple Model for the Growth of Ramified Leaf Structures // *Chaos, Solitons & Fractals*. – Vol. 4, No. 10, 1994. P. 1883...1888.
29. Dimcic M. Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms. Institute fuer Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen. – Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-922302-32-2
30. Saraptzian K. Irregular structural grid systems: The design of non-standard architectural forms with structural complexity. – PhD Thesis. Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Thessaloniki, 2017.
31. Makhmudova G., Rudneva T.V., Bazaev E.M., Stakhanova S.I., Tashpulatov S.Sh., Suleimenova U.T. Development of a classification of the characteristics of the structure of natural reinforcing shells // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2018, No. 1. P. 85...88.

Поступила 25.10.21.

КУЛИРНЫЙ ТРИКОТАЖ КАК НАПОЛНИТЕЛЬ КОМПОЗИТОВ

THE WEFT-KNITTED FABRIC AS A COMPOSITE REINFORCING COMPONENT

A.V. ТРУЕВЦЕВ, Е.С. ЦОБКАЛЛО

A.V. TRUEVTSEV, E.S. TSOBKALLO

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: alexistrue@rambler.ru

Обобщены работы, проведенные в 2008-2021 гг. Получены и исследованы образцы композитов на основе эпоксидной смолы и кулирного трикотажа переплетений кулирная гладь и ластик 1+1. Установлено, что растяжимость трикотажа не оказывает существенного влияния на прочность армируемого им композита. Максимальная прочность композита достигается при модуле петли выше 35. По механическим свойствам композит с кулирным трикотажным наполнителем очень близок к композитам с квазинепрерывным армированием, например, отдельными однонаправленными нитями. Показана возможность применения кулирного трикотажа для получения композиционных изделий сложной формы.

The paper presents a glimpse on investigations made at St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design in during 2008-2021 devoted to the estimation of strength of the textile composites reinforced by plain-knitted and Rib 1 x 1 structures. The obtained data demonstrate that the knitted fabric strain properties don't affect on the strength of the composite. The best mechanical properties can be reached if the ratio of loop length to the yard diameter is greater than 35. The obtained data demonstrate that knitted structure behavior in the composite material is equal to that of parallel yarns of limited length reinforcing quasi-continuous composites. The examples of application the weft-knitted structures for the producing the composite objects of high curvature surfaces are shown.

Ключевые слова: композиционный материал, прочность, растяжимость, кулирная гладь, ластик 1+1.

Keywords: reinforced composite, strength, weft-knitted fabric, plain-knitted structure, Rib 1x1.

Введение

Современная эпоха диктует необходимость разработки новых конструкционных материалов, и одним из наиболее перспективных подходов к решению этой задачи по праву считается создание текстильно-армированных композитов. Ткани и нетканые материалы в качестве наполнителя конструкционных композитов используются достаточно давно [1]. В последние 15...20

лет их начал активно вытеснять мультиаксиальный основовязанный трикотаж [2], представляющий собой несколько систем параллельных нитей, пересекающихся друг с другом под определенным углом и скрепленных каким-либо основовязанным переплетением. Однако представить в роли наполнителя "обычный" кулирный трикотаж еще совсем недавно представлялось маловероятным, поскольку, согласно клас-

сическим представлениям теории композитов, материал годится для армирования только в том случае, если его разрывное удлинение меньше, чем у матрицы, а прочность – больше, иначе от армирования не будет достигнуто никакого полезного эффекта [3].

Поскольку кулирный, или поперечновязанный, трикотаж не соответствует данным требованиям [4], то и сама возможность его применения в подобном качестве считалась бессмысленной. Это мнение настолько укрепилось в сознании специалистов, что если структуры кулирного трикотажа и фигурировали в публикациях, посвященных композитам, то лишь в качестве грунта для прокладывания горизонтальных или вертикальных уточных нитей, воспринимающих внешнюю нагрузку [5], [6]. Такие моно- или биаксиальные полотна по свойствам кардинально отличаются от "обычного" кулирного трикотажа [7], приближаясь по растяжимости к тканям и мультиаксиальному основовязаному трикотажу.



Рис. 1

Тем не менее, уникальные свойства поперечновязанных трикотажных полотен, и прежде всего способность принимать сложные пространственные формы путем вязания изделия по заданном контуру, а также гипотетическая возможность обтягивания трикотажем различных поверхностей (рис. 1 – обтягивание кулирным трикотажем пехотной каски образца 1915 года для изготовления реплики исторического объекта (из коллекции проф. А. В. Арановича)) с по-

следующим заливанием пластмассой, открывающие захватывающие перспективы, эпизодически привлекали внимание исследователей. Однако немногочисленные статьи, рассматривавшие данную проблему, ограничивались описанием (или прогнозированием) механических свойств вязаных материалов и рассуждением о возможностях их использования в качестве армирующего компонента композита [8], [9]. О каких-либо результатах практической реализации упомянутых возможностей в них не упоминалось.

Вместе с тем, описанная выше привлекательность кулирного трикотажа для получения изделий сложной формы была столь высока, что на кафедре технологии и художественного проектирования трикотажа (ТХПТ) и кафедре инженерного материаловедения и метрологии (ИММ) Санкт-Петербургского университета промышленных технологий и дизайна был проведен ряд экспериментов, подтвердивших возможность эффективного армирования композитов поперечновязанным трикотажем [10]. В частности, было обнаружено, что растяжимость кулирного трикотажа не влияет на прочность армируемого им композита [11], поэтому даже высокорастяжимый трикотаж может быть использован для получения композитных объектов сложной пространственной формы путем обтягивания им заготовки заданной конфигурации. Этот феномен объясняется тем, что общеизвестная высокая растяжимость кулирного трикотажа вне композита обусловлена возможностью легкого скольжения нити по нити в смежных петлях. Однако, будучи помещенным в полимерную матрицу, трикотаж кардинальным образом меняет свои свойства – точки контакта между петлями уже не могут свободно смещаться, и удлинение возможно лишь за счет деформирования нитей, растяжимость которых на 1...2 порядка ниже, чем у вязаной структуры в свободном состоянии.

Постановка задачи

В композиционных материалах, или композитах, компоненты можно разделить на матрицу (связующее) и включенные в нее армирующие элементы (наполнители).

В этих материалах армирующие элементы обеспечивают нужные механические свойства, а матрица обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды. Армирование можно разделить на дискретное (например, в бетоне), непрерывное (например, в текстолите) и квазинепрерывное. К последнему обычно относят армирование матрицы короткими однонаправленными нитями (рис. 2 – виды армирования и примеры их реализации).

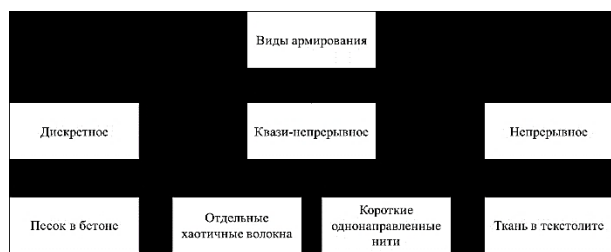


Рис. 2

Можно предположить, что механизм армирования композита кулирным трикотажем наиболее близок к этому варианту. Например, при продольном нагружении такого композита петельная палочка выступает в качестве армирующего отрезка нити. Согласно теории композитов [12] должна существовать некая "критическая длина" отрезка, после превышения которой прочность материала резко повышается. На рис. 3 изображены: а) петельная структура кулирного трикотажа, б) элементы петли, на которые действует внешняя нагрузка (выделены черным цветом), в) пространственная ориентация элементов петли, г) условная модель "квазинепрерывного армирования" короткими однонаправленными нитями, предложенная кафедрами ТХПТ и ИММ в работах [13], [14].

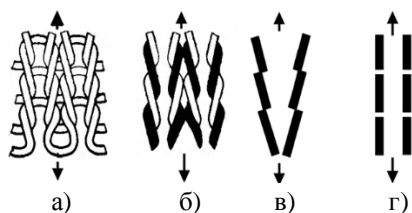


Рис. 3

Модель "квазинепрерывного армирования" позволяет объяснить феномен наличия армирующего эффекта при использовании кулирного трикотажа в качестве наполнителя композита. Для иллюстрации данного подхода следовало создать модельный материал и исследовать влияние длины армирующего отрезка нити (в нашем случае – петельной палочки) на прочность получаемого композита.

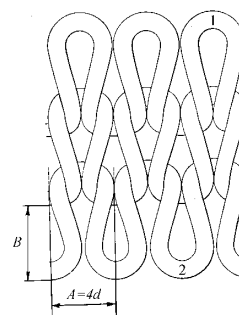


Рис. 4

На рис. 4 изображен кулирный трикотаж (A – петельный шаг, мм; B – высота петельного ряда, мм; d – диаметр нити, мм). Петли, расположенные горизонтально, образуют петельный ряд, а петли, расположенные вертикально – петельный столбик. Вертикально ориентированные участки нитей называются "петельными палочками". Именно они воспринимают продольную нагрузку, приложенную к образцу трикотажа. Согласно теории вязания А.С.Далидовича [15] длина петельных палочек в кулирном трикотаже не очень высокой плотности практически неотличима от высоты петельного ряда B . Поэтому в дальнейшем длину армирующего отрезка нити будем оценивать по этой характеристике.

Методы

Поскольку ранее было установлено [10], что прочность нити влияет на прочность композита, армированного трикотажем, для экспериментов было решено использовать высокопрочные комплексные нити: параарамидную нить "Херакрон" ("Kolon Industries", Южная Корея, 110 текс) и нить на основе сверхвысокомодульного полиэтилена "Дайнема" ("DSM High Perfor-

mance Fibers", Нидерланды, 176 текс). Реальная нить всегда обладает определенной неровнотой (по диаметру, по линейной плотности). Если речь не идет о монопитах, то над поверхностью всегда присутствуют кончики отдельных волокон, что особенно характерно для пряжи. У комплексной нити повреждения отдельных филаментов также вызывают образование ворсинок. Ворсистость может существенно сказываться на протекании процесса петлеобразования, повышая "цепкость" нити при огибании ею нитенаправителей и петлеобразующих органов вязальной машины, причем эта "цепкость" может быть не связана с величиной коэффициента трения нити о сталь. Данный факт был подтвержден экспериментально при вязании нити "Дайнема" на плосковязальной машине: при весьма низком коэффициенте трения нити о сталь ($\mu=0,28$; для сравнения – у хлопчатобумажной пряжи этот показатель равен 0,32, а у ПАН пряжи – 0,34), она активно цеплялась за различные выступы на нитенаправителях. То же самое, хотя и в меньшей степени, наблюдалось при вязании нити "Херакрон" ($\mu=0,44$). Это можно объяснить очень низким коэффициентом трения нити о нить как у "Дайнемы" (0,13), так и у "Херакрона" (0,21), для сравнения – у хлопчатобумажной пряжи этот показатель равен 0,47, у ПАН пряжи – 0,32. Исследуемые высокопрочные нити настолько "скользкие", что трение филамента о филамент ниже, чем филамента о сталь. Возможно, поэтому отдельные филаменты зацепляются за направляющие поверхности машины и вытаскиваются из структуры комплексной нити.

При выборе нити для изготовления наполнителя композита была применена методика оценки вязальной способности нити Труевцева–Молоснова [13], учитывающая указанные свойства нити. Кроме параарамидной нити "Херакрон" в отдельных опытах использовалась хлопчатобумажная пряжа линейной плотности 29 x 2 текс, как обладающая исключительно высокой адгезией к эпоксидной смоле, а потому весьма ценная для вязания образцов, предназначенных для проведения модельных экспериментов. Подходя к выбору переплетения кулирного трикотажа, необходимо учитывать следующие требования:

- полотно должно иметь равномерную однотипную структуру, следовательно, это не должен быть рисунчатый трикотаж;
- полотно должно позволять смоле проникать в свободное пространство между нитями, следовательно, это не должен быть производный трикотаж, который, как известно, имеет очень плотную структуру;
- полотно не должно закручиваться, следовательно, это должен быть двойной трикотаж (ластичный).

Изготовление образцов выполнялось на двухфонтурных машинах "Silver Reed" типа SK (Япония). Они выпускаются разных классов (4, 5, 7). Это создает возможность связать образцы из нити одной линейной плотности как очень плотной, так и очень редкой структуры, что позволит глубже изучить процессы армирования композита кулирным трикотажем и проверить гипотезу о квазинепрерывном его характере. Для получения максимально возможного диапазона плотностей были выбраны машины 4 и 7-го классов.

Таблица 1

№ опыта	Класс машины	Показания лимба на кулирном клине	Длина нити в петле l , мм	Петельный шаг A , мм	Высота петельного ряда B , мм	Плотность по горизонтали P_r , петель/дм	Плотность по вертикали P_v , петель/дм	Поверхностная плотность трикотажа ρ_s , г/м ²
1		2	7,3	2,5	1,4	80	70	484
2	7	5	10,1	2,8	2,1	72	47	399
3		10	14,6	3,7	3,7	59	27	247
4		R	15,8	4,0	3,8	50	26	241
5	4	5	20,6	5,0	4,5	40	20	212
6		10	26,6	7,6	5,3	26	19	153

В табл. 1 представлены условия вязания и технологические параметры образцов трикотажа переплетения ластик 1+1 из хлопчатобумажной пряжи линейной плотности 29×2 текс×2.

Для изготовления образцов композита был применен метод ручной выкладки, после чего они выдерживались при температуре 20°С в течение суток. В качестве матрицы была использована эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель полиэтиленполиамин. Для проведения прочностных испытаний образцы имели ширину 50 мм и толщину 4,5...5 мм. Разрывные характеристики композитов были получены на измерительном комплексе Instron-1195; скорость растяжения образцов составляла 50 мм/мин; зажимная длина образцов – 50 мм (разрыв образца изображен на рис. 5).

Результаты и обсуждение

Полученные данные сведены в табл. 2 (зависимость прочности композитов от высоты петельного ряда трикотажа). Введем величину удельной разрывной нагрузки композита как величину усилия, приходящегося на один петельный столбик. Для ис-

следуемых в работе образцов, имеющих ширину 50 мм, можно записать:

$$P_{уд} = 2P_p / \Pi_{г},$$

где $P_{уд}$ – удельная разрывная нагрузка композита, Н; P_p – разрывная нагрузка образца композита, Н; $\Pi_{г}$ – плотность по горизонтали, петельных столбиков/дм.



Рис. 5

Т а б л и ц а 2

№ опыта	Высота петельного ряда В, мм	Модуль петли ℓ/d	Разрывная нагрузка композита P_p , Н	Удельная разрывная нагрузка композита $P_{уд}$, Н/пет.ст.
1	1,4	17	647±136	16
2	2,1	23	675±105	19
3	3,7	34	600±57	20
4	3,8	37	712±100	29
5	5,0	48	687±48	34
6	5,3	62	820±82	63

Из полученных результатов видно, что при нагружении вдоль петельных столбиков решающим фактором в прочности композита является высота петельного ряда, так как в роли отрезка однонаправленной дискретной нити оказалась петельная палочка. Существенным результатом является то, что при достижении определенного "критического" значения длины петельной палочки наблюдается резкое увеличение удельной разрывной нагрузки композита. Для исследуемых образцов такой "критической" областью значений В можно считать

4,5...5,0 мм. Этот результат хорошо согласуется со свойствами композитов, имеющих квазинепрерывное армирование, например, армированных дискретными однонаправленными нитями, и характерным для них наличием понятия "критической длины" отрезка нити, после превышения которой прочность композиционного материала существенно возрастает.

Оценим эффективность армирования композита трикотажным полотном. Эффективным следует считать такой вариант армирования, который обеспечивает макси-

мальную прочность при минимальном расходе армирующего материала. Универсальным показателем расхода сырья можно считать модуль петли m , представляющий собой отношение длины нити в петле ℓ к диаметру нити d [15]. Проведенный эксперимент показал, что в исследуемом широком диапазоне модуля петли более разреженная структура трикотажа обеспечивает наиболее эффективное армирование. Оно начинает существенно возрастать при модуле петли более 35. Из данного факта неизбежно вытекает вывод о том, что кулирный трикотаж высокой плотности (с модулем петли обычно не более 23), традиционно выпускаемый промышленностью, практически не может упрочнять композит. Этим объясняется тот факт, что до сих пор кулирный трикотаж не применяется в каче-

стве наполнителя композитов: по-видимому, если такие поисковые работы и проводились, то заканчивались неудачей, поскольку в них использовался трикотаж стандартной плотности, высококачественный с точки зрения производства одежды, но непригодный для армирования композита.

Данное предположение было проверено нами экспериментально и сведено в табл. 3 (модуль петли образцов трикотажа переплетения ластик 1+1 и прочность композитов с полипропиленовой матрицей при изгибе). Испытания проводились на измерительном комплексе "Инстрон", где был смоделирован режим изгиба сосредоточенной силой образца, свободно лежащего на двух опорах (ГОСТ 4648–2014; ISO 178:2010).

Таблица 3

Наполнитель	Линейная плотность пряжи, текс	Модуль петли	Разрушающее напряжение, МПа
Без наполнителя	-	-	32
Ластик 1+1	11,8 x 1 x 2	22	45
Ластик 1+1	11,8 x 1 x 2	56	80

В то же время проведенные нами ранее эксперименты показали, что прочность нити существенно влияет на прочность трикотажного композита: армирование кулирным трикотажем из параарамидной комплексной нити "Херакрон" (Корея) 110 текс дает упрочнение исходной пластмассы (эпоксидной смолы) в несколько раз, что наглядно демонстрируют данные, пред-

ставленные в табл. 4 (зависимость прочности при растяжении образцов композита от структуры кулирной глади (трикотажа-наполнителя) из параарамидной нити). Прочность пластмассы без армирования составила 60 МПа. Легко видеть, что рост модуля петли приводит к заметному упрочнению композита.

Таблица 4

Нить	Длина петельной палочки (высота петельного ряда), мм	Модуль петли	Плотность по горизонтали, пет./дм	Разрывная нагрузка композита, Н	Разрушающее напряжение композита, МПа	Коэффициент армирования	Удельная разрывная нагрузка композита, Н/пет.ст
Комплексная нить "Херакрон" 110 текс	2,17	30	36	3176	130	2,2	176
	2,94	36	25	4397	180	3,0	352
	3,03	42	20	4886	200	3,3	489

Учитывая полученные в настоящей работе результаты, можно утверждать, что наиболее эффективное армирование композита кулирным трикотажным полотном можно получить при использовании трико-

тажа разреженной структуры, связанного из высокопрочных нитей.

Конструкционным изделием из композиционного материала на основе трикотажа может быть любой объект сложной формы,

к примеру, труба, которая будет служить в сантехнических, водосточных, вентиляционных или иных подобных системах. Основные преимущества такого изделия перед традиционным (металлическим) – отсутствие швов от сварки, резьбовых соединений, стойкость к коррозии, малый вес. Наполнитель композита можно сделать "трубчатым". В технологии трикотажа даже известна структура, которая так и называется – "трубчатая кулирная гладь". Это обычная кулирная гладь, получаемая на однофонтурной кругловязальной машине, которая всегда вяжет полотно в виде трубки некоторого диаметра. Однако трубка из кулирной глади может быть получена и на двухфонтурной плосковязальной машине: при движении каретки вправо вяжется гладь на передней игольнице, а при движении каретки влево – на задней игольнице. При правильной установке расстояния между игольницами ("зева") будет получена структура, неотличимая от глади, связанной на однофонтурной кругловязальной машине. Такой способ вязания и соответствующий режим работы клиньев могут быть реализованы практически на любой промышленной плосковязальной машине.

Для изготовления образца композитной трубы ("реплики") была выбрана 2-дюймовая (51-мм) металлическая труба ("оригинал"). Ее периметр равен 51π, или 160 мм. Следовательно, ширина сложенной вдвое трикотажной трубки, которой будет обтянут оригинал, должна равняться 80 мм. Если воспользоваться расчетом технологических параметров трикотажа из параарамидной нити "Херакрон" 110 текс с учетом ее жесткости и коэффициента трения, которые приведены в книге [16], получим петельный шаг $A=2,76$ мм. Таким образом, на каждой игольнице двухфонтурной плосковязальной машины должно работать $80:2,76 = 29$ игл.

Для вязания спроектированной трубки был выбран плосковязальный автомат CMS-320.6 ("Штоль", ФРГ) 7 класса. Получение трикотажа с заложенной в расчет длиной нити в петле 10,7 мм (то есть модуль петли 32) было обеспечено установкой "машинной плотности" 15 усл. ед. (задается

в программе вязания). По технологии, описанной в работе [13], была изготовлена композитная труба (матрица – эпоксидная смола, наполнитель – спроектированная кулирная гладь из параарамидной нити). Она изображена на рис. 6. Начальные и конечные ряды из хлопчатобумажной пряжи (нить белого цвета) предусмотрены для облегчения бездефектной заработки края изделия.



Рис. 6

Предложенное решение открывает широкие возможности для изготовления конструкций самого различного назначения. В частности, можно изготавливать недорогие реплики исторических предметов для военно-исторических реконструкций (см. рис. 1) или театральных постановок [17], [18], выполнять строительные и реставрационные работы [19] с получением декоративных поверхностей сложной формы.

В Ы В О Д Ы

Из вышеизложенного следует, что кулирный трикотаж позволяет проектировать и создавать реплики самых разнообразных объектов, что было продемонстрировано нами в ряде публикаций по данному вопросу. Существенно, что сложность поверхности не является препятствием для получения бесшовного наполнителя. Этот факт обеспечивает простоту изготовления армирующего каркаса и стабильность толщины получаемого композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Агапов В.А., Карасева А.А. Будущее за мультиаксиальным трикотажем // Курьер легкой промышленности. – 2005, № 3. С.12...14.
3. Белозеров Б.П., Гузеев В.В., Перепелкин К.Е. Свойства, технология переработки и применение пластических масс и композиционных материалов. – Томск: Издательство НТЛ, 2004.
4. Торкунова З. А. Испытания трикотажа / 2-е изд., перераб. – М.: Легпромбытиздат, 1985.
5. Peled A., Bentur A. Mechanisms of fabric reinforcement of cement matrices // Beton- und Stahlbetonbau. – Vol. 99, № 6, 2004. P. 456...459.
6. Popescu M., Reiter L., Liew A. et al. Building in concrete with an ultra-leightweight knitted stay-in-place formwork: prototype of a concrete shell bridge // Structures. – № 14, 2018. P. 322...332.
7. Смирнов Л.С., Масленников Ю.И., Яворский В.Ю.. Технология тканевязанных материалов. – Киев: Техника, 1981.
8. Hong H., De Araújo M. D., Fangueiro R., Cibobanu O. Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement // Textile Research Journal. – Vol.72, № 11, 2002. P. 991...995.
9. Столяров О. Н. Технология производства вязанных полотен из текстильных нитей с высокими значениями деформационной жесткости // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2008, № 1. С. 49...52.
10. Труевцев А.В., Молоснов К.А., Беляева А.В., Дарвиш Д.М. Влияние вида нитей на механические свойства композитов, армированных трикотажем // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2011, № 1. С. 45...47.
11. Труевцев А.В., Молоснов К.А., Цобкалло Е.С., Макаренко С.В. Анализ влияния растяжимости трикотажа на прочность армируемого им композита // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, № 3. С. 80...84.
12. Капринос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. – Киев: Вища школа, 1977.
13. Молоснов К. А. Разработка трикотажных полотен для армирования композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2013.
14. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Квазинепрерывное армирование композита кулирным трикотажем // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2016, № 1. С. 64...67.
15. Далидович А.С. Основы теории вязания. – М.: Легкая индустрия, 1970.
16. Труевцев А. В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Молоснов К.А. Полимерные композиты с кулирным трикотажным наполнителем [Электронный ресурс]. – СПб.: СПбГУПТД, 2020.. Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2020157.

17. Куковьякина В.А., Макарова И.С. Применение трикотажа для изготовления реплик исторических предметов / Научн. рук. К. А. Молоснов, А. В. Аранович // Тез. докл. Дсеросс. конф. молодых ученых: Инновации молодежной науки. – СПб.: СПГУТД, 2013. С.177.

18. Молоснов К.А., Аранович А.В., Труевцев А.В. Применение композита, армированного кулирным трикотажем, для создания реплик исторических предметов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2013, № 2. С. 62...66.

19. Невтонова А.М., Кравчук Е.А. Трикобетон – альтернативный вариант армирования стройматериалов / Научн. рук. А. В. Труевцев, Н.А. Дромова // Тез. докл. Дсеросс. конф. молодых ученых: Инновации молодежной науки. – СПб.: СПбГУПТД, 2021. С. 560...561.

REFERENCES

1. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. etc. Composite materials. - M.: Mashinostroenie, 1990.
2. Agapov V.A., Karaseva A.A. The future belongs to multiaxial knitwear // Light Industry Courier. - 2005, No. 3. P.12 ... 14.
3. Belozеров B.P., Guzeev V.V., Perepelkin K.E. Properties, processing technology and application of plastics and composite materials. - Tomsk: NTL Publishing House, 2004.
4. Torkunova Z. A. Testing of knitwear / 2nd ed., revised. – M.: Legprombytizdat, 1985.
5. Peled A., Bentur A. Mechanisms of fabric reinforcement of cement matrices // Beton- und Stahlbetonbau. – Vol. 99, No. 6, 2004. P. 456...459.
6. Popescu M., Reiter L., Liew A. et al. Building in concrete with an ultra-heightweight knitted stay-in-place formwork: prototype of a concrete shell bridge // Structures. – No. 14, 2018. P. 322...332.
7. Smirnov L.S., Maslennikov Yu.I., Yavorsky V.Yu. Technology of fabric knitted materials. - Kiev: Technique, 1981.
8. Hong H., De Araújo M. D., Fangueiro R., Cibobanu O. Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement // Textile Research Journal. - Vol.72, No. 11, 2002. P. 991 ... 995.
9. Stolyarov, O.N., Technology for the production of knitted fabrics from textile threads with high values of deformation stiffness // Izv. universities. Light industry technology. - 2008, No. 1. P. 49 ... 52.
10. Truevtsev A.V., Molosnov K.A., Belyaeva A.V., Darvish D.M. Influence of the type of threads on the mechanical properties of composites reinforced with knitwear // Izv. universities. Light industry technology. - 2011, No. 1. P. 45 ... 47.
11. Truevtsev A.V., Molosnov K.A., Tsobkallo E.S., Makarenko S.V. Analysis of the effect of extensibility of knitwear on the strength of the composite reinforced by it. Izv. universities. Light industry technology. – 2015, No. 3. P. 80...84.

12. Kaprinos D.M., Tuchinsky L.I., Vishnyakov L.R. New composite materials. - Kyiv: Vishcha school, 1977.

13. Molosnov K. A. Development of knitted fabrics for reinforcing composite materials: Dis. ... cand. tech. Sciences. - St. Petersburg, 2013.

14. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A. Quasi-continuous reinforcement of the composite with knitwear // Izv. universities. Light industry technology. – 2016, No. 1. P. 64...67.

15. Dalidovich A.S. Fundamentals of the theory of knitting. – M.: Light Industry, 1970.

16. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Molosnov K.A. Polymer composites with knitted filler [Electronic resource]. - St. Petersburg: SPbGUPTD, 2020 .. Access mode: http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2020157.

17. Kukovyakina V.A., Makarova I.S. The use of knitwear for the manufacture of replicas of historical objects / Nauchn. hands K. A. Molosnov, A. V. Aranovich

// Abstracts. report Dseross. conf. young scientists: Innovations of youth science. - St. Petersburg: SPGUTD, 2013. P.177.

18. Molosnov K.A., Aranovich A.V., Truevtsev A.V. The use of a composite reinforced with knitwear to create replicas of historical objects // Design. Materials. Technology. – 2013, No. 2. P. 62...66.

19. Nevtanova A.M., Kravchuk E.A. Tricoconcrete - an alternative reinforcement of building materials / Nauchn. hands A.V. Truevtsev, N.A. Dromova // Proceedings. report Dseross. conf. young scientists: Innovations of youth science. - St. Petersburg: SPbGUPTD, 2021. P. 560 ... 561.

Рекомендована кафедрой технологии и художественного проектирования трикотажа. Поступила 25.10.21.

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_124

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЧНОСТИ

PROCEDURE FOR CALCULATION AND DESIGN OF TECHNICAL FABRICS FOR REINFORCEMENT OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS WITH GIVEN STRENGTH CHARACTERISTICS

*С.Г. СТЕПАНОВ, Д.А. БУЛАНОВ, В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Г.Ф. САГИТОВА,
Б.С. ТУРАКУЛОВ, С.Ж. АБДИКЕРИМОВ*

*S.G. STEPANOV, D.A. BULANOV, V.M. JANPAIZOVA, G.F. SAGITOVA,
B.S. TURAKULOV, S.ZH. ABDIKERIMOV*

**(Ивановский государственный политехнический университет, Российская Федерация,
Ивановский государственный энергетический университет, Российская Федерация,
Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)**

**(Ivanovo State Polytechnical University, Russia,
Ivanovo State Power Engineering University, Russia,
M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)**

E-mail: step-sg@mail.ru

***Разработана методика расчета и проектирования технических тканей
полотняного переплетения из сверхвысокомодульных термостойких нитей
для армирования полимерных композиционных материалов с заданными ха-
рактеристиками прочности.***

A method for calculating and designing technical fabrics of plain weave from ultra-high modulus heat-resistant yarns for reinforcing polymer composite materials with specified strength characteristics has been developed.

Ключевые слова: расчет и проектирование технических тканей, сверхвысокомодульные термостойкие нити, армирование полимерных композиционных материалов.

Keywords: calculation and design of technical fabrics, ultra-high modulus heat-resistant yarns, reinforcement of polymer composite materials.

Производство композиционных материалов (КМ) и изделий является одним из бурно развивающихся направлений. Особое место среди разнообразных видов КМ занимают полимерные композиционные материалы (ПКМ) с наполнителями в виде тканей из высокопрочных волокон, связующими в которых выступают полимеры. В сравнении с традиционными конструкционными материалами ПКМ обладают высокими прочностью (удельная прочность, то есть предел прочности материала, отнесенный к его плотности, многих ПКМ превосходит этот показатель для стали), коррозионной стойкостью, сопротивляемостью усталостному и ударному разрушению, малым удельным весом и т.д., благодаря чему они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

Одной из основных характеристик ПКМ с наполнителем в виде тканей является относительное объемное содержание волокон, или что то же самое, коэффициент армирования. Он представляет собой отношение объема, занятого волокнами, к объему материала и теоретически может достигать значения 0,9 (наиболее плотная упаковка волокон), а доля воспринимаемой этими волокнами нагрузки может даже превышать это значение. Механические характеристики ПКМ зависят от объемного содержания, прочности, жесткости волокон и связующего, совместимости волокон с матричным материалом, обуславливающим прочность связи на границе между ними, и ряда других факторов. Если проблема совместимости волокон с матричным материалом в большинстве случаев решается путем их подбора, в результате чего обеспечивается необходимая прочность связи на границе

между ними, то проблема обеспечения прочности ПКМ на тканевой основе в целом может быть решена путем расчета и проектирования технической ткани, от которой в определяющей степени будет зависеть прочность ПКМ.

В связи с вышеизложенным актуальной становится проблема разработки методики расчета и проектирования технических тканей для армирования полимерных композиционных материалов с заданными характеристиками прочности.

Изложим методику на примере расчета и проектирования технических тканей из сверхвысокомодульных термостойких нитей для армирования пластмасс. Полоска ткани шириной 50 мм должна выдерживать нагрузку 3000 Н как вдоль основы, так и вдоль утка.

В качестве исходного материала принимаем сверхвысокомодульную нить (СВМ) линейной плотности 29,4 текс (нить техническая СВМ, полученная с применением водного осадителя, с числом элементарных нитей 200) согласно ГОСТ 28007–88 Нить и жгут СВМ высококомодульные технические. Технические условия. Эта нить выдерживает нагрузку до 30 Н.

Определим количество нитей, которое должна содержать полоска ткани, чтобы выдержать нагрузку в 3000 Н:

$$n = \frac{P}{\eta P_{cp}} = \frac{3000}{0,78 \cdot 30} = 128,2, \quad (1)$$

где n – количество нитей в полоске ткани шириной 50 мм; P – заданная нагрузка на полоску ткани, Н; P_{cp} – средняя разрывная нагрузка одной нити, Н; η – усредненный

коэффициент, учитывающий уменьшение разрывных нагрузок нитей при заработке последних в ткань, обусловленный повреждаемостью волокон (выполненный комплекс экспериментальных исследований по определению разрывной нагрузки технической нити СВМ линейной плотности 29,4 текс с числом элементарных нитей 200 до и после заработки в ткань подтвердил значение этого коэффициента $\eta = 0,78$).

Окончательно принимаем $n = 129$ нитей в полоске ткани шириной 50 мм.

Отсюда для плотностей ткани по основе и утку получим $P_o = P_y = 258 \text{ Н/дм}$.

Для продолжения решения задачи необходимо знать уработку основы и утка. Проектируемая ткань относится к тканям повышенной плотности, поэтому использование для расчета уработки положений линейной теории изгиба нитей [2...4] здесь неприемлемо, так как приведет к существенной погрешности [5]. Для расчета уработки нитей воспользуемся конечно-разностным аналогом (9) [6] математической модели строения ткани (1...6) [6], полученной на основе нелинейной теории изгиба гибких нитей и позволяющей рассчитать параметры строения любых однослойных тканей полотняного переплетения, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку.

Расчет уработки нитей выполнялся на основе расчетной модели ткани полотняного переплетения (рис. 3-а, б) из [6] конечно-разностного аналога (9) [6] (конечно-разностные сетки для отрезков основы и утка представлены на рис. 4-а, б из [6]) математической модели строения ткани полотняного переплетения (1...6) [6] при следующих исходных данных:

геометрические плотности ткани по основе и утку $L_o = L_y = 0,388 \text{ мм}$;

диаметры поперечных сечений нитей основы и утка $d_{об} = d_{уб} = 0,257 \text{ мм}$;

коэффициенты вертикального смятия нитей $\eta_{об} = \eta_{уб} = 0,8$;

жесткости при изгибе нитей $A_o = A_y = 0,006 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$;

число узлов конечно-разностной сетки для отрезков основы и утка – 13;

шаг конечно-разностной сетки:

$$h_o = h_y = \frac{2L_o}{12} = \frac{2L_y}{12} = 0,065 \text{ мм} \quad (2)$$

В результате численного решения с использованием пакета программ MathCAD 11 конечно-разностного аналога (9) [6] при перечисленных выше исходных данных, помимо прочих параметров, определены следующие значения уработки нитей основы a_o и утка a_y :

$$a_o = a_y = 13,469 \% .$$

Прежде чем перейти к заправочному расчету ткани, необходимо уточнить, на каких ткацких станках можно выработать проектируемую ткань и выбрать марку станка. Для этого определим коэффициент связности. Для этого воспользуемся общепринятыми формулами строения ткани [7], [8].

Находим среднюю линейную плотность пряжи, текс:

$$T_{cp} = \frac{T_o + T_y}{2} = \frac{29,4 + 29,4}{2} = 29,4 \quad (3)$$

Определяем средний коэффициент переплетения ткани:

$$F = \frac{2n_o n_y}{t_o + t_y} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2}{2 + 2} = 2, \quad (4)$$

где $n_o = n_y$ – число основных и уточных нитей в раппорте переплетения (в нашем случае $n_o = n_y = 2$); t_o – число связей основы и утка в направлении основы (в нашем случае $t_o = 2$); t_y – число связей основы и утка в направлении утка (в нашем случае $t_y = 2$).

Значения t_o и t_y подсчитываются в пределах раппорта переплетения ткани.

Коэффициент связности C зависит от T_{cp} , F и плотностей ткани по основе P_o и утку $P_y \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}} \right)$ и рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{P_o P_y T_{cp}}{1000 F} = \frac{25,8 \cdot 25,8 \cdot 29,4}{1000 \cdot 2} = 9,78 \quad (5)$$

Технологический процесс выработки ткани на станке СТБ будет проходить нормально, если коэффициент связности равен или меньше 11 [9]. Следовательно, станок СТБ по этому показателю подходит.

Выработку ткани будем осуществлять на станке СТБ 2-180, используя полностью его заправочную ширину:

$$\ell_{\text{тк}} = \ell_{\text{б}} \left(1 - \frac{a_y}{100} \right) = 180 \left(1 - \frac{13,469}{100} \right) = 155,8 \text{ см}, \quad (6)$$

где $\ell_{\text{тк}}$ – ширина суровой ткани, см; $\ell_{\text{б}}$ – заправочная ширина станка, см.

Число нитей основы определяем по формуле:

$$m_o = m_{\phi} + m_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где m_o – количество нитей основы; m_{ϕ} – количество нитей фона; $m_{\text{кр}}$ – количество нитей кромок.

Находим количество нитей фона, принимая ширину одной кромки $\ell_{\text{кр}} = 1,5$ см:

$$m_{\phi} = P_o(\ell_{\text{тк}} - \ell_{\text{кр}}) = 25,8(155,8 - 2 \cdot 1,5) = 3942. \quad (8)$$

$$G_y = P_y T_y (\ell_{\text{б}} + \ell_{\text{кр}}) \cdot 10^{-3} = 258 \cdot 29,4(1,8 + 0,03) \cdot 10^{-3} = 13,881 \text{ кг}. \quad (13)$$

Масса утка в 1 метре ткани:

$$G_{y_1} = \frac{G_y}{100} = \frac{13,881}{100} = 0,13881 = 138,81 \text{ г}. \quad (14)$$

Линейная плотность ткани, г:

$$G = G_{o_1} + G_{y_1} = 136,59 + 138,81 = 275,4. \quad (15)$$

Поверхностная плотность ткани:

$$b = \eta_{\text{ов}} d_{\text{ов}} + \eta_{\text{уб}} d_{\text{уб}} = 0,8 \cdot 0,257 + 0,8 \cdot 0,257 = 0,411 \text{ мм}. \quad (17)$$

Поскольку проектируемая ткань имеет нити утка и основы одинакового волокнистого состава, то для определения объем-

ного наполнения ткани воспользуемся формулой (8.93) [4]:

$$m_{\text{кр}} = P_o \ell_{\text{кр}} = 25,8 \cdot 2 \cdot 1,5 = 77,4 \text{ нити}. \quad (9)$$

Принимаем $m_{\text{кр}} = 78$ нитей.

Находим число нитей основы:

$$m_o = m_{\phi} + m_{\text{кр}} = 3942 + 78 = 4020 \text{ нитей}. \quad (10)$$

Определяем массу нитей основы в 100 метрах ткани:

$$G_o = \frac{m_o T_o}{\left(1 - \frac{a_o}{100}\right) \cdot 10^4} = \frac{4020 \cdot 29,4}{\left(1 - \frac{13,469}{100}\right) \cdot 10^4} = 13,659 \text{ кг}. \quad (11)$$

Масса основной нити в 1 метре ткани:

$$G_{o_1} = \frac{G_o}{100} = \frac{13,659}{100} = 0,13659 = 136,59 \text{ г}. \quad (12)$$

Масса уточной нити в 100 метрах ткани:

$$g'_c = \frac{G}{\ell_{\text{тк}}} = \frac{275,4}{1,558} = 176,765 \text{ г/м}^2. \quad (16)$$

Определим толщину ткани. Так как проектируемая ткань относится к ткани V порядка фазы строения с одинаковыми диаметрами нитей основы и утка, то ее толщина b согласно [7] подсчитывается по формуле:

ного наполнения ткани воспользуемся формулой (8.93) [4]:

$$N_{\text{тк}} = \frac{7,85 \cdot 10^{-6} \cdot C^2}{b} \left[T_o P_o \left(1 + \frac{a_o}{100} \right) + T_y P_y \left(1 + \frac{a_y}{100} \right) \right] = \quad (18)$$

$$= \frac{7,85 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5^2}{0,411} \left[29,4 \cdot 258 \left(1 + \frac{13,469}{100} \right) + 29,4 \cdot 258 \left(1 + \frac{13,469}{100} \right) \right] = 0,74,$$

где C – коэффициент, зависящий от плотности материала нити, который согласно [4] для нитей СВМ составляет 1,5.

Найденный коэффициент объемного наполнения ткани характеризует степень напряженности процесса формирования ткани.

ВЫВОДЫ

Разработана методики расчета и проектирования технических тканей для армирования полимерных композиционных материалов с заданными характеристиками прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев Е.В., Матрохин А.Ю., Киселев М.В., Степанов С.Г. Полимерные композиционные материалы на волокнистой основе: характеристики, тенденции развития производства, научные направления и технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5.
2. Салихова А.Х. Аналитические системы и соотношения для прогнозирования строения, анализа и расчета тканей заданных характеристик: Дис.... канд. техн. наук.- Иваново, 2003.
3. Карева Т.Ю. Определение величины изгиба нитей основы в тканях новых структур на основе линейной теории изгиба // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С. 48...51.
4. Степанов Г.В., Степанов С.Г. Теория строения ткани.–Иваново: ИГТА, 2004.
5. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис. ... докт. техн. наук. – Иваново, 2007.
6. Степанов С.Г., Маслов Л.Б. Математическая модель строения технической ткани для армирования полимерных композиционных материалов и конечно-разностный аналог для расчета ее параметров// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5.

7. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строеение и проектирование тканей. – М.: РИО МГТА, 1999.

8. Дамьянов Г.Б., Бачев И.З., Сурнина Н.Ф. Строеение ткани и современные методы ее проектирования. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.

9. Оников Э.А. Проектирование ткацких фабрик. – М.: Изд-во ГОУВПО ЗИТЛП, 2006.

REFERENCES

1. Rumyantsev E.V., Matrokhin A.Yu., Kiselev M.V., Stepanov S.G. Polymer composite materials on a fibrous basis: characteristics, production development trends, scientific directions and technologies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No.5.
2. Salikhova A.Kh. Analytical systems and relations for predicting the structure, analysis and calculation of tissues of given characteristics: Dis. ... cand. tech. Sciences. - Ivanovo, 2003.
3. Kareva T.Yu. Determination of the bending value of the warp threads in the tissues of new structures based on the linear theory of bending // Izv. universities. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2002, No. 3. S. 48 ... 51.
4. Stepanov G.V., Stepanov S.G. Theory of tissue structure.–Ivanovo: IGTA, 2004.
5. Stepanov S.G. Development of the theory of formation and structure of tissue based on the nonlinear mechanics of flexible threads: Dis. ... doc. tech. Sciences. – Ivanovo, 2007.
6. Stepanov S.G., Maslov L.B. Mathematical model of the structure of technical fabric for reinforcing polymer composite materials and a finite-difference analogue for calculating its parameters // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 5.
7. Martynova A.A., Slostina G.L., Vlasova N.A. Structure and design of fabrics. – М.: RIO MGTA, 1999.
8. Damyanov G.B., Bachev I.Z., Surnina N.F. Fabric structure and modern methods of its design. - М.: Light and food industry, 1984.
9. Onikov E.A. Design of weaving factories. - М.: Publishing house of GOUVPO ZITLP, 2006.

Поступила 29.12.21.

УДК 544.43

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_129

**КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ
ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНЫХ ВОЛОКОН В АТМОСФЕРЕ АЗОТА****KINETIC MODEL OF POLYACRYLONITRILE FIBRE THERMOSTABILISATION
IN NITROGEN ATMOSPHERE***Е.А. ТРОФИМЕНКО, Т.В. БУХАРКИНА, С.В. ВЕРЖИЧИНСКАЯ, Ю.В. ГАВРИЛОВ**E.A. TROFIMENKO, T.V. BUKHARKINA, S.V. VERZHICHINSKAYA, YU.V. GAVRILOV*

(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева)

(Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev)

E-mail: e.trofimenko@umatex.com

В статье предлагается модификация метода термостабилизации полиакрилонитрильных жгутов при получении углеродного волокна. Использование на начальном этапе дополнительной стадии обработки в среде азота позволит провести разделение протекающих процессов циклизации и дегидрирования, что даст возможность увеличить скорость протекания реакции и увеличить производительность волокна по углероду. Для этого была проведена стабилизация промышленно производимого полиакрилонитрильного волокна при различных температурах и времени выдержки с последующим измерением объемной плотности образцов. На основании данных об изменении во времени плотности образцов полиакрилонитрильного волокна в течение обработки в азоте была оценена степень превращения исходных линейных структур полиакрилонитрила в циклизованные. На основании полученных данных построена кинетическая модель процесса с определением порядка реакции, константы скорости и энергии активации. Использование такой дополнительной стадии позволит быстрее достигать требуемых значений объемной плотности для получения стабилизированного волокна, способного к прохождению высокотемпературной обработки (карбонизации), и соответственно увеличить производительность оборудования, что в будущем приведет к снижению стоимости производства среднепрочных углеродных волокон.

The article proposes a modification of the method of polyacrylonitrile bundle thermal stabilization in the production of carbon fiber. The use of an additional processing stage in a nitrogen medium at the initial stage will allow to make a separation of the ongoing processes of cyclization and dehydrogenation, which will make it possible to increase the reaction rate and the carbon performance of the

fiber. For this purpose, the commercially produced polyacrylonitrile fiber was stabilized at various temperatures and exposure times, followed by measurement of the volume density of the samples. Based on the data on the time change in the density of polyacrylonitrile fiber samples during processing in nitrogen, the degree of transformation of the initial linear structures of polyacrylonitrile into cyclized ones was estimated. Based on the obtained data, a kinetic model of the process with the determination of the reaction order, the rate constant and the activation energy is constructed. The use of such an additional stage will allow to achieve the required volume density values to obtain a stabilized fiber capable of undergoing high-temperature processing (carbonation) more quickly and, accordingly, increase the productivity of the equipment, which will lead to a reduction in the cost of producing medium-strength carbon fibers in future .

Ключевые слова: кинетика термостабилизации, кинетическая модель, композиты, окисление, полиакрилонитрил, углеродные волокна, энергия активации.

Keywords: thermal stabilization kinetics, kinetic model, composites, oxidation, polyacrylonitrile, carbon fibers, activation energy.

Введение

На сегодняшний день одними из перспективнейших являются композитные материалы на основе углеродного волокна. Их выдающиеся физико-механические свойства, химическая стойкость, низкая плотность позволили частично вытеснить традиционные материалы из различных сфер применения, в частности, аэрокосмической. Однако высокопрочные марки волокон с уникальными свойствами достаточно дороги и не являются необходимыми во всех областях их возможного применения. Например, в массовом автомобилестроении, кораблестроении, использовании в нефтегазовом деле и даже дизайне самым востребованным будет среднепрочное волокно со стандартным модулем упругости ($\sigma = 3,5-4,0$ ГПа, $E = 220-240$ ГПа), но даже его продвижению мешает крайне высокая стоимость производства углеродных волокон в целом. Классическая технология производства углеволокна из полиакрилонитрила (ПАН) по своей сути не менялась с момента получения первых образцов [1...3]. Происходило совершенствование рецептур синтеза прядильного раствора, отрабатывались методики формования, оптимизировались температурно-деформационные режимы температурной обработки волокон, что приводило к постепенному снижению

себестоимости при увеличении физико-механических показателей. Однако ниже определенной точки себестоимость волокна опустить пока не удастся. Основной причиной этому является высокая стоимость акрилонитрила, являющегося продуктом глубокой переработки нефти, однако, помимо снижения стоимости непосредственно прекурсоров, реальным эффективным шагом для преодоления образующегося барьера может стать увеличение производительности имеющегося оборудования путем сокращения продолжительности отдельных стадий, в частности, самой длительной из них – термообработки ПАН-волокна.

Классическая технология получения углеродного волокна из ПАН (в части термообработки) состоит из 3...4 стадий: стабилизации волокна путем его окисления кислородом воздуха в печах окисления, в результате чего волокно становится устойчивым к более высоким температурам обработки низкотемпературной и высокотемпературной карбонизации, проведение которых приводит к удалению гетероатомов, и получения собственно углеродного волокна с определенной структурой. В качестве дополнительной, необязательной стадии, может выступать графитация, задача которой совершенствовать структуру во-

локна и повысить модуль упругости [1...3]. Если рассматривать время пребывания волокна на каждой из стадий, то редко в каких работах предлагается обрабатывать волокно в зонах карбонизации и графитации дольше 5 мин [4], [5]. Данные процессы, ввиду своей высокой температуры, достаточно скоротечны, чего нельзя сказать о процессе стабилизации. Большинство работ предлагает проводить данный процесс 90...120 мин [6...8], что, несомненно, снижает экономическую эффективность процесса. Снижение времени именно данной стадии может в перспективе привести к снижению себестоимости волокон.

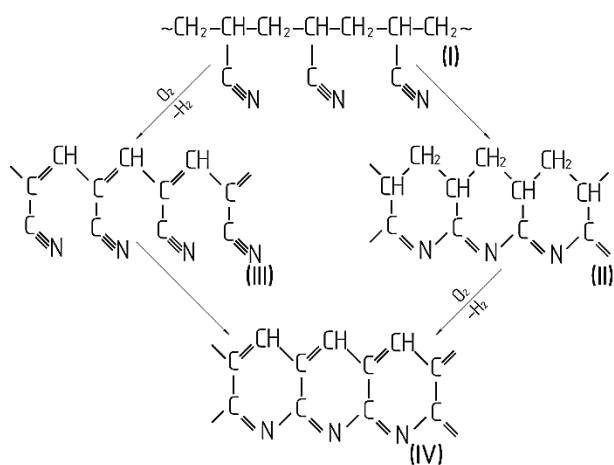


Рис. 1

Рассмотрим процессы, происходящие с волокном во время стабилизации [5]. На рис. 1 представлена схема протекающих реакций. Исходный ПАН (I) реагирует с образованием двух промежуточных структур. При участии кислорода происходит окислительное дегидрирование, приводящее к образованию двойных связей $-C=C-$ с удалением водорода в виде паров воды (III), и одновременно протекает процесс без участия кислорода – происходит раскрытие связи $-C\equiv N$ с замыканием цикла (II). В итоге протекают два параллельных процесса: окислительное дегидрирование и циклизация. Структуры (II) и (III) являются промежуточными продуктами в процессе, в дальнейшем, вне зависимости от того, какой процесс вначале произошел на активном центре реакции, происходят и дегидрирование, и циклизация, приводящая к образованию структуры (IV) стабилизирован-

ного ПАН. Практически все литературные источники, занимающиеся данной тематикой, сходятся во мнении, что о получении необходимой структуры стабилизированного волокна свидетельствует изменение цвета волокна с белого на черный, а также увеличение его плотности до 1360...1400 кг/м^3 [8...17] (исходный ориентированный ПАН имеет плотность $\sim 1180 \text{ кг/м}^3$).

Так как процессы протекают параллельно на одних и тех же активных центрах, и по сути являются конкурирующими, то зависимость концентрации отдельных продуктов от времени процесса графически будет описываться зависимостью концентраций в реакции с промежуточным продуктом (рис. 2 – схематичное представление концентраций различных структур в зависимости от времени реакции).

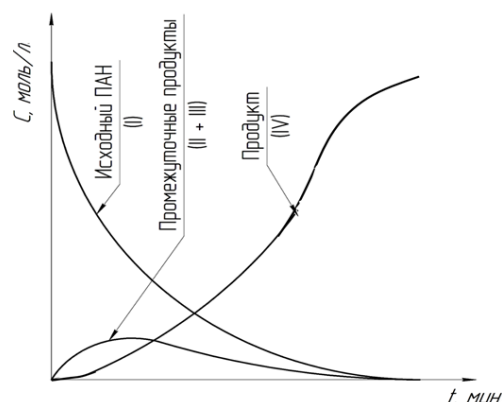


Рис. 2

Исходя из вышесказанного, было выдвинуто предположение, что разделение процессов окислительного дегидрирования и циклизации на отдельные стадии должно увеличить скорость стабилизации волокна, так как:

1. Накопление промежуточного продукта II (циклизованных неароматических структур) на последующей стадии окисления приведет к большей скорости взаимодействия волокна с кислородом из-за повышения концентрации реакционноспособных групп.
2. Удаление окислителя из рабочей атмосферы первой стадии термообработки позволит повысить температуру процесса стабилизации и сделает возможным быстрое повышение значения плотности, тем самым снизив общее время процесса, необхо-

димое для достижения плотности 1360 г/см^3 . Если на начальной стадии при наличии окислителя температуры свыше 220°C могут спровоцировать перегорание жгута, то при отсутствии кислорода в рабочей зоне следующей граничной точкой процесса будет температура начала деструкции полимера, которая была подобрана эмпирическим путем и находится выше данного значения.

3. Удаление кислорода позволит увеличить выход волокна по углероду, поскольку уменьшится окислительная деструкция полимера на одной из стадий стабилизации (в процессе окисления, помимо аммиака и воды, происходит удаление некоторого количества оксидов углерода II и IV, а также циановодорода) [4].

В итоге, на основании данных предположений, была поставлена задача изучить процесс стабилизации ПАН волокна в азоте, определить основные кинетические зависимости и оценить возможность использования полученных данных для разработки технологии ускоренной стабилизации ПАН волокна с целью получения среднепрочных углеродных волокон.

Методы

Для моделирования процесса стабилизации в бескислородной среде использовалась печь низкотемпературной карбонизации (LT), установленная на опытной линии получения углеродного волокна в научно-исследовательском центре АО "НПК Химпроминжиниринг". LT встроена в единую линию с печами окисления и высокотемпературной карбонизации. Данная печь с рабочим диапазоном температур до 900 C запитывается азотом высокой чистоты, подаваемым с азотной станции. Предварительная продувка оборудования позволяет снизить содержание кислорода в рабочей камере LT до 15 ppm . После каждого функционального элемента оборудования (каждая из печей окисления, низкотемпературная и высокотемпературная карбонизация) установлен транспортный пятивалковый стан с индивидуальным программируемым электродвигателем, который позволяет не только транспортировать волокно в непре-

рывном процессе, но и создавать необходимую деформацию волокна на любой из стадий.

В качестве анализируемого ПАН-волокна использовался промышленно используемый ПАН-прекурсор, являющийся сырьем для получения углеродного волокна с прочностью $4,5 \text{ ГПа}$ на предприятии АО "АЛАБУГА- Волокно" под условным обозначением 12k. Габариты печи, а также крайне высокое время выдержки, необходимое для получения отдельных точек, не позволило проводить процесс непрерывно, поэтому образцы волокна нарабатывались в периодическом режиме: волокно пропускалось через холодную, продутую азотом печь, и наматывалось на пятивалковый транспортный стан, после чего запускался нагрев оборудования. При достижении заданной температуры на входе в печь подвизывался узелок углеродного волокна и запускался стан на максимальной скорости. Когда узелок-марка показывался с другой стороны LT, станы останавливались и запускался отсчет времени обработки. По окончании времени обработки, на входе в печь подвизывался следующий узелок-марка, и запускалась транспортная система. Новый вышедший узелок отмечал окончание первого режима выдержки и начало второго.

Сразу же после получения образца волокна из его центра вырезался кусок и измерялась его объемная плотность при помощи градиентной колонки Ray Ran DGA-1. Полученные значения фиксировались в журнале.

Результаты и обсуждение

Цвет наработанных образцов менялся в зависимости от температуры обработки и времени выдержки в зоне нагрева от светло-желтого до насыщенного медного. При этом при стандартном процессе окисления волокон уже после $20...30$ мин обработки волокно имеет черный цвет.

В результате проделанной работы были получены следующие значения плотностей образцов после стабилизации (табл. 1 – изменение плотности образцов в зависимости от времени и температуры обработки в азоте).

t, мин	Плотность ρ , кг/м ³		
	T ₃ = 260 °С	T ₂ = 240 °С	T ₁ = 220 °С
810	1324,0	1316,0	-
184	1321,5	1313,2	1268,4
120	1321,0	1303,8	1254,6
90	1319,8	1299,0	1252,0
60	1318,8	1286,0	1246,6
40	1317,0	1275,7	1235,7
30	1315,2	1270,9	1226,8
20	1309,4	1258,8	1215,9
10	1294,7	1224,7	1199,5
8	1271,9	1209,1	1191,8
6	1252,1	1202,7	1188,5
4	1220,6	1194,7	1187,7
2	1182,8	1183,1	1184,3
0	1186,7	1186,7	1186,7

Отсутствие кислорода в атмосфере рабочей зоны ЛТ позволило на 40...60°C повысить температуру проведения процесса, в сравнении с классической технологией. Однако увеличение температуры выше 260 С, при времени выдержки свыше 8...10 мин, приводило к травмированию образцов. Наблюдалось образование ворса, повышенная хрупкость образцов, местами гофрированные участки жгута, поэтому было принято остановиться на представленных в табл. 1 температурах.

В качестве параметра для кинетического моделирования было принято решение использовать значение степени превращения (X) исходного ПАН (I) в циклизованную структуру (II). Наибольшая плотность образца, полученная при 810-минутной выдержке при 260 С составила $\rho = 1324,0$ кг/м³. Данное значение плотности было принято соответствующим максимальной степени превращения исходного вещества X=1. На основании данного допущения и понимания того, что плотность является аддитивной величиной, можно воспользоваться уравнением (1) для расчета степени превращения исходного материала:

$$\rho = \rho_1(1 - X) + \rho_2X, \quad (1)$$

где ρ – измеряемая плотность образца; ρ_1 – плотность исходного ПАН (для ориентированного ПАН-волокна, использованного в эксперименте, составляет 1186,7 кг/м³); ρ_2 –

максимальная достигнутая плотность (1324,0 кг/м³). Воспользовавшись данным уравнением, получили значения степени превращения исходных структур, которые были линеаризованы в координатах $1/(1-X)=f(t)$, что свидетельствует о втором порядке реакции циклизации ПАН (рис. 3 – линеаризация зависимости степени превращения от времени в координатах второго порядка).

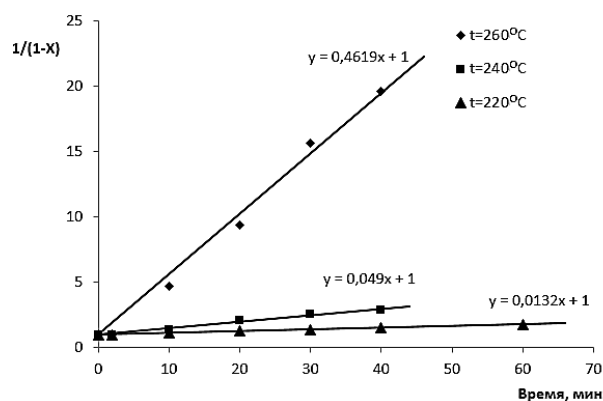


Рис. 3

Значение углового коэффициента к линейного уравнения $y=kx+b$ является значением эффективной константы скорости $k_{эф}$. Основываясь на этих значениях и температуре каждого из трех процессов, можно определить логарифм предэкспоненциального множителя и энергию активации уравнения Аррениуса (рис. 4 – линеаризация температурной зависимости константы скорости.).

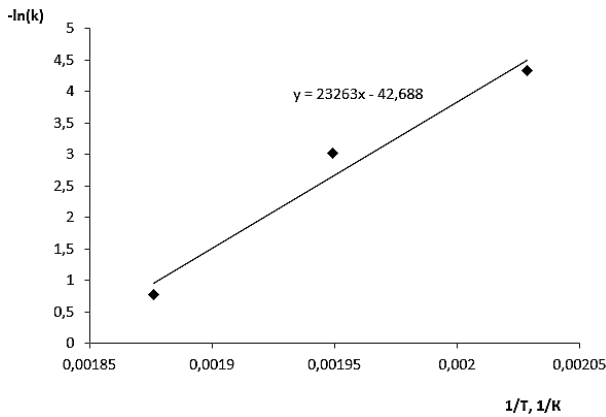


Рис. 4

Следовательно, исходя из логарифмической формы уравнения Аррениуса:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}, \quad (2)$$

где $E_a = 23263 \cdot R \approx 193400 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$; $\ln A \approx 42,69$.

Константа скорости реакции будет изменяться с температурой следующим образом:

$$k = e^{42,69 - \frac{193400}{RT}}. \quad (3)$$

Уравнение скорости увеличения степени превращения исходных структур будет иметь вид:

$$\frac{dX}{dt} = k(1 - X)^2. \quad (4)$$

ВЫВОДЫ

На основании проделанной работы можно сделать вывод о том, что использование стадии термообработки в азоте перед окислительной термостабилизацией должно положительно влиять на общее снижение времени проведения процесса стабилизации ПАН-волокна. Так, при использовании классической технологии плотность стабилизируемого волокна 1360...1400 кг/м³ достигается за 90...120 мин, но использование одной стадии стабилизации в азотной среде позволит получать плотность 1294,7 г/см³, что составляет 50...62% требуемого

прироста параметра (относительно плотности исходного ПАН-волокна), за период 10 мин. Использование более высоких температур негативно скажется на свойствах получаемого УВ, а использование выдержки в инертной среде более 10 минут является малоэффективным решением, так как затем наблюдается постепенное торможение функции $\rho = f(t)$, причем этот эффект становится более явным при повышении температуры.

Второй порядок реакции стабилизации свидетельствует о том, что в реакции бескислородной циклизации и ароматизации исходных структур ПАН участвуют два активных центра. Это объясняет относительно быстрое увеличение плотности с последующим резким снижением скорости ее изменения за счет быстрого исчерпания реакционноспособных групп. Достаточно высокая энергия активации реакции, приближающаяся к 200 кДж/моль, говорит об отсутствии диффузионных торможений процесса. Очевидно, можно предположить, что преобразование вещества ПАН на данной стадии происходит в объеме материала без его взаимодействия с газовой фазой.

Следовательно, на основании всего вышесказанного можно считать, что процесс стабилизации в азоте, в комбинации с последующими режимами окисления, может обеспечить снижение времени стабилизации волокна, повысив тем самым производительность имеющегося оборудования, что положительно скажется на экономике процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moss M., Hill C. B., Rowland M. R. Pat. 4100004A USA. 1978.
2. Xu Lianghua, Zhang Kun, Tong Yuanjian, Cao Weiyu, Li Changqing, Zhao Zhenwen. Pat. CN103215692A China. 2015.
3. Xue Zu Biao, Liang Yuxin. Pat. CN102051711B China. 2009.
4. Carbon Fibre and their composites / Peter Morgan. Taylor & Francis Group, 2005.
5. Симакура С. Углеродные волокна / Пер. Ю.М. Товмасян, Э.С. Зеленский. – М.: Мир, 1987.
6. Chen Dong, Zhang Yueyi, Cong Zongjie, Li Songfeng, Sun Jiale, Zhang Dayong, Sun Shaohuan. Pat. CN109252250 A China. 2018.

7. Hiroyasu Ogawa Tetsuro, Shigei Tomoaki Kanno. Pat. US5167945A USA. 1992.
8. Zhang Yue-yi, Cong Zong-jie, Li Song-feng, Cao Ming-hai, Wang Wen-yi, and Wang Wen-yi. Pat. CN106222803A China. 2018.
9. Ogawa H., Shigei T., Sugeno H., Ichimaru K. 1987. Pat. US4671950A USA. 1987.
10. Liu Jie, Zhang Yue Yi, Lian Feng, Ma Siu-kun, Liang Jie-ying. Pat. CN102154740A China. 2011.
11. В.П. Бирюков, А.М. Плотников, С.Л. Кузнецова. Пат. RU2130516C1 РФ. 1996.
12. Charles K. Mullen. Pat. US4610860A USA. 1985.
13. Warren C. Schimpf. Pat. US5004590A USA. 1991.
14. J.D. Cook, T. Taylor, G. Vishnukant, T. Barry, M. Dewayne, S. Craford, S.C. Chiu, B.D. HARMON, A. Thomas. Pat. WO2016144488A1 WO. 2016.
15. Taro Oyama, Rie Kawahito, Hiroshi Kimura. Pat. US8236273B2 USA. 2012.
16. Hidekazu Yoshikawa, Taro Oyama, Hiroshi Kimura. Pat. US8124228B2 USA. 2012.
17. Hidekazu Yoshikawa, Taro Oyama, Takaya Suzuki, Harumitsu Enomoto. Pat. US7638110B1 USA. 2010.

REFERENCES

1. Moss M., Hill C. B., Rowland M. R. Pat. 4100004A USA. 1978.
2. Xu Lianghua, Zhang Kun, Tong Yuanjian, Cao Weiyu, Li Changqing, Zhao Zhenwen. Pat. CN103215692A China. 2015.
3. Xue Zu Biao, Liang Yuxin. Pat. CN102051711B China. 2009.

4. Carbon Fibre and their composites / Peter Morgan. Taylor & Francis Group, 2005.
5. Simamura S. Uglerodnye volokna / Per. Yu.M. Tovmasyan, E.S. Zelenskiy. – М.: Mir, 1987.
6. Chen Dong, Zhang Yueyi, Cong Zongjie, Li Songfeng, Sun Jiale, Zhang Dayong, Sun Shaohuan. Pat. CN109252250 A China. 2018.
7. Hiroyasu Ogawa Tetsuro, Shigei Tomoaki Kanno. Pat. US5167945A USA. 1992.
8. Zhang Yue-yi, Cong Zong-jie, Li Song-feng, Cao Ming-hai, Wang Wen-yi, and Wang Wen-yi. Pat. CN106222803A China. 2018.
9. Ogawa H., Shigei T., Sugeno H., Ichimaru K. 1987. Pat. US4671950A USA. 1987.
10. Liu Jie, Zhang Yue Yi, Lian Feng, Ma Siu-kun, Liang Jie-ying. Pat. CN102154740A China. 2011.
11. V.P. Biryukov, A.M. Plotnikov, S.L. Kuznetsova. Pat. RU2130516C1 RF. 1996.
12. Charles K. Mullen. Pat. US4610860A USA. 1985.
13. Warren C. Schimpf. Pat. US5004590A USA. 1991.
14. J.D. Cook, T. Taylor, G. Vishnukant, T. Barry, M. Dewayne, S. Craford, S.C. Chiu, B.D. HARMON, A. Thomas. Pat. WO2016144488A1 WO. 2016.
15. Taro Oyama, Rie Kawahito, Hiroshi Kimura. Pat. US8236273B2 USA. 2012.
16. Hidekazu Yoshikawa, Taro Oyama, Hiroshi Kimura. Pat. US8124228B2 USA. 2012.
17. Hidekazu Yoshikawa, Taro Oyama, Takaya Suzuki, Harumitsu Enomoto. Pat. US7638110B1 USA. 2010.

Рекомендована кафедрой химической технологии углеродных материалов. Поступила 19.11.21.

МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛОКОН

POLYMER MODIFICATION AS A WAY TO INCREASE THE ADHESIVE ABILITY OF FIBERS

М.М. БОНДАРЧУК, В.А. АНИСЬКОВА, Н.Е. ФЕДОРОВА

M.M. BONDARCHUK, V.A. ANISKOVA, N.E. FEDOROVA

(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A. N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: bondarchuk-mm@rguk.ru, aniskova-va@rguk.ru, fedorova-ne@rguk.ru

Применение текстильных основ является одним из способов получения композитов. Основной проблемой при получении композиционных текстильных материалов является низкая адгезионная способность многих полимеров, которые используются в производстве волокон.

Целью исследования является разработка технологии модификации полимеров волокон для повышения их адгезионных свойств.

Задачи исследования: изучить способ термического скрепления волокнистого холста, способ обработки вспененными акриловыми композициями пряжи и холстов; разработать технологию, которая реализует способ повышения адгезионной способности волокон на основе классической технологии получения пряжи; получить композиты путем пропитки текстильного полуфабриката вспененными связующими.

В работе применялись эмпирические методы исследования (эксперименты): вариативная технология была реализована на смонтированной экспериментальной установке с целью придания специальных свойств готовым изделиям; на втором этапе проводилась пропитка текстильных материалов и изделий дисперсиями полимеров.

В результате исследования установлено: прочность выработанной по предлагаемой технологии пряжи выше. Как следствие, установлено и повышение износостойкости изделий; композиции на основе этилакрилата помогают повысить адгезионную прочность образующихся склеек, при этом улучшаются свойства как пряжи, так и нетканых полотен.

The use of textile bases is one of the ways to obtain composites, The main problem in the production of composite textile materials is the low adhesive ability of many polymers used in the production of fibers.

The purpose of the study is to develop a technology for modifying fiber polymers to increase their adhesive properties.

Research objectives: to study a method of thermal bonding of fibrous canvas, a method of processing yarn and canvas with foamed acrylic compositions; to develop a technology that implements a method for increasing the adhesive ability of fibers based on the classical yarn production technology; to obtain composites by impregnating a textile semi-finished product with foamed binders.

Empirical research methods (experiments) were used in the work: the variable technology was implemented on a mounted experimental installation, in order to give special properties to the finished products; at the second stage, the impregnation of textile materials and products with polymer dispersions was carried out.

As a result of the study, it was found that the strength of the yarn developed is higher according to the proposed technology, as a result, an increase in the wear resistance of products is also established, compositions based on ethyl acrylate help to increase the adhesive strength of the resulting glues, while improving the properties of both yarn and non-woven fabrics.

Ключевые слова: модификация, адгезия, пряжа, нетканый материал, связующее.

Keywords: modification, adhesion, yarn, non-woven material, adhesive.

Представления об улучшении свойств нетканых материалов, полученных способом термического скрепления волокнистого холста, сводятся к методам повышения адгезионной способности полимеров, то есть активации и модификации. Модификация поверхности субстрата предполагает незначительное изменение его химического состава путем введения в граничные и переходные слои различных функциональных групп.

В настоящее время актуальной является задача получения композитных материалов и изделий оптимальной структуры. Один из способов получения композитов – это пропитка текстильных материалов и изделий дисперсиями полимеров с целью придания специальных свойств готовым изделиям.

Целью данной работы является получение композитов путем пропитки текстильного полуфабриката вспененными связующими. Пропитка осуществляется с целью повышения адгезионной прочности материалов и изделий и придания им формоустойчивости. Применение вспененного связующего обусловлено стремлением получить равномерное по всему объему материала распределение связующего, сформировать оптимальную структуру клееного материала и более рационально использовать связующее.

Способ скрепления волокон, который основан на взаимодействии волокон и связующего вещества (в данном исследовании латекс), можно называть возможным вариантом по сравнению с классической технологией прядения [1].

Представленная технология, реализующая способ повышения адгезионной спо-

собности волокон, возможна при получении пряжи классическим способом.

Разработанная на первом этапе исследования технология дополняет классическую следующим образом: одноплеточная пряжа классической технологии → технология аппретирования термическая фиксация связующего → полное раскручивание пряжи → ворсование.

Необходимо аппретировать пряжу вспененным раствором связующего с последующей температурной фиксацией пряжи. Для реализации данной технологии на кафедре текстильных технологий РГУ имени А.Н. Косыгина смонтирована лабораторная установка [1], [2].

Вариативная технология была реализована на данной установке, включающей следующие технологические блоки: питания, аппретирования, отжима.

Объект исследования – одиночная пряжа линейной плотностью 170 текс (аппаратная, 80% шерсть помесная и 20% капроновое волокно).

Отдельно был модернизирован узел термической фиксации, далее осуществлялось наматывание и ворсование пряжи. В работе [2] разработан состав пропитывающего водного раствора: 40% акриловый латекс и 0,5% поверхностно-активного вещества. Представленный способ скрепления волокон позволил обосновать исследуемый на разработанной установке технологический режим. Была получена ворсованная пряжа линейной плотности 190 текс, крутка пряжи была уменьшена на 25% по сравнению с исходной. Свойства пряжи по исследуемым параметрам, полученной данным технологическим способом (скрепление во-

локон с помощью адгезии) показали более хорошие результаты, представленные на рис. 1 (диаграмма относительного (в %) изменения свойств пряжи, выработанной по классической технологии и по технологии с адгезионным скреплением волокон).

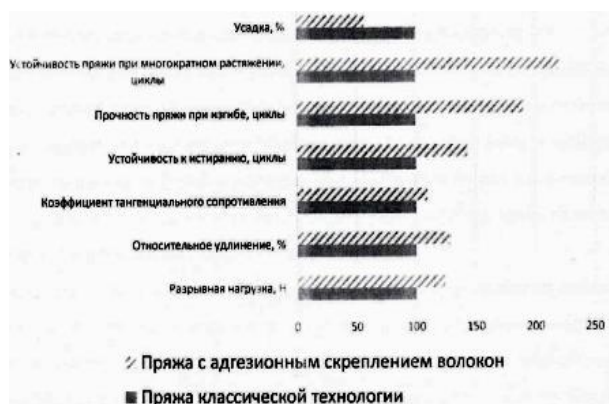


Рис. 1

Повышение прочности пряжи, выработанной по предлагаемой технологии, связано с образованием прочных адгезионных склеек точечной или близких к ней структур в местах пересечения волокон. За счет этого повышается прочность и износостойкость изделий.

На втором этапе работы объектом исследования были нетканые материалы, полученные пропиткой латексным связующим. Для пропитки использовали вспененное связующее на основе 25%-ного этилакрилата, полученное в присутствии 0,5% масс, алкил сульфоната натрия способом механического перемешивания в течение 10 мин при 1200 мин^{-1} . Концентрация связующего составляла 20...40%. В результате перемешивания была получена агрегативно-устойчивая пена средней дисперсности с кратностью 3...4.

Экспериментально установлено, что содержание алкилсульфоната натрия свыше 2% масс, и время перемешивания свыше 10 мин при любой концентрации латекса нецелесообразно, так как не позволяет получить устойчивую пену нужной кратности. Поэтому для дальнейших исследований использовали оптимальное количество алкилсульфоната натрия – 0,5% масс, и время приготовления вспененного связующего – 10 мин.

Пропитка вспененным связующим нетканых полотен поверхностной плотности 200 г/м^2 осуществлялась на плюсовочном устройстве кафедры текстильных технологий РГУ имени А.Н. Косыгина. Содержание связующего в материале варьировалось от 15 до 40 % масс. Контроль содержания связующего в материале при пропитке осуществляли путем определения мокрого привеса связующего до достижения расчетного значения. Высушивали материал в термошкафу конвективного типа при 60°C , вулканизацию проводили при 140°C в течение 3 мин. Испытания материалов проводили по стандартным методикам.

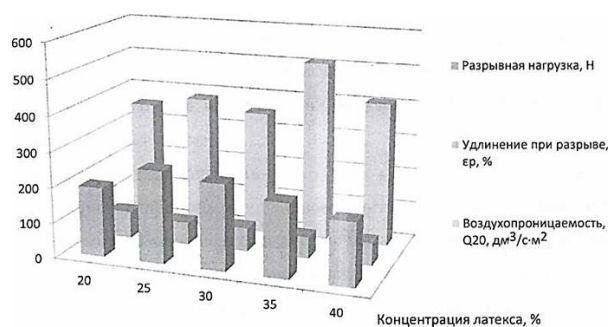


Рис. 2

На рис.2 представлена графическая интерпретация свойств нетканых композиционных материалов в зависимости от концентрации латекса, взятого для вспенивания, а на рис. 3 – зависимость свойств материала от содержания в нем связующего.



Рис. 3

Установлено, что применение акриловых вспененных композиций при получении текстильных материалов и изделий позволяет повысить их деформационно-

прочностные свойства. Увеличение прочности (рис.2) можно объяснить ростом числа адгезионных склеек в материале оптимальной структуры (при 25%-ном связующем), дальнейший же рост концентрации латекса приводит к получению пены с избыточной вязкостью, что затрудняет процесс импрегнирования связующим, процесс заполнения капилляров пористой структуры нетканого полотна происходит медленнее, что приводит к закупориванию части капилляров, падению прочности материала и неравномерному распределению в нем связующего.

Таким образом, оптимальной можно считать концентрацию связующего, взятого для вспенивания, равной 25%.

Как видно из рис.3, при увеличении доли связующего в материале разрывная нагрузка увеличивается, а удлинение при разрыве и воздухопроницаемость снижаются. Это связано с распределением связующего в капиллярной пористой структуре нетканого материала. С ростом содержания связующего, образующиеся адгезионные склейки переходят от рациональных и экономных точечных к нерациональным агломератным и сегментным. Поэтому увеличение прочности материала связано еще и с когезионной прочностью латексных пленок. А снижение воздухопроницаемости объясняется частичным заполнением связующим межволоконного пространства, пленка которого после высыхания и препятствует прохождению воздуха.

Таким образом, в зависимости от назначения материала и условий его эксплуатации можно подобрать оптимальные в каждом случае технологические параметры выпуска нетканых композиционных полотен.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальная установка для изготовления пряжи со скреплением волокон с помощью адгезии позволила обосновать возможности модификации полимера в дальнейших исследованиях как способа повышения адгезионной способности волокон.

2. Результаты, полученные в ходе исследования, подтверждают улучшение характеристик свойств пряжи благодаря скреплению волокон адгезионными силами.

3. Предлагаемую технологию можно использовать для производства пряжи с большой линейной плотностью для специального назначения (например, пряжа для изготовления фильтровальных материалов).

4. Возможность дальнейшей реализации данного исследования для придания пряже различных модификаций, носителем специальных свойств является латексное связующее (бактерицидных, ароматизирующих, антисептических и других).

5. Экспериментально установлено, что при получении композиционных нетканых материалов разработанная для модификации пряжи композиция связующего также показывает высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорова Н.Е., Разумеев К.Э. Разработка и исследование нитей специальных структур технического назначения // Швейная промышленность. – 2014, 1.14. С.32...34.

2. Федорова Н.Е., Разумеев К.Э., Голайдо С.А. Свойства пряжи со специальным скреплением волокон // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. С.40...41.

3. Патент № 2266989 С1 Российская Федерация, МПК D02J 3/18. Способ получения пряжи: №2004122794/12: заявл. 27.07.2004 : опубл. 27.12.2005 / А.Ф. Капитанов, В.М. Горчакова, Е.С. Цыганова, В.А. Баталенкова; заявитель Московский государственный текстильный университет имени А.Н. Косыгина.

4. Разумеев К.Э., Федорова Н.Е. Исследование сил трения между волокнами полушерстяной ленты в целях обоснования технологии переработки полуфабрикатов прядения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 2. С. 64...67.

5. Мельникова Е.С., Щукина Е.Л., Волков В.А., Капитанов А.Ф. Обоснование параметров режима технологии пряжи с адгезионным скреплением волокон // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С. 36...39.

6. Харabutова А.Г., Горчакова В.М. Разработка технологии нетканого материала строительного назначения с использованием пропиточных композиций // Сб. научн. тр. аспирантов. – М.: Московский государственный университет дизайна и технологии, 2014. С. 30...33.

7. Копаница Н.О., Устинов А.М., Пляскин А.С. Использование продуктов текстильного производства в качестве преднапряженного армирования композита // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 40...45. - DOI 10.47367/0021-3497_2021 1 40.

8. Жерносек С. В., Ольшанский В. И. Модификация структуры композиционных текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С. 41...43.

9. Белова И. С. Обоснование метода оценки адгезии волокнистых материалов к связующему при выработке пряжи клеевым способом // Технологии и качество. – 2019, № 4(46). С. 3...7. - DOI 10.34216/2587-6147-2019-4-46-3-7.

10. Рудовский П.Н., Белова И.С. Анализ и перспективы клеевых способов формирования пряжи // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2019, № 1-1. С. 186...189.

11. Patent № EP2832780B1, European Patent Office. Rubber-Based Pressure Sensitive Adhesive Foam / Pierre Reinhard Bieber, Petra Stegmaier, Siegfried Rainer Goeb, 2019.

12. Patent № US6579391, USA. Method for foam bonding of spunlace fabric to produce enhanced fabric characteristics / Shiftier Donald A., Shahani A.. 2003.

13. Patent № KR101224315 B1, South Korea. Composite I Лютер Стоктон Сюзанна Мари Машельски Дейдре и Стрэнд Гарольд Кристиан Фаулер Молодой Сэм Ким Герт Йоханнес Клаазенфридерикс Ти. Столмайерферена М. г. Тисде Чао Дон Чанг Карин Кэтчер, 2018.

14. Patent № W02020075651A1, Japan, foamed polyurethane elastomer raw material, foamed polyurethane elastomer, middle sole, and method for preparing foamed polyurethane elastomer / Масахиро Аоки и Такаши Окаяма, 2020.

15. Патент № RU 2735367 С1, Российская Федерация. Способ получения функционализированных полимеров и устройство для его осуществления / Огородцев Д.Н., Карев П.М. и др.: Опубл. 30.10.2020, Патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью "ОКАПОЛ".

16. Патент № RU 2746324 С1, Российская Федерация. Состав для обработки пряжи из полиэфирных волокон / Степанова Т.Ю., Шикова Т.Г., Рябчикова А.В. : Опубл. 12.04.2021, Патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный химико-технологический университет".

REFERENCES

1. Fedorova N.E., Razumeev K.E. Development and research of threads of special structures for technical purposes // Sewing industry. – 2014, 1.14. P.32...34.

2. Fedorova N.E., Razumeev K.E., Golaido S.A. Properties of yarn with special fiber bonding // Textile and Light Industry. – 2018. P.40...41.

3. Patent No. 2266989 C1 Russian Federation, IPC D02J 3/18. The method of obtaining yarn: No. 2004122794/12: Appl. 07/27/2004 : publ. December 27, 2005 / A.F. Kapitanov, V.M. Gorchakova, E.S. Tsyganova, V.A. Batalenkov; applicant Moscow State Textile University named after A.N. Kosygin.

4. Razumeev K.E., Fedorova N.E. Investigation of the friction forces between the fibers of a semi-woolen tape in order to substantiate the technology of processing semi-finished products of spinning // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2019, No. 2. S. 64 ... 67.

5. Melnikova E.S., Shchukina E.L., Volkov V.A., Kapitanov A.F. Substantiation of the parameters of the mode of technology of yarn with adhesive bonding fibers // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2007, No. 2. P. 36 ... 39.

6. Kharabutova A.G., Gorchakova V.M. Development of technology of non-woven material for construction purposes using impregnating compositions // Sat. scientific tr. graduate students. - M.: Moscow State University of Design and Technology, 2014. P. 30 ... 33.

7. Kopanitsa N.O., Ustinov A.M., Plyaskin A.S. The use of textile products as prestressed reinforcement of the composite // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 1. P. 40...45. - DOI 10.47367/0021-3497_2021 1 40.

8. Zhernosek S.V., Olshansky V.I. Modification of the structure of composite textile materials under the influence of microwave radiation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, No. 6. P. 41...43.

9. Belova I. S. Substantiation of the method for assessing the adhesion of fibrous materials to a binder during the production of yarn by the adhesive method // Technologies and quality. – 2019, No. 4(46). S. 3...7. - DOI 10.34216/2587-6147-2019-4-46-3-7.

10. Rudovsky P.N., Belova I.S. Analysis and prospects of adhesive methods of yarn formation // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (SMARTEX). - 2019, No. 1-1. pp. 186...189.

11. Patent No. EP2832780B1, European Patent Office. Rubber-Based Pressure Sensitive Adhesive Foam / Pierre Reinhard Bieber, Petra Stegmaier, Siegfried Rainer Goeb, 2019.

12. Patent No. US6579391, USA. Method for foam bonding of spunlace fabric to produce enhanced fabric characteristics / Shiftier Donald A., Shahani A.. 2003.

13. Patent No. KR101224315 B1, South Korea. Composite I Luther Stockton Susanne Marie Maschelsky Dsydre and Strand Harold Christian Fowler Young Sam Kim Geert Johannes Klaasen-friederichs Tee. Stolmaierferena M. G. Tisde Chao Don Chang Karin Catcher, 2018.

14. Patent No. W02020075651A1, Japan, foamed polyurethane elastomer raw material, foamed polyurethane elastomer, middle sole, and method for preparing foamed polyurethane elastomer / Masahiro Aoki and Takashi Okayama, 2020.

15. Patent No. RU 2735367 C1, Russian Federation. A method for obtaining functionalized polymers and a device for its implementation / Ogorodtsev D.N., Karev P.M. and others: Publ. 30.10.2020, Patent holders: Limited Liability Company "OKAPOL".

16. Patent No. RU 2746324 C1, Russian Federation. Composition for processing yarn from polyester fibers / Stepanova T.Yu., Shikova T.G., Ryabchikova A.V. : Published 04/12/2021, Patent holders: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo State University of Chemical Technology"

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума. Поступила 20.09.21.

УДК677.027.625:677.4:661.666
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_141

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИКАПРОАМИДНЫХ ВОЛОКОН ТЕРМОРЕАКТИВНЫМИ СМОЛАМИ НА ПРОЦЕСС ТЕРМООКИСЛЕНИЯ*

EFFECT OF SURFACE MODIFICATION OF POLYCAPROAMIDE FIBERS BY THERMOSETTING RESINS ON THE PROCESS OF THERMAL OXIDATION

М.А. МОРОЗОВА, Л.В. РЕДИНА

M.A. MOROZOVA, L.V. REDINA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A. N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: 180193@stud.rguk.ru, redina-lv@rguk.ru

Цель работы – исследование и выбор модификатора, позволяющего осуществить процесс термоокислительной стабилизации поликапроамидных волокон с сохранением волокнистой структуры. Поверхностная модификация проводилась термореактивными смолами: силоксановым каучуком, фторполимерным латексом и меламинформальдегидной смолой.

Модификацию поликапроамидных волокон проводили методом пропитки, термоокислительную стабилизацию (предокисление) – в электрошкафу с вентилятором при постепенном повышении температуры от 180 до 230°C в среде воздуха в течение 6 часов.

Термические и кинетические характеристики процесса разложения модифицированного поликапроамидного волокна изучали при помощи термогравиметрического анализатора в области температур от 20 до 650°C при скорости нагрева 10°C/мин в воздушной среде.

Изучены термические и кинетические характеристики процесса разложения модифицированных поликапроамидных волокон.

Показано, что силоксановый каучук в качестве модификатора позволяет более существенно влиять на процесс термоокисления, оказывая стабилизирующее действие на пиролиз поликапроамидных волокон.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90055.

The purpose of the work is to study and select a modifier that allows to carry out the process of thermal-oxidative stabilization of polycaproamide fibers with the preservation of the fibrous structure. The surface modification was produced with thermosetting resins: siloxane rubber, fluoropolymer latex and melamine formaldehyde resin.

Modification of polycaproamide fibers was carried out by impregnation, thermal - oxidative stabilization (pre-oxidation) - in an electric cabinet with a fan in a gradual increase of temperature from 180 to 230 °C in the air for 6 hours.

The thermal and kinetic characteristics of the decomposition process of modified polycaproamide fibers were studied using a thermogravimetric analyzer in the temperature range from 20 to 650 °C at a heating rate of 10 °C / min in air.

The thermal and kinetic characteristics of the decomposition process of modified polycaproamide fibers are studied.

It is shown that siloxane rubber as a modifier allows a more significant influence on the process of thermal oxidation, having a stabilizing effect on the pyrolysis of polycaproamide fibers.

Ключевые слова: поликапроамидная техническая нить, фторполимерный латекс, меламинформальдегидная смола, силоксановый каучук, предокисление, термогравиметрический анализ.

Keywords: polycaproamide technical thread, siloxane rubber, fluoropolymer latex, melamine formaldehyde resin, pre-oxidation, thermogravimetric analysis.

Разработка новых технологий получения конструкционных материалов является одним из приоритетных направлений развития науки и техники. Важнейшим элементом композитов конструкционного назначения являются армирующие волокна, в качестве которых обычно используют стеклянные, базальтовые, арамидные и углеродные волокна. Наиболее перспективными армирующими материалами являются углеродные волокна (УВ), так как они обладают комплексом уникальных свойств: высокими удельными прочностными характеристиками, высокой термостойкостью, устойчивостью к химическим и другим внешним воздействиям.

Сдерживающим фактором использования УВ является их дороговизна. Наибольшие объемы производства относят к углеродным волокнам из полиакрилонитрильных (ПАН)-прекурсоров [1], но они имеют довольно высокую стоимость, что ограничивает их использование в массовом сегменте.

На сегодняшний день по-прежнему остается актуальной задача поиска новых

дешевых и доступных источников для получения УВ.

Экономически выгодным может быть применение в качестве прекурсора многотоннажных видов волокон, например, поликапроамидных (ПКА), так как они занимают наибольшую долю российского рынка технических нитей (ПКА - 22 тыс. тонн, ПЭТФ - 13,2 тыс. тонн, ПП - 700 тонн, ПАН - 57 тонн) [2], степень кристалличности данных волокон выше, чем у ПАН (ПКА - 70%, ПАН - 65%), а содержание углерода в ПКА сопоставимо с содержанием углерода в ПАН (ПКА - 63,7%, ПАН - 67,9%).

Потенциальная стоимость УВ на основе ПКА-прекурсора может быть в два-три раза ниже стоимости классических углеродных волокон на основе ПАН. Работы по этому направлению ведутся в мире. В 70-е годы двадцатого столетия проводились работы по получению УВ из полиамидов, но высокие прочностные характеристики достигнуты не были [3]. Сейчас также наблюдается все больший интерес к исследованиям и разработкам технологии углеродных ма-

териалов, получаемых из модифицированных полиамидных прекурсоров [4...7].

ПКА – термопластичный полимер, поэтому актуальной задачей является перевод волокна в неплавкое состояние с сохранением волокнистой структуры, что может быть достигнуто путем поверхностной модификации волокон веществами, способствующими улучшению физико-механических характеристик, а также термостойкости, например, термореактивными смолами [8...10].

В качестве прекурсора была использована высокопрочная поликапроамидная нить линейной плотностью 187 текс (ПАО "КуйбышевАзот", ТУ 2272-028-00205311–04), модификаторами служили – силиксовый каучук (СКТН-А), меламинформальдегидная смола, латекс фторполимерный (ЛФ-2).

Модификацию ПКА волокон проводили методом пропитки, термоокислительную стабилизацию (предокисление) – в электрошкафу с вентилятором при постепенном повышении температуры от 180 до 230° в среде воздуха в течение 6 часов.

Термические и кинетические характеристики процесса разложения модифицированного ПКА волокна изучали при помощи термогравиметрического анализатора (ТГА) TGA Q50 фирмы TA Instruments (США) в области температур от 20 до 650°С при скорости нагрева 10°С/мин в воздушной среде.

Процесс получения УВ включает три основные стадии: термоокислительная стабилизация, карбонизация и графитация. Наиболее важной стадией, на которой происходит образование предструктур, является предокисление.

Исходное волокно, в отличие от модифицированных, после термоокислительной стабилизации полностью расплавилось, не

выдержав высоких температур, что подтверждает важность и необходимость предварительной поверхностной обработки волокна. У обработанных термореактивными смолами ПКА волокон выявлена незначительная (до 10 %) потеря массы и усадка. Наиболее сильная усадка наблюдается у волокна, обработанного фторполимерным латексом – после температурного воздействия она составила ~ 31,7 %, а силиксовым каучуком ~ 18,8 %. При этом методом оптической микроскопии установлено сохранение волокнистой структуры. Все это указывает на возможность перевода ПКА волокна в неплавкое состояние и получения из него углеродного волокна.

Усадка волокон, модифицированных меламинформальдегидной смолой, составила ~ 19,7 %. После процесса предокисления волокна оплавилась, потемнела, утратив свои прочностные свойства, таким образом, не обеспечивая волокну требуемые свойства, в сравнении с латексом и каучуком.

Из данных ТГА, приведенных в табл. 1 (влияние модификаторов на кинетические параметры процесса термодеструкции поликапроамидного волокна в воздушной среде), видно, что термическое разложение волокон, модифицированных термореактивными смолами, начинается в области более низких температур – 225...270°С по сравнению с исходным поликапроамидным волокном. Максимальная скорость разложения модифицированных волокон в 2,5 раза ниже, чем у необработанного волокна. Снижение температуры начала и максимальной скорости разложения способствует созданию благоприятных условий для образования предструктур, более устойчивых к высокотемпературным воздействиям.

Таблица 1

Наименование образца ПКА волокна	t начала разложения, °С	t _{max} скорости разложения, °С	V _{max} скорость разложения, %/мин
Исходный	362	444	17,52
Модифицированное силиксовым каучуком	до предокисления	250	431
	после предокисления	270	440
Модифицированное фторполимерным латексом	до предокисления	243	438
	после предокисления	250	442
Модифицированное меламинформальдегидной смолой	до предокисления	225	313
	после предокисления	230	311

Термическое разложение предокисленных волокон, обработанных каучуком, начинается при 270 °С со скоростью разложения 0,1 %/мин, у непередокисленных волокон при 650°С остается 11% массы (табл. 2 – влияние модификаторов на коксовый остаток поликапроамидного волокна при нагревании в воздушной среде), в то время

как у предокисленных при той же температуре 14%. Как показывают данные анализа выхода коксового остатка, определенные из кривых ТГА, способность поликапроамидных волокон к коксообразованию в присутствии силоксанового каучука существенно увеличивается.

Т а б л и ц а 2

Наименование образца ПКА волокна	Коксовый остаток (%) при t, °С						
	300	400	450	500	600	650	
Исходный	95	70	40	10	0	0	
Модифицированное силоксановым каучуком	до предокисления	99	80	55	32	15	И
	после предокисления	99	85	55	30	15	14
Модифицированное фторполимерным латексом	до предокисления	95	65	20	10	2	0
	после предокисления	95	65	20	15	0	0
Модифицированное меламинформальдегидной смолой	до предокисления	87	45	25	25	10	5
	после предокисления	87	40	35	30	7	0

Поверхностная модификация ПКА волокон фторполимерным латексом менее существенно повлияла на термическую стабильность поликапроамидного волокна. Модифицированное латексом волокно не выдержало высоких температур в процессе термолиза, кроме того, термическое разложение начинается при еще более низких температурах и проходит при скорости выше, чем у волокон, модифицированных меламинформальдегидной смолой и каучуком.

Сравнивая поведение волокон, обработанных латексом до и после процесса термоокисления, видно, что оно существенно не отличается: температура максимальной скорости разложения, скорость разложения и температурные интервалы изменения поведения образца имеют лишь незначительные различия.

Обработка меламинформальдегидной смолой незначительно улучшила термостойкость ПКА волокон. Модифицированное волокно начало разлагаться при температуре ниже температуры разложения исходного волокна – в интервале 310...313°С со скоростью – 8%/мин, однако исходное волокно полностью сгорело при температуре 530°С, в то время как модифицированные образцы при такой же температуре имели в массе 20%.

С увеличением температуры скорость разложения снижается, и происходит структурирование полимера с сохранением массы волокна. Так, при температурах 600...650°С модифицированные волокна еще не сгорают и содержат 2...15% от начальной массы.

Термическое разложение модифицированных ПКА волокон после процесса предокисления начинается при температурах на 10...30°С выше, чем у модифицированных волокон до предокисления. Это может быть связано с частичной перестройкой структуры волокна, образованием новых связей на стадии предварительной стабилизации.

Предокисленные волокна, обработанные силоксановым каучуком, за счет снижения скорости разложения и благодаря появлению пика в более низкой температурной области, оказались наиболее термостойкими – при 742°С у них сохраняется 14% от начальной массы, в отличие от образцов, обработанных латексом и меламинформальдегидной смолой. Поэтому данная термореактивная смола является наиболее перспективной в дальнейшем ее использовании для поверхностной модификации поликапроамидного волокна для производства УВ.

Полученные данные указывают на стабилизирующее действие силоксанового каучука по отношению к ПКА волокну. Показана возможность перевода ПКА в неплавкое состояние с сохранением волокнистой структуры, что является первым важным шагом по получению на его основе УВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лысенко А.А.* Производство углеродных волокон: реалии и перспективы (2011-2025 гг.) // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 4. С. 55...59.
2. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. План мероприятий ("дорожная карта") по развитию подотрасли по производству искусственных и синтетических волокон и нитей на период до 2025 года. -2015.
3. *Конкин А.А.* Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. – М.: Химия, 1974.
4. *Karacan I.* Characterization of amorphous carbon fibers produced from thermally stabilized polyamide 6 fibers // J. Ind. Text. – Vol. 65, 2016. P. 1...27.
5. *Cai L., Qi Z., Xu J., Guo B., Huang Z.* Thermo-oxidative degradation of Nylon 1010 films: Colorimetric evaluation and its correlation with material properties // Chinese Chemical Letters. – Vol. 28 (5), 2017. P.949...954.
6. *Okamba-Diogo O., Femagut F., Guilment J., Pery F., Fayolle B., Richaud E.* Thermal stabilization of polyamide 11 by phenolic antioxidants // Polymer Degradation and Stability. – Vol. 179, 2020. P. 109...206.
7. *Qi S., Wen X.* New insight into the thermal-oxidative stability of polyamide 6: a comparison investigation on the effect of hindered amine and CuI/KI // Polymer engineering and science. – Vol. 61 (2), 2021. P.348...361.
8. *Giri R., Nayak L., Rahaman M.* Flame and fire retardancy of polymer-based composites //Materials Research Innovations. – Vol. 25 (2), 2021. P. 104...132.
9. *Zielecka M., Rabajczyk A., Jurecki L.* Flame resistant silicone-containing coating materials // Coatings. – Vol. 10 (479), 2020. P. 1...14.
10. *Lazar S., Kolibaba T., Grunlan J.* Flame-retardant surface treatments // Nature Reviews Materials. – Vol. 5, 2020. P. 259...275.

1. *Lysenko A.A.* Production of carbon fibers: realities and prospects (2011-2025) // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, No. 4. P.55...59.

2. Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. Action plan ("road map") for the development of the sub-sector for the production of artificial and synthetic fibers and threads for the period up to 2025. - 2015.

3. *Konkin A.A.* Carbon and other heat-resistant fibrous materials. - M.: Chemistry, 1974.

4. *Karacan I.* Characterization of amorphous carbon fibers produced from thermally stabilized polyamide 6 fibers // J. Ind. Text. – Vol. 65, 2016. P. 1...27.

5. *Cai L., Qi Z., Xu J., Guo B., Huang Z.* Thermo-oxidative degradation of Nylon 1010 films: Colorimetric evaluation and its correlation with material properties // Chinese Chemical Letters. – Vol. 28 (5), 2017. P.949...954.

6. *Okamba-Diogo O., Femagut F., Guilment J., Pery F., Fayolle B., Richaud E.* Thermal stabilization of polyamide 11 by phenolic antioxidants // Polymer Degradation and Stability. – Vol. 179, 2020. P. 109...206.

7. *Qi S., Wen X.* New insight into the thermal-oxidative stability of polyamide 6: a comparison investigation on the effect of hindered amine and CuI/KI // Polymer engineering and science. – Vol. 61(2), 2021. P.348...361.

8. *Giri R., Nayak L., Rahaman M.* Flame and fire retardancy of polymer-based composites //Materials Research Innovations. – Vol. 25 (2), 2021. P. 104...132.

9. *Zielecka M., Rabajczyk A., Jurecki L.* Flame resistant silicone-containing coating materials // Coatings. – Vol. 10 (479), 2020. P. 1...14.

10. *Lazar S., Kolibaba T., Grunlan J.* Flame-retardant surface treatments // Nature Reviews Materials. – Vol. 5, 2020. P. 259...275.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума. Поступила 20.09.21.

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЧ-ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
К ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЯМ***

**APPLICATION OF LOW-PRESSURE RF PLASMA
TO INCREASE THE ADHESION OF SYNTHETIC MATERIALS
TO POLYMER BINDER AND METAL COATINGS**

*Ю.А. ТИМОШИНА, И.И. МОРОЗОВА, Ю.В. ХАРАПУДЬКО, А.Е. КАРНОУХОВ,
И.И. КАРИМУЛЛИН, Э.Ф. ВОЗНЕСЕНСКИЙ, Н.В. ТИХОНОВА*

*YU.A. TIMOSHINA, I.I. MOROZOVA, YU.V. KHARAPUDKO, A.E. KARNOUKHOV,
I.I. KARIMULLIN, E.F. VOZNESENSKY, N.V. TIKHONOVA*

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technology University)

E-mail: ybuki@mail.ru

Качество современных многокомпонентных функциональных композиционных материалов на текстильной основе определяется морфологией материала, наличием функциональных слоев и наполнителей, при этом значительное влияние на эксплуатационные характеристики данных материалов оказывает адгезия между всеми компонентами. В работе исследована возможность применения обработки синтетических текстильных материалов в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления для повышения их адгезионного взаимодействия в составе многокомпонентных функциональных материалов. Показано, что модификация в ВЧ-плазме воздуха синтетических полимерных материалов на основе полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), полиамида (ПА) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) обеспечивает повышение адгезионного взаимодействия с матричными полимерами, клеевыми композициями и металлическими покрытиями. Предварительная ВЧ-плазменная модификация высокопрочных синтетических волокон может быть использована для получения волокнистых полимерных композиционных материалов с повышенной адгезионной прочностью, многослойных материалов на текстильной основе с использованием клеевых композиций, в том числе для устойчивой фиксации дисперсных наполнителей, металлизированных текстильных материалов и материалов, ламинированных полимерными пленками.

The quality of modern multicomponent functional composite materials on a textile basis is determined by the material morphology, the presence of functional layers and fillers, while the adhesion between all components has a significant impact on the operational characteristics of these materials. The paper investigated the possibility of using the treatment of synthetic textile materials in the plasma of radio-frequency (RF) discharge of reduced pressure to increase their adhesive interaction as part of multicomponent functional materials. It is shown that the modification of

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Нанотехнологии и наноматериалы" ФГБОУ ВО "КНИТУ".

the air plasma of synthetic polymer materials based on polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyamide (PA) and polyethylene terephthalate (PET) ensures an increase in adhesive interaction with matrix polymers, adhesive compositions and metal coatings. Preliminary RF plasma modification of high-strength synthetic fibers can be used to obtain fibrous polymer composite materials with increased adhesive strength, multilayer textile materials using adhesive compositions, including for stable fixation of dispersed fillers, metallized textile materials and materials laminated with polymer films.

Ключевые слова: полимерный материал, синтетическое волокно, функциональный текстиль, адгезия, высокочастотный разряд, плазменная модификация, полимерная матрица, металлическое покрытие.

Keywords: polymeric material, synthetic fiber, functional textiles, adhesion, radio-frequency discharge, plasma modification, polymer matrix, metal coating.

В настоящее время производство технического текстиля является динамично развивающейся подотраслью текстильной промышленности. Возрастающая потребность в технических текстильных материалах в различных сферах жизни, а также развитие техники и новых технологий определяет актуальность реализации инновационных проектов в области производства технического текстиля со специальными свойствами. На сегодняшний день на мировом рынке функционального текстиля представлено многообразие текстильных материалов с различными свойствами, в том числе высокосорбционными, барьерными, фильтрующими, антибактериальными, антистатическими, электропроводящими, экранирующими, защитными и др. [1...4].

Разработка текстиля со специальными свойствами, в том числе многофункциональных материалов, требует использования различных методов модификации, позволяющих получать сложные композиционные текстильные структуры, содержащие в заданном порядке различные функциональные слои и наполнители. Интерес исследователей и производителей в данной области объясняется потенциальными возможностями получения текстильных материалов, комплексно сочетающих разнообразные функциональные свойства. Преимущества многокомпонентных текстильных материалов, полученных композитными методами, состоит в возможности широкого варьирования и прогнозируемости

свойств в зависимости от используемых компонентов, их взаимного расположения и структуры конечного материала, а также используемых технологий получения. Кроме того, значительное влияние на эксплуатационные характеристики данных материалов оказывает адгезионное взаимодействие между всеми компонентами, обеспечивающее получение функциональных материалов с высокой износостойкостью и устойчивыми во времени свойствами.

К перспективным методам модификации полимерных материалов для улучшения адгезии и придания специальных свойств относят воздействие плазмы газового разряда. Данные методы исключают использование жидких химических реагентов, являются экологичными и ресурсоэффективными, при этом позволяют направленно регулировать свойства поверхности модифицируемых материалов [5...8]. Для получения многокомпонентных материалов со специальными свойствами плазменная обработка может применяться как самостоятельно, так и в совокупности с другими методами [9].

В представленной работе исследована возможность применения высокочастотной (ВЧ) плазменной обработки синтетических текстильных материалов для повышения их адгезионного взаимодействия в составе функциональных материалов, модифицированных дисперсными наполнителями, полимерными и металлическими покрытиями.

В качестве объектов исследования выбраны синтетические текстильные материалы и полимерные пленки:

– высокопрочные многофиламентные сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые (СВМПЭ) (Pegasus Hseries Fiber, Китай), полипропиленовые (ПП) волокна (ООО "Стропа-Юг", г. Краснодар, Россия) и полиамидные (ПА) волокна (ООО "Курскхимволокно", г. Курск, Россия) для армирования полимерных композиционных материалов;

– нетканые ПП (АО "Комитекс", г. Сыктывкар, Россия) и тканые полиэфирные (ПЭФ) материалы (ОАО "Моготекс", г. Могилев, Республика Беларусь) в качестве текстильной основы для материалов с дисперсными наполнителями [10];

– ПП и ПЭФ текстильные ленты (ООО "Квинта", г. Казань, Россия), полиэтиленовые (ПЭ), ПП, ПА и полиэтилентерефталатные (ПЭТФ) пленки (ООО "Данафлекс-нано", г. Казань, Россия), используемые для нанесения металлических покрытий [11].

Плазменная обработка образцов синтетических полимерных материалов осуществлялась на экспериментальной вакуумной ВЧ-плазменной установке (ФГБОУ ВО "КНИТУ", Россия) при подаваемой в разряд мощности 1,4...2,4 кВт, рабочем давлении 10...30 Па, расходе плазмообразующего воздуха 0,01...0,10 г/с в течение 60...600 с [12]. Металлизацию материалов осуществляли в установке магнетронного напыления со сбалансированным магнетроном при давлении 0,05...1 Па, мощности магнетрона 1...10 кВт, в течение 10...15 мин в плазмообразующем газе аргоне, мишени – медь (99,9 %) и хром (99,7 %) [11].

Для оценки влияния ВЧ-плазменной обработки на значения краевого угла смачивания поверхности полимерных пленок использовали прибор Kruss Easy Drop DSA 20E (Германия). Определение коэффициента поверхностного натяжения проводили стандартным методом (ASTM-D-2578) с использованием маркеров с тестовыми чернилами. Для оценки адгезионных свойств СВМПЭ и ПА волокон к полимерным матрицам использовали метод wet-pull-out [13], позволяющий определить нормиро-

ванную величину разрушающей нагрузки микрокомпозита по силе выдергивания волокна из матрицы, в качестве матрицы использовали трехкомпонентную ПЭФ смолу [14]. Адгезионную прочность соединения ПП нетканых и ПЭФ тканых материалов с полимерными связующими определяли по стандартной методике испытаний прочности клеевого соединения при отслаивании (ГОСТ 28966.1–91), в качестве связующих использовали полиуретановую дисперсию "Eurostyle 100" (ООО "Евростиль", г. Ростов-на-Дону, Россия), полиуретановую дисперсию "Dis-Line 2" (ООО "ПолиМикс Казань", г. Казань, Россия), акриловую дисперсию "Акрилан 421" (ООО "Акрилан", г. Владимир, Россия), порошковый полиуретановый термоклей "Rototerm" (ООО "Полимер Корп", г. Казань, Россия). Для оценки адгезии металлического покрытия к ПП и ПЭФ текстильным лентам, ПП и ПЭТФ пленкам использован метод испытания на расслаивание с использованием тестовой липкой ленты 3М 610 Scotch® [11]. Испытание образцов по определению адгезионных свойств к полимерным связующим и металлическим покрытиям проводили на универсальной испытательной машине Autograph AGS-X (Shimadzu, Япония). Исследования поверхности материалов проводили методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) на микроскопе Olympus OLS Lext 4100.

На первом этапе исследовали влияние модификации в плазме ВЧ-разряда пониженного давления в среде воздуха на поверхностные свойства материалов на основе карбо- и гетероцепных синтетических полимеров. В качестве объектов использованы ПЭ, ПП, ПА и ПЭТФ пленки. Результаты влияния ВЧ-плазменной модификации на значения краевого угла смачивания и коэффициент поверхностного натяжения исследуемых образцов представлены в табл. 1, наглядные изображения капли дистиллированной воды на поверхности ПЭ и ПЭТФ пленок приведены на рис. 1 (влияние ВЧ-плазменной модификации на значения краевого угла смачивания образцов ПЭ (а, б) и ПЭТФ пленок (в, г): а, в – исходные образцы; б, г – модифицированные образцы).

Полимерная пленка	Краевой угол смачивания, град		Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м	
	до модификации	после модификации	до модификации	после модификации
ПЭ	88	25	32	60
ПП	52	29	30	56
ПА	37	15	46	60
ПЭТФ	65	16	40	60

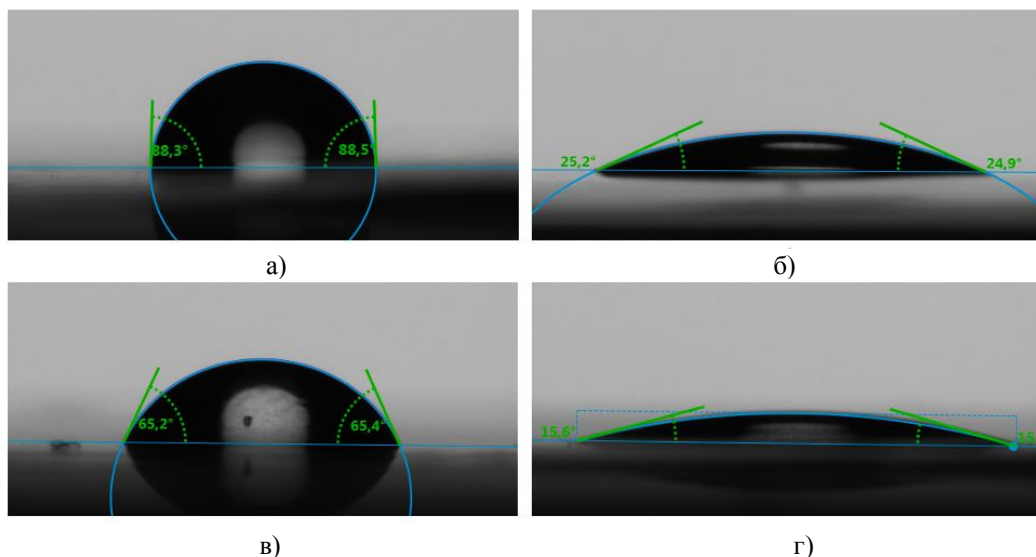


Рис. 1

По полученным данным (табл. 1, рис. 1) можно сделать вывод, что модификация синтетических полимерных материалов в ВЧ-плазме воздуха приводит к снижению значений краевого угла смачивания на 44...75% и повышению величины коэффициента поверхностного натяжения на 30...88% по сравнению с немодифицированными образцами. При этом необходимо отметить, что из-за ограничения используемых тестовых маркеров по максимальной величине коэффициента поверхностного натяжения реальное значение данного параметра для большинства исследуемых материалов может превосходить 60 мН/м. Снижение значений краевого угла смачивания поверхности и поверхностной энергии полимерных пленок свидетельствует о повышении межмолекулярного взаимодействия частиц на поверхности раздела фаз, что создает предпосылки для улучшения адгезионных свойств исследуемых материалов.

На втором этапе оценивали влияние ВЧ-плазменной модификации на адгезионное

взаимодействие синтетических текстильных материалов и полимерных пленок с матричными полимерами и клеевыми композициями. Для оценки адгезии высокопрочных синтетических волокон определяли нормированную величину разрушающей нагрузки микрокомпозитов, изготовленных на основе исходных, модифицированных волокон и ПЭФ матрицы.

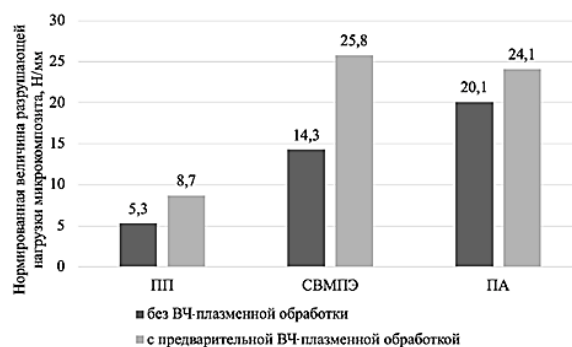


Рис. 2

Полученные результаты представлены на рис. 2 (влияние ВЧ-плазменной модификации на нормированную величину разру-

шающей нагрузки микрокомпозитов на основе СВМПЭ и ПА волокон). Адгезия ПП нетканых материалов и ПЭФ тканей к полимерным клеевым композициям на основе

полиуретанов и акрилатов оценивалась по величине прочности клеевого соединения при отслаивании, результаты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Клеевая композиция	Прочность клеевого соединения при отслаивании, Н/м			
	ПП нетканый материал		ПЭФ ткань	
	до модификации	после модификации	до модификации	после модификации
Евростайл 100	148,3	> 360,0*	480,1	1160,3
Dis-Line 2	146,6	> 360,0*	321,3	376,4
Акрилан 421	203,0	354,0	182,6	286,0
Rototerm	–	–	480,1	1160,3

П р и м е ч а н и е. * – Разрыв подложки (текстильного материала) при испытании.

Результаты исследований адгезии синтетических текстильных материалов к полимерным матрицам (рис. 2) и клеевым композициям (табл. 3 – адгезия металлического покрытия к поверхности синтетических полимерных материалов) свидетельствуют о том, что предварительная ВЧ-плазменная модификация полимерного

субстрата способствует повышению его адгезии к исследуемым полимерными связующим, при этом адгезионная прочность микрокомпозитов на основе высокопрочных синтетических волокон возрастает на 20...80 %, адгезионная прочность в системе текстильный материал/клеевая композиция увеличивается на 57...146 %.

Т а б л и ц а 3

Образец	Покрытие	Адгезия, балл (min – 0, max – 5)	
		до модификации	после модификации
ПП пленка	медь	2	4
ПЭТФ пленка	медь	4	5
ПП лента	хром	1	4
ПЭФ лента	хром	4	5

Для оценки влияния предварительной ВЧ-плазменной модификации на адгезию ПП, ПЭФ текстильных лент и ПП, ПЭФ полимерных пленок к металлическим покрытиям проводили испытания на расслаивание с использованием тестовой ленты с постоянной липкостью. Адгезия оценивалась в баллах по наличию дефектов на поверхности металлизированных материалов после отрыва липкой ленты, а также по наличию фрагментов металла на поверхности липкой ленты после отрыва (табл. 3, рис. 3 – КЛСМ-изображения ленты с постоянной липкостью после отрыва от металлизированных ПП пленок (а, б) и ПП текстильных лент (в, г): а, в – образцы без предварительной ВЧ-плазменной обработки; б, г – образцы с предварительной ВЧ-плазменной обработкой).

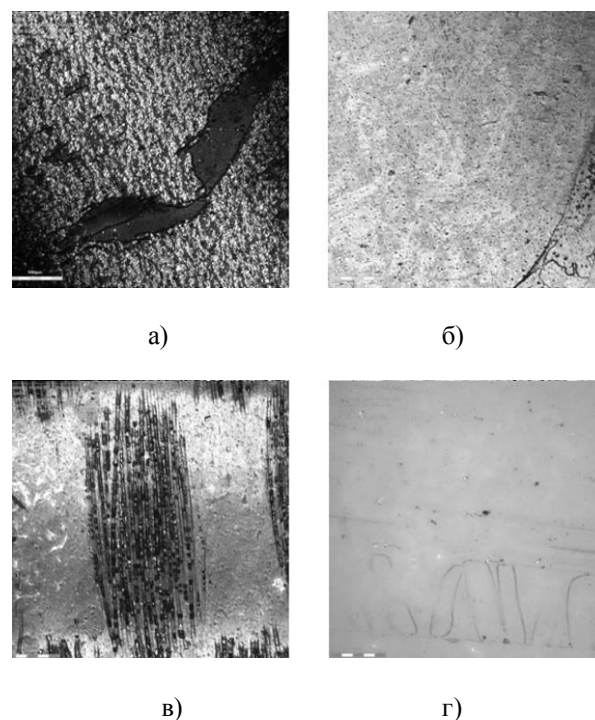


Рис. 3

Результаты исследования адгезии синтетических материалов к металлическим покрытиям (табл. 3, рис. 3) продемонстрировали, что после предварительной ВЧ-плазменной модификации адгезия полимерных материалов к металлическим покрытиям возрастает на 25...400%.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что модификация синтетических полимерных материалов на основе ПЭ, ПП, ПА и ПЭТФ в ВЧ-плазме воздуха обеспечивает повышение их адгезионного взаимодействия с матричными полимерами, клеевыми композициями и металлическими покрытиями. Повышение адгезионных свойств происходит в результате окисления поверхности полимеров в процессе ВЧ-плазменной модификации в среде воздуха, образованию на их поверхности полярных азот- и кислородсодержащих функциональных групп, что приводит к повышению поверхностной энергии, смачиваемости поверхности и способствует повышению межмолекулярного взаимодействия на поверхности раздела фаз [15], [16]. Полученные данные свидетельствуют, что получаемые эффекты зависят от природы полимера, а наибольший прирост адгезионных характеристик наблюдается для материалов на основе карбоцепных полимеров, что связано с отсутствием на поверхности немодифицированных образцов функциональных групп.

Предварительная ВЧ-плазменная модификация высокопрочных синтетических волокон может быть использована для получения волокнистых полимерных композиционных материалов с повышенной адгезионной прочностью; многослойных материалов на текстильной основе с использованием клеевых композиций, в том числе для устойчивой фиксации дисперсных наполнителей; металлизированных текстильных материалов и материалов, ламинированных полимерными пленками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришанова И.А., Абуталипова Л.Н. Технический текстиль как перспективное направление раз-

вития конкурентоспособной промышленности Татарстана // Вестник технологического университета. – 2016. Т. 19, № 17. С. 84...87.

2. Гобашко Е.А., Леонов С.А., Малевская-Малевиц Е.Д. Современное состояние и перспективные тенденции текстильной отрасли легкой промышленности России // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 1. С. 23...28.

3. Трещалин М.Ю. Преимущества производства технического текстиля и нетканых материалов в России // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2018, № 1-1. С. 281...289.

4. Енеке М. Мировой рынок технического текстиля: влияние кризиса, тенденции, перспективы // Технический текстиль. – 2012, № 24. С. 210.

5. Гильман А.Б. Воздействие низкотемпературной плазмы как эффективный метод модификации поверхности полимерных материалов // Химия высоких энергий. – 2003. Т. 37, № 1. С. 20...26.

6. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И., Титов В.А. Плазменное модифицирование текстильных материалов: перспективы и проблемы // Российский химический журнал. – 2002. Т. 46, №1. С.103...115.

7. Максимов А.И., Никифоров А.Ю. Сопоставление возможностей плазменного и плазменно-растворного модифицирования полимерных материалов в жидкой фазе // Химия высоких энергий. – 2007. Т. 41, № 6. С. 513...519.

8. Sharnina L.V. Low-temperature plasma as the basis for creation of modern textile chemical technologies // Fibre Chemistry. – V. 36, № 6, 2004. P. 431...436.

9. Абдуллина В.Х., Сергеева Е.А., Панкова Е.А., Абдуллин И.Ш., Кашипов Н.Ф. Влияние плазмоактивации на фиксацию наночастиц серебра на поверхности полипропиленового волокна // Вестник Казанского технологического университета. – 2009, № 3. С. 53...56.

10. Морозова И.И., Тихонова Н.В., Тимошина Ю.А., Вознесенский Э.Ф. Разработка методики получения фильтрующе-сорбирующего текстильного материала // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2020, №4.

11. Karnoukhov A.E., Timoshina Y.A., Voznesensky E.F., Sysoev V.A., Krasina I.V., Tikhonova N.V. Study of the adhesion of metal coatings on synthetic textile materials // Journal of Physics: Conference Series. – V. 1954, 2021. P. 012016.

12. Сергеева Е.А., Желтухин В.С., Абдуллин И.Ш. Модификация синтетических волокнистых материалов и изделий неравновесной низкотемпературной плазмой. Теория, модели, методы. – Казань: КГТУ, 2011.

13. Кудинов В.В., Крылов И.К., Корнеева Н.В., Мамонов В.И., Геров М.В. Оценка физико-химического взаимодействия между волокном и матрицей при получении композиционных материалов методом wet-pull-out // Физика и химия обработки материалов. – 2007, № 6. С. 68...72.

14. Karimullin I., Timoshina Y., Voznesensky E., Sysoev V., Kulevtsov G., Shagivalieva R. Influence of

processing in radio-frequency low pressure plasma on the adhesion of synthetic fibers to polymer binders // *Key Engineering Materials*. – V. 899, 2021. P.144...149.

15. Тимошина Ю.А. Влияние молекулярного строения волоконобразующих полимеров на эффекты ВЧ плазменной модификации синтетических волокон // *Изв. вузов. Технология легкой промышленности*. – 2020, № 4.

16. Сергеева Е.А., Корнеева Н.В., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Модификация синтетических волокнистых материалов и изделий неравновесной низкотемпературной плазмой. Свойства, структура, технологии. – Казань: КГТУ, 2011.

REFERENCES

1. Grishanova I.A., Abutalipova L.N. Technical textile as a promising direction for the development of the competitive industry of Tatarstan // *Bulletin of the Technological University*. – 2016. V. 19, No. 17. P. 84...87.

2. Gobashko E.A., Leonov S.A., Malevskaya-Malevich E.D. The current state and prospective trends of the textile industry of light industry in Russia // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2019, No. 1. P. 23...28.

3. Treschalin M.Yu. Advantages of the production of technical textiles and non-woven materials in Russia // *Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (SMARTEX)*. - 2018, No. 1-1. pp. 281...289.

4. Eneke M. World market of technical textiles: the impact of the crisis, trends, prospects // *Technical Textile*. - 2012, No. 24. P. 210.

5. Gilman A.B. The impact of low-temperature plasma as an effective method for modifying the surface of polymeric materials // *High Energy Chemistry*. - 2003. V. 37, No. 1. S. 20 ... 26.

6. Kutepov A.M., Zakharov A.G., Maksimov A.I., Titov V.A. Plasma modification of textile materials: prospects and problems // *Russian Chemical Journal*. - 2002. V. 46, No. 1. P.103...115.

7. Maksimov A.I., Nikiforov A.Yu. Comparison of the possibilities of plasma and plasma-solution modification of polymeric materials in the liquid phase // *High Energy Chemistry*. – 2007. V. 41, No. 6. S. 513...519.

8. Sharnina L.V. Low-temperature plasma as the basis for the creation of modern textile chemical technologies // *Fiber Chemistry*. – V. 36, No. 6, 2004. P. 431...436.

9. Abdullina V.Kh., Sergeeva E.A., Pankova E.A., Abdullin I.Sh., Kashapov N.F. Influence of plasma activation on the fixation of silver nanoparticles on the surface of polypropylene fiber // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2009, No. 3. S. 53 ... 56.

10. Morozova I.I., Tikhonova N.V., Timoshina Yu.A., Voznesensky E.F. Development of a technique for obtaining a filtering-sorbing textile material // *Izv. universities. Light industry technology*. - 2020, No. 4.

11. Karnoukhov A.E., Timoshina Y.A., Voznesensky E.F., Sysoev V.A., Krasina I.V., Tikhonova N.V. Study of the adhesion of metal coatings on synthetic textile materials // *Journal of Physics: Conference Series*. - V. 1954, 2021. P. 012016.

12. Sergeeva E.A., Zheltukhin V.S., Abdullin I.Sh. Modification of synthetic fibrous materials and products by non-equilibrium low-temperature plasma. Theory, models, methods. – Kazan: KSTU, 2011.

13. Kudinov V.V., Krylov I.K., Korneeva N.V., Mamonov V.I., Gerov M.V. Evaluation of the physico-chemical interaction between fiber and matrix in the production of composite materials using the wet-pull-out method // *Physics and Chemistry of Materials Processing*. - 2007, No. 6. S. 68 ... 72.

14. Karimullin I., Timoshina Y., Voznesensky E., Sysoev V., Kulevtsov G., Shagivalieva R. Influence of processing in radio-frequency low pressure plasma on the adhesion of synthetic fibers to polymer binders // *Key Engineering Materials*. – V. 899, 2021. P.144...149.

15. Timoshina Yu.A. Influence of the molecular structure of fiber-forming polymers on the effects of RF plasma modification of synthetic fibers. *Izv. universities. Light industry technology*. - 2020, No. 4.

16. Sergeeva E.A., Korneeva N.V., Zenitova L.A., Abdullin I.Sh. Modification of synthetic fibrous materials and products by non-equilibrium low-temperature plasma. Properties, structure, technologies. - Kazan: KSTU, 2011.

Рекомендована кафедрой плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов. Поступила 29.09.21.

**РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ
С КОМПЛЕКСНЫМ ДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАН***

**DEVELOPMENT OF A POLYMER-
BASED COMPOSITE MATERIAL WITH A COMPLEX EFFECT
FOR THE WOUND TREATMENT**

*Ю.С. ФИДОРОВСКАЯ, Г.Е. КРИЧЕВСКИЙ, Е.О. МЕДУШЕВА,
Н.Д. ОЛТАРЖЕВСКАЯ, М.А. КОРОВИНА*

*YU.S. FIDOROVSKAYA, G.E. KRICHEVSKY, E.O. MEDUSHEVA,
N.D. OLTARZHEVSKAYA, M.A. KOROVINA*

**(ООО "НПО Текстильпрогресс", Москва,
ООО "Колетекс", Москва)**

**(LLC "SPO Textilprogress", Moscow,
LLC "Coltex", Moscow)**

E-mail: koletex@list.ru

Создание лечебных композиций, в том числе для лечения инфицированных ран на различных стадиях раневого процесса, с использованием в качестве носителей для лекарственных и биологически активных веществ природных полимеров является актуальной задачей. Широкое применение природных полимеров обусловлено их биосовместимостью, способностью к биодеградации, низкой токсичностью.

Данная публикация посвящена разработке раневого покрытия на биополимерной матрице на основе альгината натрия с применением протеолитических ферментов и антимикробных компонентов, в частности, AgNO₃. Освещена проблема инактивации протеаз серебром? и представлен вариант решения по сохранению активности ферментов в композиции с AgNO₃. Изучено влияние гамма-стерилизации на протеолитическую активность ферментов, физически иммобилизованных в гидрогелевой композиции, и реологические свойства композиции на основе альгината натрия. Подтверждена антимикробная активность композиции, содержащей серебро в наноформе в выбранной концентрации. Изучено влияние папаина в нативной и иммобилизованной форме на модель раны, полученной с использованием гидролизата животного и морского коллагена.

The creation of medical compositions for the treatment of infected wounds at various stages of the wound process, using natural polymers as carriers is an urgent task. The widespread use of natural polymers is due to their biocompatibility, biodegradability, and low toxicity.

This publication describes the development of wound dressing on a biopolymer matrix based on sodium alginate with proteolytic enzymes and bactericidal components, e.g AgNO₃. The problem of inactivation of proteases by heavy metals is highlighted and a solution is presented to preserve the activity of enzymes in the compo-

* Работа проводится в рамках выполнения Договора № 596ГРНТИ/63447 с ФГБУ «Фонд содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям).

sition with AgNO₃. The effect of enzymes physically immobilized in the hydrogel composition was studied. The antimicrobial activity of a composition based on sodium alginate containing silver in nanof orm at a selected concentration was confirmed. The effect of different forms of papain on a wound model was studied using animal and marine collagen hydrolysate. gamma sterilization on the proteolytic activity of

Ключевые слова: протеолитические ферменты, папаин, серебро, раневой процесс, ферментативная активность, наночастицы.

Keywords: proteolytic enzymes, papain, silver, wound process, enzymatic activity, nanoparticle

Введение

Гнойные раны наряду с онкологическими и сердечно-сосудистыми заболеваниями занимают ведущее место среди причин, приводящих к гибели людей. В хирургической практике ежегодно до 30% пациентов получают лечение по поводу гнойных ран мягких тканей. Это лечение требует комплексного подхода и применения как хирургических методов так и лечебных средств, предполагающих системное и местное воздействие на инфицированную рану. Для решения этих вопросов требуется объединение усилий врачей, фармацевтов, химиков, технологов. При этом при создании медицинских изделий, предназначенных для местного лечения гнойных ран, необходимо учитывать специфику протекания естественного заживления ран, а именно, для какой из его стадий – очищения раны, в том числе от гнойного отделяемого (I стадия), антимикробного воздействия (II стадия) или заключительной – (III), регенерации (восстановление, заживление) тканей используется лечебный материал [1].

Конечно, деление раневого процесса на указанные выше стадии весьма условно и в естественных условиях одна из них перетекает в другую, или они протекают последовательно-параллельно. Поэтому для их лечения в зависимости от превалирующей стадии и ситуации используются различные приемы, как хирургические (очищение раны), так и с применением лекарственных препаратов, в том числе в виде медицинских изделий направленного местного действия (гели, мази, лечебные салфетки или пластыри, содержащие субстанции ле-

карств). Будучи конкретизированы для использования на определенной стадии лечения, они требуют частой замены, что травмирует и рану, и пациента, и не всегда могут влиять на комплекс проблем, характерных для текущей стадии и требующих комплексного решения [1], [2]. Например, на I стадии необходимо очистить рану от гнойного отделяемого, однако такая рана в реальной ситуации всегда инфицирована, на начальном этапе лечения может наблюдаться кровоточивость. Врачу может быть не известна точная характеристика инфекции, поэтому желательно, чтобы одновременно с очищением раны и гемостатическим действием проводилась ее антисептическая обработка.

В предлагаемом исследовании была поставлена цель – разработать медицинское изделие для комплексной терапии гнойных ран, предполагающее одновременное очищение от гнойного отделяемого, снижение кровоточивости и антисептическое воздействие, что необходимо на I-II стадии раневого процесса.

Для решения подобной комплексной задачи требуется использовать композиционный лечебный материал, состоящий из биополимерной матрицы и наполнителей (лекарства, вспомогательные вещества и др.).

Известно, что для лизиса гнойного отделяемого на I стадии раневого процесса успешно применяются протеолитические ферменты: коллагеназа, трипсин, химопсин, лизоамидаза и др. [2]. В данном исследовании предпочтение отдано ферментам растительного происхождения, а именно папаину и бромелаину. Эти ферменты имеют ряд преимуществ: папаин,

расщепляя пептидные связи белков, обладает одновременно болеутоляющим действием, причем его действие (как и бромелаина) проявляется в широком интервале рН. Это важно в лечении ран, как и способность фермента нейтрализовать токсины. В отличие от протеаз животного происхождения у этих ферментов фибринолитическое действие более мягкое, папаин более термостабилен (сохранение специфической активности при t от 5 до 70°C); отсутствие передачи инфекции от животного к человеку делает его приемлемым для всех профессий [3].

Материалы и методы

В работе использовали:

- альгинат натрия – природный полимер-полисахарид, – папаин – комплекс протеолитических ферментов растительного происхождения, добываемый из очищенного млечного сока папайи, бромелаин – протеолитический фермент растительного происхождения, выделяемый из стебля или сока зеленых плодов ананаса, серебра нитрат, гидроксипропилметилцеллюлозу (ГПМЦ).

Ферментативную активность определяли, используя в качестве субстрата казеин по Гаммерстену [4] в 1/15М фосфатном буфере рН 8,0 (метод Кунитца), а в присутствии $AgNO_3$ методом Ансона, используя в качестве субстрата гемоглобин бычьей крови (абсолютные количественные значения, получаемые по двум указанным методам, могут различаться, однако позволяют сравнивать и оценивать влияние различных факторов на этот показатель).

Эффективную вязкость геля определяли до и после стерилизации с использованием ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II+Pro.

Изучение антимикробной активности композиции с включением соли $AgNO_3$ проведено с использованием тест-систем RIDA COUNT. Образцы гелей на тест-подложках помещали в портативный инкубатор Cultura при 35°C, инкубировали в течение 24 часов, затем фиксировали рост микроорганизмов или его отсутствие.

Влияние соли серебра (катионы, наночастицы) на протеолитическое действие па-

паина изучали в модельных опытах, когда в качестве модели раны применяли белковый субстрат – гидролизат животного коллагена и морского коллагена с добавлением электролитов – минеральных солей с целью приближения состава к белковому содержанию ран, рН композиции 6,1. Отливались после желирования формы с равнозначными размерами и весом, на которые воздействовали нативным папаином, папаином, иммобилизованным в альгинате, а также альгинатным гелем, содержащим папаин и $AgNO_3$.

Результаты и обсуждение

В настоящее время протеолитические ферменты часто применяются в лечении ран в нативной форме, однако, учитывая недостатки нативных ферментов, такие как автолиз, кратковременность действия в связи с быстрой инактивацией ингибиторами крови и тканей, что требует увеличения числа перевязок и других манипуляций, было решено иммобилизовать используемые растительные протеазы в полимерной матрице. Предпочтение при выборе способа иммобилизации было отдано физической (адсорбция) иммобилизации как наиболее простому методу, легче осуществляемому технологически по сравнению с ковалентным связыванием. Кроме того, возникновение ковалентных связей в системе фермент - полимерная матрица может привести к необратимым трансформациям фермента, при этом пролонгация его действия как необходимый результат иммобилизации может быть достигнута, по нашему мнению, и в предлагаемом способе. Химическая, ковалентная фиксация фермента биополимерной матрицей приводит к устойчивости фермента, но одновременно требует при использовании дополнительной стадии гидролиза связи биополимер-фермент, что, безусловно, снижает кинетическую активность фермента [5].

Как было отмечено выше, мы остановили свой выбор на протеолитических ферментах растительного происхождения – папаине и бромелаине. Нами определено, что активность нативной формы папайна в стандартном водном растворе составляет 0,33 ПЕ/мг, бромелаина 0,21 ПЕ/мг (по

казеину). Эти данные помогли решить, какую концентрацию ферментов использовать при иммобилизации. Папаин и бромелаин, отличающиеся невысокими значениями активности в нативной форме, были иммобилизованы в 4%-ной концентрации, то есть в более высокой концентрации по отношению к значениям, используемым при иммобилизации протеолитических ферментов животного происхождения [6].

Различие в активности изучаемых ферментов в нативной форме может быть связано с тем, что в данном исследовании использовался протеолитический комплекс из латекса папайи уникального состава, в котором идентифицировано несколько белков, таких как папаин, химопапаин, карикаин, лизоцим и др., в то время как бромелаин использовался в качестве монопрепарата.

Важный вопрос – выбор биополимерной матрицы для физической иммобилизации растительных ферментов. Желательно, чтобы используемый полимер не только обеспечивал физическую иммобилизацию и пролонгацию действия фермента, но и сам выполнял максимально возможные лечебные функции при создании медицинских изделий. Опираясь на наш длительный опыт создания лечебных материалов Колетекс® и Колегель® и литературные данные, был выбран биополимер альгинат натрия, соль альгиновой кислоты, получаемый из бурых морских водорослей [7]. Такие ценные свойства этого биополимера как биосовместимость, антиаллергенность, положительное влияние на регенерацию тканей и остановку кровотечений обосновали целесообразность его применения при создании изделий для медицины. Реологические свойства, способность альгината к набуханию и гелеобразованию определяют возможность создания атравматичных материалов как в форме гидрогелей, так и лечебных салфеток. В последнем случае композиция с лекарствами в виде гидрогеля наносится на текстильную основу по технологии текстильной печати по аналогии с получением салфеток "Колетекс®". Биополимер, контактируя с жидкой раневой средой,

набухает и по мере этого фермент, физически иммобилизованный в его структуре, переходит в рану (как и другие иммобилизованные в гидрогеле лекарства), то есть композит выступает в роли депо-материала, из которого в рану диффундируют лекарства.

Разрабатывая лечебный материал с протеолитическим ферментом, принимая во внимание многостадийность технологического процесса, важно было оценить изменение во времени его активности в воде и в альгинатном геле. На рис. 1 (изменение ПА папаина в воде и альгинатном геле: 1 - изменение ПА папаина в воде, 2 - изменение ПА папаина в альгинатном геле (6%)) представлены данные, характеризующие кинетику изменения протеолитической активности (ПА) папаина в водной среде и в гидрогеле альгината натрия (АН).

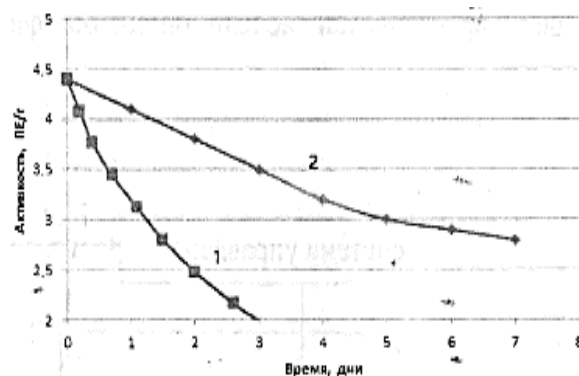


Рис. 1

Падение ПА папаина в воде происходит в течение трех дней, в то время как ПА в гидрогеле, снижаясь на 50%, сохраняется в течение недели. В альгинатном геле происходит взаимодействие между карбоксильными группами альгината натрия и аминогруппами папаина, вероятно, это позволяет сохранить активный центр фермента и обеспечить постепенное высвобождение активного вещества из гидрогелевой вязкой композиции в рану и пролонгировать лечебный эффект. Высокая вязкость гидрогеля и меньшее количество воды в системе приводит к его защите и меньшей потере активности, то есть пролонгации действия [8].

Ранее указывалось, что разрабатываемый лечебный материал пролонгированного действия (депо) должен обладать ком-

плексом свойств, таких как протеолитические и антисептические. Если для лизиса белкового раневого отделяемого предполагалось сделать выбор из растительных ферментов (папаин, бромелаин), то для достижения антибактериальных свойств – изучить возможность применения солей серебра, в частности $AgNO_3$ (азотнокислое серебро). Механизм действия этого антисептика заключается в воздействии на клетку: катионы серебра и наночастицы серебра, образуемые путем реакции восстановления, разрушают мембрану патогенных микроорганизмов и деструктурируют аппарат репликации клетки. Клетки перестают размножаться и погибают [9].

Выбор нами этого антисептика обусловлен следующими основными соображениями: наночастицы серебра имеют широкий спектр антимикробного действия, что важно для I стадии, и кроме того в литературе и на основании данных, полученных ООО "Колетекс", показано, что катионы серебра в виде соли способны образовывать наноформу под действием восстановителей, к которым относится и АН [9], [10]. Использование серебра в наноформе должно обеспечить существенный антимикробный эффект при его более низкой и менее токсичной концентрации. Таким образом, выбрав в качестве полимерной матрицы для иммобилизации фермента растительного происхождения и соли серебра, биополимер альгинат натрия, мы используем комплекс из положительных свойств каждого

компонента, способствующих эффективному заживлению гнойных ран.

Создавая новый композиционный лечебный материал, применяемый в виде гидрогеля или текстильной аппликации, необходимо оценить влияние на компоненты технологической операции гамма-стерилизации, обязательной для лечебных материалов, накладываемых на рану. Известно, что физическая иммобилизация ферментов в полимере снижает потерю ими активности, что также необходимо оценить в данном исследовании на используемом составе [11].

В табл. 1 приведены данные по потере ПА ферментов при их иммобилизации в АН при гамма-стерилизации дозой 6 кГр, которые однозначно показывают защитную функцию АН и наряду с ним другого полисахарида – гидроксипропилметилцеллюлозы (ГПМЦ). Введение второго полимера проводилось как с целью защиты фермента от потери ПА, так и для стабилизации реологических параметров композиции. ГПМЦ, являясь индифферентным веществом, ограничивает подвижность фермента, что способствует сохранению его ПА. ГПМЦ широко применяется в медицине, и было решено дальнейшее исследование проводить с этим полимером в оптимальной концентрации. Увеличение вязкости композиции и снижение в ней количества воды способствует защите фермента от гидролиза и радиолиза и меньшему падению ПА.

Т а б л и ц а 1

№	Состав композиции	ПА до стерилизации ПЕ/г	ПА после стерилизации ПЕ/г
1	6% АН+ 4% папаин	3,81± 0,15	1,94± 0,15
2	6%АН, 2% ГПМЦ, 4% папаин	3,93 ± 0,18	2,64 ± 0,18
3	6% АН +4% бромелаин	2,03 ±0,12	0,81± 0,12
4	6%АН, 2% ГПМЦ, 4% бромелаин	2,95 ± 0,18	1,30 ± 0,18
5	6%АН, 4% папаин + 4% бромелаин	3,01± 0,18	1,10± 0,18
6	6%АН, 2 % ГПМЦ, 4% папаин + 4% бромелаин	3,22 ± 0,11	1,8 ± 0,11

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, физически иммобилизованный папаин более устойчив к гамма-облучению по сравнению с бромелаином, особенно в присутствии ГПМЦ. Сочетание в одной полимерной композиции папаина и бромелаина не привело к желаемому результату и показало значительное уменьшение активности после гамма-облучения (46,0%). Использование только бромелаина для включения в гель нецелесообразно из-за низкой активности фермента в нативной и иммобилизованной форме.

Дальнейшие исследования было решено проводить с использованием папаина в связи с приведенными выше его преимуществами.

Известно из литературы и соответствует нашим результатам, что при γ -стерилизации за счет радиолиза меняются реологические параметры гидрогелевой композиции, ее вязкость [8]. Для снижения этого нежелательного эффекта дополнительно в альгинатный гель вводили как второй полимер – гипромелозу, так и ингибирующий радиолиз многоатомный спирт глицерин. Таким образом, разрабатываемая композиция может использоваться для выпуска стерильных медицинских изделий.

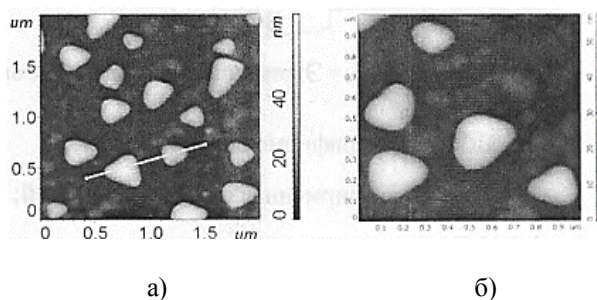


Рис. 2

Существенный вопрос – влияние pH на сохранение ферментативной активности папаина. Это важно, исходя из достигаемого в ране значения pH и положительного влияния изменения этого показателя с характерных для гнойных ран значений pH ~5,0 до показателя pH 6,0-7,0, более способствующих заживлению ран [12]. Также необходимо учитывать факт образования наночастиц серебра из катионов соли при условии использования слабощелочной

среды. Выше отмечалось, что в качестве антибактериального агента нами предполагалось использовать азотнокислую соль серебра. Факт образования наночастиц серебра при введении в гидрогель альгината натрия (рис. 2 – скан электронной микроскопии поверхности пленки образца на основе альгината натрия и соли серебра) описан в литературе и доказан исследованиями, проведенными ООО "Колетекс" [9], [10].

Положительным является то, что наночастицы серебра обладают высокой антимикробной активностью в отношении более 500 патогенных микроорганизмов [13]. Однако нежелательным фактом при применении соли серебра является возможное снижение в ее присутствии активности протеолитических ферментов, характерное и для влияния других тяжелых металлов. Наши исследования показали, что чем выше концентрация вводимого в воду и альгинатный гель AgNO_3 , тем ниже в тех же условиях активность папаина (рис. 3 – влияние увеличения концентрации ионов серебра на ПА папаина (ПЕ/г) в водном растворе).

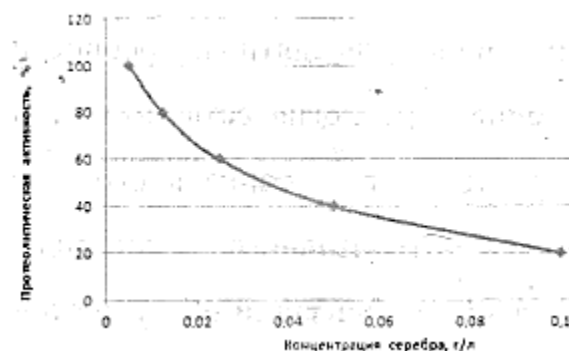


Рис. 3

Отметим, что в ходе определения ПА в присутствии солей металлов возникает сложность в использовании метода Кунитца М с применением в качестве субстрата казеина по Гаммерстену ввиду взаимодействия казеина и серебра. По этой причине нами использовался метод Ансона, предусматривающий применение в качестве субстрата гемоглобина бычьей крови.

Эксперимент показал целесообразность введения AgNO_3 и папаина первоначально в различные полимерные матрицы: AgNO_3

– в АН, а папаин в ГПМЦ и только потом соединять их в одну композицию.

Разделение в технологическом процессе протеолитического фермента и соли серебра, их "изоляция" друг от друга с помощью разных полимеров позволит обеспечить защиту фермента и сохранение его ПА, а также создаст условия для перехода серебра из формы катиона (диссоциация соли) в наноформу и усилит антимикробный эффект при меньшей концентрации и токсичности используемой соли.

Антимикробная активность альгинатной композиции, содержащей серебро в выбранной концентрации, а именно 0,05%, подтверждалась отсутствием роста патогенных микроорганизмов на тест-подложках.

При изучении влияния серебра на ферментативную активность папаина на модели раны на основе гидролизата животного коллагена и, наиболее близкого по составу к человеческому, морского коллагена, была отмечена деструкция коллагеновой формы, что связано с гидролизом белка (рис. 4 – гидролитическое воздействие разных форм папаина на модель раны: а) контроль, б) нативный папаин, в) иммобилизованный папаин, г) папаин, иммобилизованный совместно с $AgNO_3$).

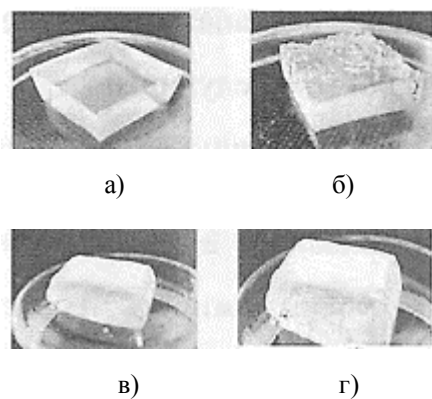


Рис. 4

Во всех случаях происходит протеолитическая деструкция коллагена, в наибольшей степени под действием нативной формы папаина (б). При введении фермента в альгинатный гель также наблюдается деструкция, но медленнее, очевидно, альгинат пролонгирует его действие (рис. 4), что являлось целью данной разработки. Деструкция коллагенового образца (г) подтверждает комплексность воздействия:

проявление протеолитической активности папаина в присутствии $AgNO_3$ и, как сказано выше, достижение антисептического эффекта.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана гидрогелевая биополимерная композиция – ранозаживляющий композитный депо-материал для применения на I-II стадиях раневого процесса, содержащая физически иммобилизованные в АН протеолитический растительный фермент папаин и азотнокислую соль серебра, обеспечивающая комплексное очищающее и антимикробное действие на рану. Введение в основу композиции второго полимера – гидроксипропилметилцеллюлозы позволило защитить фермент от инактивирующего воздействия соли серебра и снизить нежелательное воздействие гамма-стерилизации.

Созданный композитный депо-материал обеспечивает эффективное заживление инфицированных ран.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов А.М., Сергеев А.Н., Сергеев Н.А., Дубатов Г.А., Жуков С.В. Использование современных раневых покрытий в местном лечении ран различных этиологий //Современные проблемы науки и образования. – 2020, № 2. С. 43.
2. Толстых П.И., Дербенев В.А., Филатов В.Н., Рыльцев В.В., Медушева Е.О. и др. Лечение гнойных ран и язв различного генеза с использованием терапевтических систем иммобилизованного трипсина. – М. Дипак.: 2013. С. 56.
3. Пенджиев А.М., Абдуллаев А. Фармакологические особенности млечного сока дынного дерева // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2017, № 1. С. 36...56.
4. Kunitz M. Crystalline soybean trypsin inhibitor // J. Gen. Physiol. – V.30, №1, 1947. P. 291...310.
5. Досадина Э.Э., Бркич Л.Л., Пятигорская Н.В., Бикинеева М.А., Медушева Е.О., Белов А.А. Использование хитозана в качестве носителя протеиназ и мирамистина для получения ферментсодержащего геля // Бултеровские сообщения №10, том 48. – 2016. С.49.
6. Кильдеева Н.Р., Вихорева Г.А., Гальбрайт Л.С. Волокнистые и пленочные материалы для медицины и биотехнологии. – Часть I. – М., 2014. С.108.
7. Олтаржевская Н.Д., Коровина М.А., Кричевский Г.Е., Щедрина М.А., Егорова Е.А. Возможности

применения полисахаридов при лечении ран // Раны и раневые инфекции. – 2019. Т. 6. С.25.

8. *Валуева М.И.* Технология получения текстильных и гидрогелевых депо-материалов с радиопротекторными свойствами: Дис.... канд. техн. наук. – 2014.

9. *Кричевский Г.Е.* Зеленые и природоподобные технологии – основа устойчивого развития цивилизации. – В 3-х томах, Т.3. – М., 2020. С.524.

10. *Быркина Т.С., Гафурова Д.Р., Олтаржевская Н.Д., Кричевский Г.Е.* Исследование возможности снижения микробной обсемененности композиции на основе альгината натрия // Изв вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 1. С.341...345.

11. *Филатов В.Н., Рыльцев В.В.* Биологически активные текстильные материалы. – М., 2002. С.248.

12. *Глухов А.А., Андреев А.А., Карапатьян А.Р., Чуян А.О.* Влияние кислотности на динамику репаративных процессов в мягких тканях // Вестник Воронежского института. – 2016. С.10.

13. *Игнатов И.И., Мосин О.В.* Методы получения мелкодисперсных наночастиц коллоидного серебра // Интернет-журнал "Науковедение". – 2014, вып. 3. С.16.

REFERENCES

1. Morozov A.M., Sergeev A.N., Sergeev N.A., Dubatolov G.A., Zhukov S.V., The use of modern wound dressings in the local treatment of wounds of various etiologies // Modern problems of science and education. – 2020, No. 2. P.43

2. Tolstykh PI, Derbenev VA, Filatov VN, Ryltsev VV, Medusheva EO. and other Treatment of purulent wounds and ulcers of various origins using therapeutic systems of immobilized trypsin. Manual for doctors of the Ministry of Health of the Russian Federation // M. Deepak. - 2013. - p.56

3. Pendzhiev AM, Abdullaev A. Pharmacological features of the milky sap of the melon tree // Scientific Review. Medical sciences. - 2017. - No. 1. - p. 36-56.

4. Kunitz M. Crystalline soybean trypsin inhibitor // J. Gen. Physiol. - 1947.-V.30 .- # 1.-P. 291-310.

5. Dosadina E.E., Brkich L.L., Pyatigorskaya N.V., Bikineeva M.A., Medusheva E.O., Belov A.A., Use of chitosan as a carrier of proteinases and miramistin to obtain an enzyme-containing gel // Butlerov Communications No. 10 volume 48. - 2016. - p.49.

6. Kildeeva N.R., Vikhoreva G.A., Galbraikh L.S. Fibrous and film materials for medicine and biotechnology. Part I. M. - 2014. - p.108

7. Oltarzhevskaya ND, Korovina MA, Krichevsky GE, Shchedrina MA, Egorova EA Possibilities of using polysaccharides in the treatment of wounds // Wounds and wound infections. Т. 6. - 2019. - p. 25.

8. Valueva M.I. Technology of obtaining textile and hydrogel depot materials with radioprotective properties // Author's abstract. diss. Cand. tech. sciences. 2014.

9. Krichevsky G.E. Green and nature-like technologies - the basis for sustainable development of civilization in 3 volumes, v.3. - М. 2020. - p.524 .

10. Byrkina T.S., Gafurova D.R., Oltarzhevskaya N.D., Krichevsky G.E. Investigation of the possibility of reducing the microbial contamination of the composition based on sodium alginate // Izvestiya vuzov, vol. 1, 2018 .-- p. 341-345.

11. Filatov V.N., Ryltsev V.V. biologically active textile materials // М., 2002. - 248 p.

12. Glukhov A.A., Andreev A.A., Karapityan A.R., Chuyan A.O. The influence of acidity on the dynamics of reparative processes in soft tissues // Bulletin of the Voronezh Institute. - 2016 .- p. 10.

13. Ignatov I.I., Mosin O.V. Methods for obtaining finely dispersed nanoparticles of colloidal silver // Internet journal "Science", vol. 3, 2014 .- p. 16.

Рекомендована заседанием НТС Общества с ограниченной ответственностью "НПО Текстиль-прогресс Инженерной Академии". Поступила 20.10.21.

**ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ И ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И ПОЛИЭФИРА
С ТИТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ***

**POLYMER FILM AND TEXTILE MATERIALS
BASED ON POLYPROPYLENE AND POLYESTER
WITH TITANIUM COATING**

Ю.В. ХАРАПУДЬКО, А.Е. КАРНОУХОВ, Ю.А. ТИМОШИНА, Э.Ф. ВОЗНЕСЕНСКИЙ, Н.В. ТИХОНОВА
YU.V. KHARAPUDKO, A.E. KARNOUKHOV, YU.A. TIMOSHINA, E.F. VOZNESENSKY, N.V. TIKHONOVA

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technology University)

E-mail: y.kharapudko@danaflex.ru

Металлические покрытия широко используются для функционализации полимерных пленочных и синтетических текстильных материалов. Металлизированные пленочные и текстильные материалы, обладающие электропроводящими свойствами, востребованы в качестве материалов для изделий с экранирующими свойствами. Работа посвящена исследованию свойств металлических покрытий из титана на полимерных пленочных и текстильных материалах. Металлизация проводилась методом магнетронного распыления на установке для нанесения тонких металлических покрытий. Подтверждены и сопоставлены теоретические и практически полученные значения толщины, оптической плотности и электрического сопротивления металлического покрытия, определена площадь равномерного распределения металлического покрытия на полимерной подложке, исследована адгезия полимерных подложек к металлическому покрытию. Установлено, что пленочные и текстильные материалы на основе полипропилена имеют низкую адгезию к металлическому покрытию, нанесенному методом магнетронного распыления. Для увеличения адгезионных свойств полимерных материалов на основе полиолефинов рекомендуется перед металлизацией применение предварительной подготовки поверхности, в том числе с применением плазменных технологий.

Metallic coatings are widely used for the functionalization of polymeric film and synthetic textile materials. Metallized film and textile materials with electrically conductive properties are in demand as materials for products with shielding properties. The work is devoted to the study of the properties of titanium metal coatings on polymer film and textile materials. Metallization was carried out by the method of magnetron sputtering on an installation for applying thin metal coatings. The theoretical and practical values of the thickness, optical density, and electrical resistance of the metal coating have been confirmed and compared, the area of uniform distribution of the metal coating on the polymer substrate has been determined, and the adhesion of polymer substrates to the metal coating has been investigated. It was found that

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Нанотехнологии и наноматериалы" ФГБОУ ВО "КНИТУ".

film and textile materials based on polypropylene have low adhesion to a metal coating applied by magnetron sputtering. To increase the adhesive properties of polymeric materials based on polyolefins, it is recommended to use preliminary surface preparation before metallization, including the use of plasma technologies.

Ключевые слова: полимерный материал, текстиль, пленки, металлическое покрытие, магнетронное распыление, титан, адгезия.

Keywords: polymeric material, textiles, films, metal coating, magnetron sputtering, titanium, adhesion.

Полимерные пленочные и текстильные материалы с электропроводящим металлическим покрытием широко востребованы в качестве средств защиты. Подобные текстильные материалы благодаря своей гибкости и экранирующим свойствам являются перспективными материалами для защиты оборудования от электромагнитного излучения. Из-за сложной пористой структуры технически сложно придать текстильному материалу высокую и стабильную электропроводность, особенно в случае растяжимого текстиля [1].

Сходные по химическому составу, но совершенно иные по строению полимерные подложки в виде пленок с функциональным металлизированным слоем имеют широкое применение при производстве гибкой упаковки для пищевой промышленности. Металлизированные пленочные материалы используются в качестве барьерного слоя, являясь современным аналогом фольги, подходящим к тому же для вторич-

ной переработки. Рассматриваемые виды полимерных материалов востребованы в индустрии и повсеместно используются в качестве подложек для нанесения металлических покрытий. Однако плохая адгезия металлического слоя к полимерному материалу является серьезной проблемой, которая рассматривается в ряде работ [2...4]. Тем не менее, на сегодняшний день значительное количество работ посвящено различным методам улучшения адгезии металла к полимерной подложке [5], [6].

В качестве объектов исследования выбраны полимерные пленочные материалы:

- полиэтилентерефталатная (PET) пленка толщиной 12 мкм;
- полипропиленовая (PP) пленка толщиной 40 мкм;
- двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка толщиной 20 мкм;
- текстильные ленты на основе полиэфира (PET) и полипропилена (PP), характеристики которых представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Волокнистый состав	Ширина, мм	Линейная плотность, г/м
1	Полиэфир (PET) 100 %	25	25
3	Полипропилен (PP) 100 %	50	26,4

Металлизация материалов осуществлялась в модульной плазменной установке для нанесения тонких металлических покрытий, расположенной на базе ресурсного центра ООО "Ферри Ват" [7].

Установка позволяет производить магнетронное распыление металлов при следующих параметрах: остаточное давление 3×10^{-4} Па, рабочее давление 0,1...1,0 Па.

Блок питания магнетрона позволяет подавать постоянное или импульсное напряжение. В качестве плазмообразующего газа можно использовать: аргон, углекислый газ, кислород, азот и другие функциональные газы. Функциональная схема установки представлена на рис. 1 (модульная плазменная установка для нанесения тонких металлических покрытий).

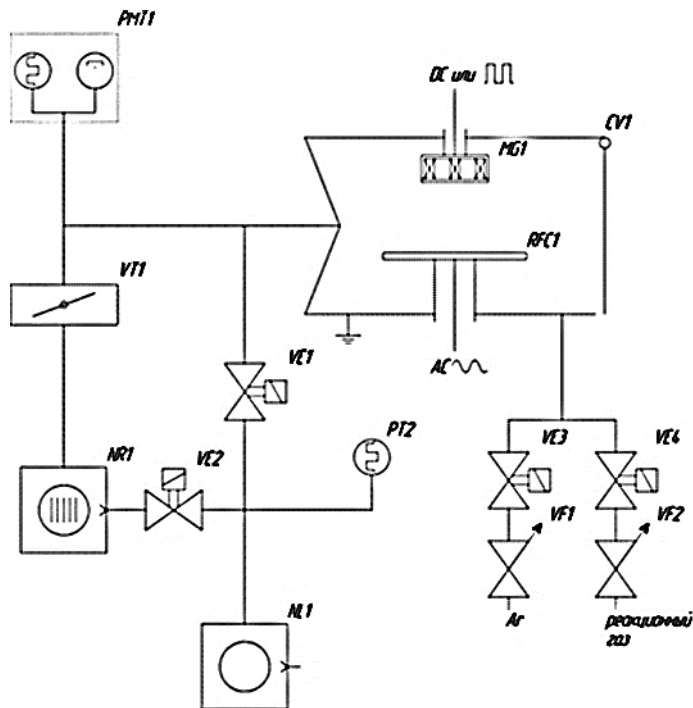


Рис. 1

Установка состоит из вакуумной камеры, в верхней части которой установлена магнетронная распылительная система. Магнетрон подключается к блоку питания, который позволяет генерировать постоянное или импульсное напряжение. В нижней части камеры установлен активный ВЧ-электрод, на который подается синусоидальный сигнал с частотой 13,56 МГц. В качестве пассивного электрода выступает кольцо из медного листа, которое заземлено на камеру.

Вакуумная система состоит из форвакуумного насоса XDS35i (NL1) и высоковакуумного турбомолекулярного насоса ADIXEN ATH 2303M (NR1). Для контроля давления в процессе активации используется широкодиапазонный вакуумный датчик Pfeifer PKR 361 (PMT1).

Система подачи рабочих газов состоит из двух параллельных линий, каждая из ко-

торых состоит из запорного клапана (VE3 и VE4) и регулятора расхода газа (VF1 и VF2) с максимальным расходом 100 нсм³/мин.

Модульность вакуумной установки позволяет проводить процессы очистки и магнетронного напыления как отдельно, так и по очереди, без развакуумирования системы. Вместо заднего и/или бокового фланца можно установить дополнительные модули, например, различные подложкодержатели: планетарный или бипланетарный механизм (для обработки большого количество изделий за один цикл), перематывающее устройство (для обработки тканей или нитей).

Методом магнетронного распыления на полимерную подложку нанесено металлическое покрытие на основе титана. Основные параметры режима металлизации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Рабочее давление в камере (P), Па	Мощность W, кВт	Рабочий газ	Материал мишени	Время распыления τ, с
0,5–0,1	0,15	Ar	Ti	30/600

Продолжительность процесса напыления для полимерных пленок составила 30 с, для текстильных материалов – 600 с. Время

напыления подбиралось исходя из рассчитанной ранее скорости напыления 0,8 нм/с.

Толщина металлизированного слоя T_i на поверхности полимерного материала определена математически с помощью значения электрического сопротивления участка цепи. Согласно ГОСТ 20214–74 [8] измерено электрическое сопротивление металлизированных образцов с геометриче-

ским размерами 40 мм × 5 мм. Для измерения сопротивления использовались клещи токоизмерительные UT202 с диапазоном измерения сопротивления от 1 Ом до 20 МОм. В табл. 3 представлены средние значения электрического сопротивления металлизированных образцов.

Таблица 3

Наименование объекта	Электрическое сопротивление металлического покрытия R, Ом
Полиэтилентерефталатная (PET) пленка с титановым покрытием	295
Полипропиленовая (PP) пленка с титановым покрытием	335
Двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка с титановым покрытием	250
Текстильная лента на основе полиэфира (PET) с титановым покрытием	$> 20 \times 10^6$
Текстильная лента на основе полипропилена (PP) с титановым покрытием	$> 20 \times 10^6$

Значение электрического сопротивления текстильных металлизированных лент находится вне пределов измерения используемого омметра. Высокое сопротивление металлического покрытия лент вероятно связано с обрывом контакта в месте пересечения нитей основы и утка.

На основе значений электрического сопротивления покрытия рассчитана теоретическая толщина металлизированного слоя

на полимерных пленках по формуле $\tau = \rho \frac{l}{d \cdot R}$, где τ – толщина металлического покрытия; ρ удельное сопротивление материала; l – расстояние между электродами; d – ширина измеряемого образца; R – измеренное сопротивление образца. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Наименование объекта	Толщина металлического покрытия τ , нм
Полиэтилентерефталатная (PET) пленка с титановым покрытием	22,7
Полипропиленовая (PP) пленка с титановым покрытием	18,3
Двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка с титановым покрытием	26,8

Толщина металлического покрытия полимерных пленок коррелирует с предположительной скоростью напыления (0,8 нм/с). Исходя из этого можно предположить, что толщина покрытия на текстильных лентах составляет порядка 500 нм.

Равномерность покрытия оценивалась по значениям оптической плотности пленок до и после металлизации. Значения получены с помощью лабораторной установки TECHKON RT120 [9], результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Наименование объекта	Оптическая плотность до нанесения металлического покрытия	Оптическая плотность после нанесения металлического покрытия
Полиэтилентерефталатная (PET) пленка с титановым покрытием	0,02	2,07
Полипропиленовая (PP) пленка с титановым покрытием	0,01	2,06
Двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка с титановым покрытием	0,02	2,00

Установлено, что оптическая плотность неоднородна по всей площади металлизированного образца. Среднее значение оптической плотности (табл. 4) указано для центральной части образца, расположенного непосредственно напротив распыляемой мишени. Диаметр распыляемой мишени в модульной установке составляет 89 мм. Из теоретических данных известно, что толщина металлического покрытия однородна дополнительно на угол 30^0 от нормали к

мишени, что составляет для используемой плазменной установки порядка $20...30 \text{ см}^2$ на поверхности образца. В среднем оптическая плотность металлического покрытия от центра к периферии образца снижается на 30 %.

Адгезия металлического слоя к подложке определена согласно ASTM D3359 – 09 [10] с помощью ленты с постоянной липкостью 3М 610. Результаты приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Наименование объекта	Балльная оценка адгезии металлического покрытия к подложке
Полиэтилентерефталатная (PET) пленка с титановым покрытием	4
Полипропиленовая (PP) пленка с титановым покрытием	2
Двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка с титановым покрытием	3
Текстильная лента на основе полиэфира (PET) с титановым покрытием	4
Текстильная лента на основе полипропилена (PP) с титановым покрытием	2

Косвенно адгезию металлического покрытия определяли по степени абразивного повреждения образцов согласно ГОСТ Р ИСО 105-D02–2018 [11]. Для этого на лабораторной установке Rub Tester 2000 SUTHERLAND® [12] выполнены циклические испытания. В качестве абразива использована хлопчатобумажная ткань производства Testfabrics Inc USA. Металлизи-

рованный образец с геометрическими размерами $5 \times 18 \text{ см}$ фиксируется на обрешеченном столике, сверху на материал устанавливается груз массой 1814 г, испытание включает 50 циклов истирания. Износ металлического покрытия фиксировался по изменению оптической плотности, результаты испытаний приведены в табл. 7, изменение цветовой разницы ΔE – в табл. 8.

Т а б л и ц а 7

Наименование объекта	Оптическая плотность после истирания металлического покрытия
Полиэтилентерефталатная (PET) пленка с титановым покрытием	2,01
Полипропиленовая (PP) пленка с титановым покрытием	1,75
Двуосноориентированная полипропиленовая (BOPP) пленка с титановым покрытием	1,71

Т а б л и ц а 8

Наименование объекта	Изменение цветовой разницы ΔE , усл. ед
Текстильная лента на основе полиэфира (PET) с титановым покрытием	3,82
Текстильная лента на основе полипропилена (PP) с титановым покрытием	9,78

В Ы В О Д Ы

В рамках проведенного исследования апробирована методика нанесения металлического титанового покрытия на полимерную пленочную и текстильную подл-

ожку (PET и PP). Подтверждены и сопоставлены теоретические и практически полученные значения толщины, плотности и электрического сопротивления металлического покрытия на пленочном и текстильном материале. Определена площадь рав-

номерного распределения металлического покрытия на полимерной подложке. Исследована адгезия между полимерными подложками и металлическим покрытием. Выявлено, что полимерная пленочная и текстильная подложка на основе полипропилена имеет низкую адгезию к металлическому покрытию, нанесенному методом магнетронного распыления, по сравнению с материалами на основе полиэтилентерефталата. Для увеличения адгезионных свойств полимерной подложки к металлическому покрытию рекомендуется в дальнейших исследованиях применение плазменных методов модификации подготовки поверхности, например, обработку в коронном, высокочастотном емкостном (ВЧЕ) и индукционном (ВЧИ) разрядах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Koprowska J., Ziaja J., Janukiewicz J.* Plasma Metallization Textiles as Shields for Electromagnetic Fields // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. – V. 16, No. 5 (70), 2008. P. 64...66.
2. *Наурызова С.З., Накып А.М., Дауылбек А.А., Ислам Ш.С., Жарасова Ж.М.* Исследование металлизации полиэтилентерефталата, модифицированного пост-плазменной прививкой мономера // *Вестник Технологического университета*. – 2019. Т. 22, № 2. С. 93...96.
3. *Евтеева П.С., Кузько А.Е.* Влияние топологии поверхности полипропиленовой пленки на адгезию алюминия к ней при вакуумной металлизации // *Молодежь и системная модернизация страны*. – 2019. Т. 5. С. 149...153.
4. *Mittal K.L.* Adhesion aspects of metallization of organic polymer surfaces // *Journal of Vacuum Science & Technology*. – V. 13, № 1, 1976. P. 19...25.
5. Patent US 2020/0122439 A United States. Recyclable, easily tearable packaging laminate having a good barrier effect and method for production thereof / *Constantia Pirk GmbH & Co. KG*. Application 27.06.1983; publication 23.04.2020.
6. *Слепцов В.В., Ревенюк Т.В.* Повышение адсорбционной способности поверхности в многослойных структурах интеллектуальных архитектурных пленок // *Инновации и инвестиции*. – 2021, № 2. С. 205...208.
7. ООО Ферри Ват [Электронный ресурс]. URL: <https://ferryvatt.ru/> (дата обращения: 23.09.2021).
8. ГОСТ 20214–74. Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
9. TECHKON RT120 [Электронный ресурс]. URL: http://www.stoklan.ru/catalog.php?act=show_position&id=897 (дата обращения: 23.09.2021).

10. ASTM D3359–09. Стандартные методы испытания для измерения адгезии методом клейкой ленты. – М.: ASTM International, 2009.

11. ГОСТ Р ИСО 105–D02. Материалы текстильные. Определение устойчивости окраски. Устойчивость окраски к трению. Органические растворители. – М.: Изд-во стандартов, 2018.

12. Rub Tester 2000 SUTHERLAND® [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rubtester.com/> (дата обращения: 23.09.2021).

REFERENCES

1. *Koprowska J., Ziaja J., Janukiewicz J.* Plasma Metallization Textiles as Shields for Electromagnetic Fields // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. – V. 16, No. 5 (70), 2008. P. 64...66.
2. *Nauryzova S.Z., Nakyp A.M., Dauylbek A.A., Islam Sh.S., Zharasova Zh.M.* Investigation of the metallization of polyethylene terephthalate modified by post-plasma grafting of the monomer // *Bulletin of the Technological University*. – 2019. V. 22, No. 2. P. 93...96.
3. *Evtееva P.S., Kuzko A.E.* Influence of the topology of the surface of a polypropylene film on the adhesion of aluminum to it during vacuum metallization // *Youth and System Modernization of the Country*. – 2019. V. 5. P. 149...153.
4. *Mittal K.L.* Adhesion aspects of metallization of organic polymer surfaces // *Journal of Vacuum Science & Technology*. – V. 13, No. 1, 1976. P. 19 ... 25.
5. Patent US 2020/0122439 A United States. Recyclable, easily tearable packaging laminate having a good barrier effect and method for production thereof / *Constantia Pirk GmbH & Co. kg*. Application 06/27/1983; publication 04/23/2020.
6. *Slepsov V.V., Revenyuk T.V.* Increasing the adsorption capacity of the surface in multilayer structures of intelligent architectural films // *Innovations and investments*. – 2021, No. 2. P. 205 ... 208.
7. LLC Ferry Wat [Electronic resource]. URL: <https://ferryvatt.ru/> (date of access: 09/23/2021).
8. GOST 20214–74. Electrically conductive plastics. Method for determining the specific volumetric electrical resistance at constant voltage. – М.: Publishing house of standards, 1992.
9. TECHKON RT120 [Electronic resource]. URL: http://www.stoklan.ru/catalog.php?act=show_position&id=897 (accessed 09/23/2021).
10. ASTM D3359-09. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Method. – М.: ASTM International, 2009.
11. GOST R ISO 105-D02. The materials are technical. Determination of color fastness. Color fastness to friction. organic solvents. – М.: Publishing house of standards, 2018.
12. Rub Tester 2000 SUTHERLAND® [Electronic resource]. URL: <https://www.rubtester.com/> (date of access: 09/23/2021).

Рекомендована кафедрой плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов. Поступила 11.10.21.

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРОВ И БЕНТОНИТА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО ОКСИДОМ ТИТАНА***

**COMPOSITE MATERIALS
BASED ON FIBROUS POLYMERS AND BENTONITE MODIFIED WITH TiO₂**

М.Ф. БУТМАН, Н.Л. ОВЧИННИКОВ, Е.Л. ВЛАДИМИРЦЕВА, Ф.А. БЫКОВ

M.F. BUTMAN, N.L. OVCHINNIKOV, E.L. VLADIMIRTSEVA, F.A. BYKOV

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

(Ivanovo State University of Chemical Technology)

E:mail: vladimirtseva@mail.ru

Органические красители являются основным загрязнителем сточных вод текстильного отделочного производства. Для их удаления наиболее широко применяется адсорбционный метод очистки, как наиболее простой и доступный. В работе предложена методика получения композиционных материалов для очистки водных растворов от органических красителей. Материалы получены на основе волокнистых полимеров и алюмосиликатов разных форм. Минеральной матрицей служил природный бентонит, который за счет слабой связи между силикатными слоями обуславливает значительную емкость катионного обмена. Это позволяет эффективно интеркалировать в межслоевое пространство алюмосиликата различные ионы неорганического происхождения. Имобилизация частиц алюмосиликатов на поверхности волокнистых материалов повышает сорбционную активность по отношению к органическим красителям. В первую очередь этот эффект касается материалов натурального происхождения из хлопкового и шерстяного волокон. Появление такого эффекта обусловлено состоянием поверхности волокнистого материала, его электростатическими характеристиками. Присутствие на волокне частиц модифицированного бентонита позволяет удалить до 95 % красителя из раствора. Полученные результаты являются перспективными и отражают общие тенденции экологизации текстильного отделочного производства.

Organic dyes are the main pollutant in textile finishing wastewater. For their removal, the adsorption method of purification is widely used as the simplest and most affordable. The paper proposes a method for obtaining composite materials for the purification of aqueous solutions from organic dyes. Materials are obtained on the basis of fibrous polymers and aluminosilicates of various forms. Natural bentonite served as a mineral matrix, which, due to the weak bond between silicate layers, determines a significant capacity of cation exchange. This makes it possible to effectively intercalate various ions of inorganic origin into the interlayer space of the aluminosilicate. The immobilization of aluminosilicate particles on the surface of fibrous materials increases the sorption activity in relation to organic dyes. First of

* Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР. Тема № FZZW-2020-0010 и с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

all, this effect concerns materials of natural origin made from cotton and wool fibers. Its appearance is due to the state of the surface of the fibrous material, its electrostatic characteristics. The presence of modified bentonite particles on the fiber allows removing up to 95% of the dye from the solution. The results obtained are promising and it reflects the general trends in the greening of textile finishing production.

Ключевые слова: адсорбция, волокнистый материал, интеркаляция,-pillарный монтмориллонит, оксид титана.

Keywords: adsorption, fibrous material, intercalation, pillared montmorillonite, titanium oxide.

Введение

Органические красители являются основным загрязнением сточных вод текстильного отделочного производства. Для обесцвечивания красителей применяют различные физико-химические, деструктивные, биологические и другие методы, каждый из которых обладает определенными достоинствами и недостатками в отношении конкретных красителей.

В литературе наиболее оптимальным выбором для эффективного метода очистки сточных вод от органических красителей являются продвинутое каталитические системы на основе оксида титана (TiO_2), в частности, его наноразмерных форм [1], [2]. Известно, что использование наночастиц чистого TiO_2 затруднено некоторыми ограничениями, такими как низкая адсорбционная способность и возможность агломерации частиц, которые снижают его фотокаталитическую эффективность для процессов очистки воды от загрязняющих веществ органического происхождения. Чтобы преодолеть эти ограничения, наночастицы диоксида титана распределяют на минеральных носителях, таких как природные глинистые минералы [3], особенно монтмориллонит (ММ) [4]. Строение ММ характеризуется трехслойным пакетом (2:1): два слоя кремнекислородных тетраэдров (Т), обращенные вершинами друг к другу, с двух сторон покрывают слой алюмогидроксильных октаэдров (О). Благодаря изоморфным замещениям (например, Al_3^+ на Si_4^+ в Т слое и/или Al_3^+ на Mg_2^+ в О слое), алюмосиликатные слои заряжены отрицательно, а положительные зарядокомпенсирующие

ионы (противоионы) могут перемещаться в 2D-межслоевом пространстве [4], [5]. Слабая связь между слоями обуславливает значительную емкость катионного обмена [6], [7]. Это позволяет эффективно интеркалировать в межслоевое пространство ММ различные катионы неорганического происхождения, в частности, обладающие фотокаталитической активностью. Один из перспективных методов модификации ММ диоксидом титана, называемый пилларированием, заключается в проведении реакции ионного обмена межслоевых катионов ММ на положительно заряженные полигидроксокомплексы титана или частицы золя TiO_2 и дальнейшей термической обработки с образованием металлооксидных нанокристаллов (пилларов) в межслоевом пространстве ММ [7]. Результатом пилларирования ММ является увеличение расстояния между алюмосиликатными слоями в структуре глинистого минерала и появление дополнительных микро- и мезопор. TiO_2 -пилларный ММ, обладает высокоразвитой удельной поверхностью, улучшенной сорбционной способностью и демонстрирует высокую активность в различных фотокаталитических процессах, в том числе при фотолизе органических красителей [8].

На кафедре технологии керамики и наноматериалов ИГХТУ предложен и успешно применен новый подход к синтезу пилларного монтмориллонита с TiO_2 с высокой степенью кристалличности для пилларов (нанокристаллов) TiO_2 , представляющих собой смесь фаз анатаза и рутила, и с улучшенной адсорбционной и фотокаталитической активностью как результат гидро-

термально активированной интеркаляции полигидроксикомплексами титана [9].

Идея комбинации алюмосиликатов и волокнистого материала для создания сорбирующих и фильтрующих изделий встречается в научно-технической литературе [10...14]. Предпосылкой к реализации варианта применения ММ в сочетании с волокном послужило успешное использование глинистых минералов для изменения свойств шерстяных текстильных материалов [15...17]. Выбор шерстяного волокна в качестве объекта для изучения обусловлен его сложным морфологическим и гистологическим строением, превосходящим все химические и природные волокна. Главной составной частью шерсти является белок, называемый кератином, представляющий собой природный полимер, имеющий амфотерный характер, составными звеньями которого являются аминокислоты [18]. Технология создания материала, "покрытого" (coated) алюмосиликатными частицами, позволяющая придать шерсти комплекс улучшенных потребительских и технологических свойств, была разработана на кафедре химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ.

Цель исследования состояла в получении композитов на основе волокнистых материалов (ВМ) и алюмосиликатов различных форм; оценке возможности закрепления на волокне частиц алюмосиликатов, а также сорбционной активности полученных композитов по отношению к органическим красителям.

Методы

В экспериментах использовали природный минерал – Даш-Салахлинский агломератовый бентонит, который имеет следующий химический состав, масс. %: SiO_2 -57.70; TiO_2 -1.04; Al_2O_3 -13.75; Fe_2O_3 -5.36; FeO -0.20; CaO -2.49; MgO -3.13; Na_2O -1.74; K_2O -0.24; P_2O_5 -0.16; SO_3 -0.65; BaO -0.08; потери при прокаливании – 13.46. Основными "примесными" минералами являются кристобалит, кварц, плагиоклаз, кальцит и гипс; плотность 2,18 г/см³; ионообменная емкость – от 75 до 120 мг-экв/100 г глины [19]. Далее обозначен как не модифицированный бентонит (НБ).

Модификация природного минерала оксидом титана проводилась путем пилларирования, которое осуществляли гидротермально активированной интеркаляцией гидроксикомплексов титана [9].

Интеркалирующие растворы, содержащие поликатионы титана, готовили при комнатной температуре гидролизом хлорида титана в соответствии с методикой [20]. Интеркаляцию монтмориллонита полигидроксикомплексами титана проводили посредством ионного обмена в водной суспензии при покапельном введении интеркалирующего раствора и интенсивном перемешивании на магнитной мешалке в течение 3 ч при 20°C. В дальнейшем суспензию ММ и интеркалирующего раствора подвергли гидротермальной обработке в течение 5 ч при температуре 115°C и давлении 170 кПа с использованием автоклава с фторопластовым стаканом. Затем автоклав инерционно охлаждали до комнатной температуры. Интенсификация интеркаляции раствора полигидроксикомплексов титана в межслоевое пространство монтмориллонита в гидротермальных условиях при дальнейшем обжиге способствует формированию TiO_2 -пилларного монтмориллонита с высокой степенью кристалличности пилларов (нанокристаллов) TiO_2 с улучшенной адсорбционной и фотокаталитической активностью [9]. По окончании интеркаляции суспензию отмывали от ионов Cl^- , центрифугировали и подвергали сушке в сушильном шкафу при температуре 60°C.

Пилларные материалы получали прокаливанием интеркалированных образцов в печи при температуре 500°C в течение 3 ч. В дальнейшем они обозначены как модифицированный бентонит (МБ).

Полученные порошки алюмосиликатов закрепляли на поверхности текстильных волокон различной химической природы. В качестве объектов исследования в работе использованы волокнистые материалы: хлопчатобумажное (Хл), шерстяное (Ш), полиэфирное (ПЭ), полиамидное (ПА), полиакрилонитрильное (ПАН). С волокон химического происхождения и с шерсти предварительно в ходе промывки горячей водой в присутствии СМС были удалены возмож-

ные посторонние примеси. Хлопчатобумажное волокно предварительно отваривали и отбеливали для максимального удаления нецеллюлозных примесей. Обработка волокон алюмосиликатами проводилась при комнатной температуре в течение 30 мин при постоянном перемешивании из водной дисперсии, при модуле ванны $M=100$, после чего его отмывали от не закрепившихся частиц.

Количество порошка на материале контролировали гравиметрическим методом по разнице веса исходного и обработанного образцов. Параллельно были проведены СЭМ-исследования и элементный анализ поверхности на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 3 SBH (увеличение $\times 4000$), интегрированном с энергодисперсионным микроанализатором Bruker.

Через волокно с иммобилизованными на нем частицами монтмориллонита пропускали раствор красителя метиленового синего. Эффективность сорбции красителя контролировали по оптической плотности фильтрата (D), определяемой на спектрофотометре U-2001 (Hatachi) до и после адсорбции.

Результаты и обсуждения

Доказательством фиксации частиц алюмосиликатов на волокне служит изменение массы материала до и после обработки, а также микрофотографии волокна. На рис. 1 представлены результаты, позволяющие оценить влияние природы волокнистого материала на эффективность фиксации алюмосиликатов на поверхности волокна.

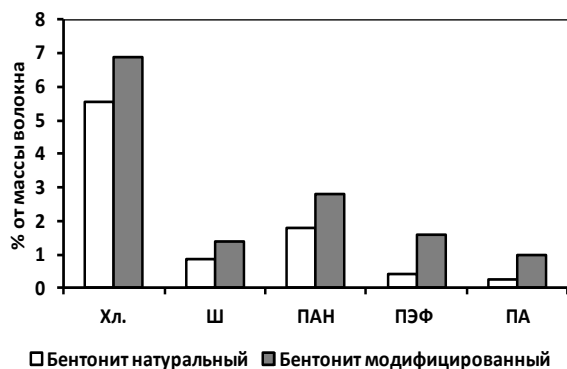


Рис. 1

На основании полученных данных по приросту массы в результате сорбции ММ волокна можно расположить в последовательности: Хл>ПАН>Ш>ПЭФ>ПА. При этом, независимо от природы волокна, на нем закрепляется больше МБ, чем НБ.

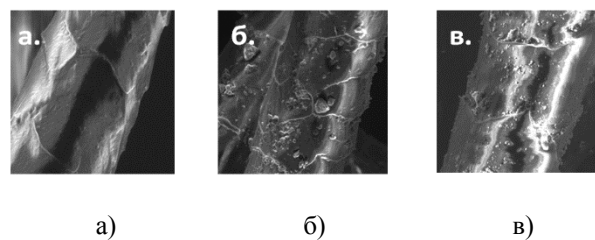


Рис. 2

На СЭМ-изображениях шерстяного волокна, приведенных на рис.2 (а – исходного; б – обработанного в дисперсии НБ; в – обработанного в дисперсии МБ волокон), кроме того, что четко видно, что порошки алюмосиликатов сорбируются и удерживаются на волокне, можно оценить равномерность распределения микрочастиц алюмосиликатов по его поверхности. НБ фиксируется в основном по краям и сколам чешуек шерсти. В отличие от него МБ равномерно распределяется по всей поверхности волокна.

Это свидетельствует о том, что при фиксации минералов на волокне большую роль играет поверхностный заряд волокон и частиц алюмосиликатов.

Поскольку бентонит в водной среде приобретает преимущественно отрицательный заряд [6], его частицы фиксируются на положительно заряженных краях чешуек и на микродефектах волокна, имеющих положительный заряд. В свою очередь, внутри кристаллов пилларных глин заряд распределяется более равномерно, чем у природных минералов, поэтому их частицы образуют равномерный слой по всей поверхности. В той или иной степени подобный эффект характерен и для остальных видов волокон, что и объясняет в конечном итоге превышение количества закрепленного на волокне МБ над НБ.

Присутствие большего количества модифицированного алюмосиликата на во-

локне, равномерность распределения микрочастиц по его поверхности, скомпенсированный заряд объясняет высокую сорбционную активность композиционных волокнисто-бентонитовых материалов (ВБМ) по отношению к органическим красителям. Особенно ярко выражен эффект на волокнах, которые без обработки минералами (нативными или модифицированными), не склонны к поглощению красителя, каким, например, является полиакрилонитрильное волокно.

На рис. 3 представлены спектры красителя метиленового синего, пропущенного через фильтрующий материал, изготовленный из полиакрилонитрильного волокна и волокон ПАН, модифицированных НБ и МБ. На спектральных кривых фильтратов по сравнению с исходным красителем наблюдается гипохромный сдвиг основной полосы поглощения ($\lambda=660$ нм) – неболь-

шой для "чистого" волокна, и значительный – для ВБМ. Визуально это выражается в обесцвечивании раствора.

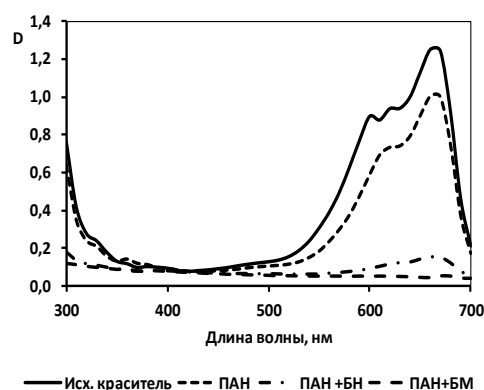


Рис. 3

Изменение оптической плотности раствора красителя метиленового синего после фильтрации через ВБМ из всех типов волокон представлено в табл. 1.

Таблица 1

Вид волокна	Остаточная концентрация красителя в растворе после фильтрации, % от исх.		
	Исх. вол	Вол.+НБ	Вол.+МБ
Хл	8,9	4,3	1,4
Ш	7,8	5,2	2,3
ПАН	90,5	10,4	4,8
ПЭ	95,4	10,0	4,3
ПА	94,9	93,2	53,4

Анализируя полученные результаты, отметили, что в разработанной композиционной системе в качестве матрицы наиболее эффективно проявили себя натуральные волокна (шерстяные и хлопчатобумажные). В отличие от синтетических, они частично удерживают краситель и без присутствия микрочастиц НБ и МБ. Но с иммобилизованным ММ эффективность очистки воды от красителя заметно повышается – в присутствии НБ и МБ в растворе остается не более 10 и 5% окрашивающего вещества соответственно. Синтетические волокна на основе полиэфира и полиакрилонитрила в сочетании с частицами алюмосиликатов также адсорбируют краситель. Исключением является материал на основе полиамида, но это хорошо коррелирует с тем фактом, что на его поверхности закрепля-

ется крайне малое количество алюмосиликатов (рис.1).

Кроме того, сравнение очистки растворов при иммобилизации на волокнах НБ и МБ доказали эффективность применения последнего. Пилларирование монтмориллонита заметно повысило его сорбционную емкость по отношению к метиленовому синему за счет формирования пористой структуры пилларного материала, обусловленной полимеризацией поликатионов титана и агрегацией пилларов в межслоевом пространстве монтмориллонита. Увеличение содержания в МБ наноразмерного оксида титана (табл.2) в форме пилларов, представляющие собой смесь фаз анатаза и рутила, в перспективе позволит обесцвечивать окрашенный волокнистый материал и решить таким образом проблему его безопасной утилизации.

Образец	Элемент, вес. %									
	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
НБ	64.26	1.43	2.06	6.59	21.19	0.18	0.16	0.51	0.30	3.31
МБ	56.47	-	0.19	1.47	5.58	-	-	-	35.75	0.54

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования получены композиционные материалы посредством иммобилизации на волокнах различной химической природы частиц нативного и модифицированного бентонита. Это позволяет придать волокнистым композициям улучшенные сорбционные свойства по отношению к органическим красителям. При этом наиболее перспективным является сочетание натуральных волокон с частицами алюмосиликатов, для которого наблюдается синергетический эффект по сорбционной активности. В дальнейшем планируется развитие данного исследования в направлении усиления эффекта удаления красителя за счет применения аддитивного адсорбционно-фотокаталитического процесса с участием частиц TiO_2 , а также испытания эффективности действия композиционного материала по отношению к реальному составу сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamashita H., Li H. Eds. Nanostructured Photocatalysts: Advanced Functional Materials. – Springer: Berlin, Germany, 2016. doi 10.1007/978-3-319-26079-2
2. Zhao H.F., Li Y., Sha L.Z. Preparation of functional air filter material based on biodegradable fibers and nano titanium // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. – Vol. 13, № 2, April - June 2018. P. 391...397.
3. Szczepanik B. Photocatalytic degradation of organic contaminants over clay- TiO_2 nanocomposites: A review, Appl. Clay Sci. – V.141, 2017. P. 227...239. doi: 10.1016/j.clay.2017.02.029
4. Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Pillared Clays and Clay Minerals. In Handbook of Clay Science, 2nd ed. – Elsevier: Amsterdam, Netherlands. – V. 5A, 2013. P. 523...557. doi:10.1016/B978-0-08-098258-8.00017-1
5. Kuschel B., Gille W., Schweiger W. Analysis of the morphology of hectorite by use of small-angle Xray scattering // Colloid Polym Sci. – V. 278, 2000. P.805...809.
6. Kon'kova T.V., Alekhina M.B., Mikhailichenko A.I., Kandelaki G.I., Morozov A.N. Adsorption proper-

ties of pillared clays // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. – V.50 (3), 2014. P. 326...330.

7. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. – Киев: Наукова думка, 1975.

8. Zhao B.X., Dang L.P., Zhang X.L., Yang N., Sun Y.Y. Preparation of TiO_2 -Pillared Montmorillonite as Photocatalyst and Photocatalytic Degradation of Methyl Orange // Appl. Mech. Mater. – V.190–191, 2012. P.534...538.

9. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Karasev N.S., Kochkina N.E., Agafonov A.V., Vinogradov A.V. Photocatalytic and adsorption properties of TiO_2 -pillared montmorillonite obtained by hydrothermally activated intercalation of titanium polyhydroxocomplexes // Beilstein J. Nanotechnol. – V.9, 2018. P.364...378. doi:10.3762/bjnano.9.36

10. Abidi N., Duplay J., Jada A. et al. Toward the understanding of the treatment of textile industries' effluents by clay: adsorption of anionic dye on kaolinite // Arabian Journal of Geosciences. – V.10, 2017. P.742...750.

11. Abidi N., Duplay J., Ayari F. et al. Adsorption of anionic dye on natural and organophilic clays: effect of textile dyeing additives // Desalination and water treatment. – V.54, 2014. P. 1...16.

12. Чвалун С. Н., Новокионова Л. А., Коробко А. П. и др. Полимер-силикатные наноккомпозиты: физико-химические аспекты синтеза полимеризацией in situ // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. Т. LII, № 5. С. 52...57.

13. Дащенко Н.В., Киселев А.М. Нанотекстиль: принципы получения, свойства и области применения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С. 51...57.

14. Bergaya F., G. Theng B. K., Lagaly G. V. Developments in Clay Science // Handbook of Clay Science. – Amsterdam: Elsevier Science, 2006.

15. Владимирцева Е.Л., Шарнина Л.В., Вельбой М.А. Улучшение потребительских свойств шерсти // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2012. Т.17, № 3. С. 91...95.

16. Владимирцева Е.Л., Шарнина Л.В., Шамсудинова Повышение устойчивости шерстяного волокна к гниению при использовании нерастворимых алюмосиликатов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2013, № 1. С. 98...105.

17. Шамсудинова Э.Г., Владимирцева Е.Л., Шарнина Л.В. Применение алюмосиликатов для защиты шерстяного волокна от инсоляции // Вестник молодых ученых СПГУТД. – 2016, № 2. С.107...111.

18. Новорядовская, Т. С., Садова С.Ф. Химия и химическая технология шерсти. – М: Легпромбыт-издат, 1986.

19. Наседкин В.В. Даш-Салахлинское месторождение бентонита (становление и перспективы развития). – М.: ГЕОС, 2008. С. 85.

20. Sterte J. Synthesis and properties of titanium oxide cross-linked montmorillonite. *Clays Clay Miner.* – V.34., 1986. P.658...664. doi:10.1346/CCMN.1986.0340606

REFERENCES

1. Yamashita H., Li H. Eds. *Nanostructured Photocatalysts: Advanced Functional Materials.* – Springer: Berlin, Germany, 2016. doi 10.1007/978-3-319-26079-2

2. Zhao H.F., Li Y., Sha L.Z. Preparation of functional air filter material based on biodegradable fibers and nano titanium // *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures.* – Vol. 13, No. 2, April - June 2018. P. 391...397.

3. Szczepanik B. Photocatalytic degradation of organic contaminants over clay-TiO₂ nanocomposites: A review, *Appl. Clay Sci.* – V.141, 2017. P. 227...239. doi:10.1016/j.clay.2017.02.029

4. Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Pillared Clays and Clay Minerals. In *Handbook of Clay Science*, 2nd ed. – Elsevier: Amsterdam, Netherlands. – V. 5A, 2013. P. 523...557. doi:10.1016/B978-0-08-098258-8.00017-1

5. Kuschel B., Gille W., Schweiger W. Analysis of the morphology of hectorite by use of small-angle X-ray scattering, *Colloid Polym Sci.* – V. 278, 2000. P.805...809.

6. Kon'kova T.V., Alekhina M.B., Mikhailichenko A.I., Kandelaki G.I., Morozov A.N. Adsorption properties of pillared clays // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* – V.50 (3), 2014. P. 326...330.

7. Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. *Adsorption on clay minerals.* - Kyiv: Naukova Dumka, 1975.

8. Zhao B.X., Dang L.P., Zhang X.L., Yang N., Sun Y.Y. Preparation of TiO₂-Pillared Montmorillonite as Photocatalyst and Photocatalytic Degradation of M-thyl Orange // *Appl. Mech. mater.* – V.190–191, 2012. P.534...538.

9. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Karasev N.S., Kochkina N.E., Agafonov A.V., Vinogradov A.V. Photocatalytic and adsorption properties of TiO₂-pillared montmorillonite obtained by hydrothermally activated intercalation of titanium polyhydroxocomplexes

// *Beilstein J. Nanotechnol.* – V.9, 2018. P.364...378. doi:10.3762/bjnano.9.36

10. Abidi N., Duplay J., Jada A. et al. Toward the understanding of the treatment of textile industries' effluents by clay: adsorption of anionic dye on kaolinite // *Arabian Journal of Geosciences.* – V.10, 2017. P.742...750.

11. Abidi N., Duplay J., Ayari F. et al. Adsorption of anionic dye on natural and organophilic clays: effect of textile dyeing additives // *Desalination and water treatment.* – V.54, 2014. P. 1...16.

12. Chvalun, S.N., Novokshonova, L.A., Korobko, A.P., et al., Polymer-silicate nanocomposites: physico-chemical aspects of synthesis by in situ polymerization, *Ros. chem. and. (J. Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev).* - 2008. T. LII, No. 5. P. 52 ... 57.

13. Dashchenko N.V., Kiselev A.M. *Nanotextile: principles of production, properties and applications* // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2007, No. 2. P. 51 ... 57.

14. Bergaya F., G. Theng B. K., Lagaly G. V. *Developments in Clay Science* // *Handbook of Clay Science.* – Amsterdam: Elsevier Science, 2006.

15. Vladimirtseva E.L., Sharnina L.V., Vel'boy M.A. Improvement of consumer properties of wool // *Izv. universities. Light industry technology.* – 2012. V.17, No. 3. P. 91...95.

16. Vladimirtseva E.L., Sharnina L.V., Shamsuddinova Increasing the resistance of wool fiber to decay using insoluble aluminosilicates // *Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (SMARTEX).* – 2013, No. 1. P. 98...105.

17. Shamsuddinova E.G., Vladimirtseva E.L., Sharnina L.V. The use of aluminosilicates to protect wool fiber from insolation // *Bulletin of young scientists of the SPGUTD.* – 2016, No. 2. P.107...111.

18. Novoradovskaya, T. S., Sadova S.F. *Chemistry and chemical technology of wool.* - M: Legprombytizdat, 1986.

19. Nasedkin V.V. Dash-Salakhlin'skoye bentonite deposit (formation and development prospects). – М.: ГЕОС, 2008. P. 85.

20. Sterte J. Synthesis and properties of titanium oxide cross-linked montmorillonite. *Clays Clay Miner.* – V.34., 1986. P.658...664. doi:10.1346/CCMN.1986.0340606

Рекомендована кафедрой химической технологии волоконистых материалов. Поступила 12.11.21.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СТЕН
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНИСТОЙ ОСНОВЫ**

**PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS
FOR SOUND INSULATION OF WALLS
WITH THE USE OF PLASMA TREATMENT OF A FIBROUS BASE**

А.К. ХАЙРУЛЛИН, Р.А. МАКСИМОВ, С. БАЛЛЫЕВ

A.K. KHAIRULLIN, R.A. MAKSIMOV, S. BALLYEV

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technology University)

E-mail: beckhenkel@mail.ru

Изготовлены композиционные материалы с применением плазменной обработки волокнистой основы с целью увеличения ее однородности и уменьшения расхода связующего компонента. С полученными композиционными материалами проведены испытания на растяжение, стойкость к истиранию на звукопоглощающие свойства. Установлено, что плазменная обработка волокнистой основы позволяет увеличить прочность композиционных материалов на 15...22 %, стойкость к истиранию на 25...35 %, звукоизоляцию на 15...20 %.

Composite materials have been manufactured using fibrous base plasma treatment in order to increase its homogeneity and to reduce the consumption of a binder component. The obtained composite materials were tested for tensile strength, abrasion resistance and sound-absorbing properties. It has been established that the fibrous base plasma treatment makes it possible to increase the strength of composite materials by 15...22%, abrasion resistance by 25...35%, and sound insulation by 15...20%.

Ключевые слова: композиционные материалы, волокнистая основа, плазменная обработка, ВЧЕ-плазма, предел прочности, стойкость к истиранию, коэффициент звукового поглощения.

Keywords: composite materials, fibrous base, plasma treatment, RFC-plasma, strength limit, abrasion resistance, sound absorption coefficient.

Введение

Одним из направлений рационального использования ресурсов в легкой промышленности является изготовление композиционных строительных материалов на волокнистой основе из кожевенной стружки [1]. Такие материалы обладают хорошими звуко-, теплоизоляционными характеристиками и предназначены для звукоизоля-

ции стен [2], [3]. Волокнистым компонентом данных композиционных материалов является кожевенная стружка, связующим компонентом является полимерная дисперсия. Кожевенная стружка получается при выравнивании кож по толщине, имеет форму тонких узких полосок, ее количество остается достаточно большим [4].

Предложено провести плазменную обработку кожевенной стружки с целью увеличения ее однородности и уменьшения расхода связующего компонента. В ранее проведенных работах установлено, что низкотемпературное плазменное (НТП) воздействие на физико-механические и эксплуатационные характеристики капиллярно-пористых и волокнистых материалов существенно зависит от химического состава компонентов материала, а также от продолжительности обработки [5...7].

Методы

Обработка проводилась в опытно-промышленной высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазменной установке [8]. Использовались следующие параметры плазменной обработки: частота генератора $f = 13,56$ МГц; давление в рабочей камере $P = 26,6$ Па; расход плазмообразующего газа – аргона $G = 0,04$ г/с; продолжительность обработки $t = 5...15$ мин; мощность разряда $W_p = 1,6$ кВт. Кожевенная стружка помещалась в плексигласовый барабан между электродами ВЧЕ-плазменной установки и обрабатывалась в заданном режиме с постоянным перемешиванием.

После плазменной обработки кожевенная стружка смешивалась с водной дисперсией поливинилацетата (ПВА) концентрации 35...55 % в соотношении 70:30. Образцы композита размером 10×10 см и толщиной от 1...1,2 см формировались и высушивались в течение 48 часов.

Контрольные и опытные образцы композиционных материалов испытывались на осевое растяжение по ГОСТ 32656–2014, на стойкость к истиранию по ГОСТ Р 52491–2005, определялся коэффициент звукового поглощения по ГОСТ 23499–2009.

Результаты и обсуждения

Установлено, что обработка образцов ведет к увеличению предела прочности при растяжении получаемого композиционного материала. Наибольшая прочность достигается при концентрации ПВА 35 % и продолжительности НТП обработки 5...7 мин, наблюдается повышение прочности на 15...22% по сравнению с контрольными образцами (рис. 1).

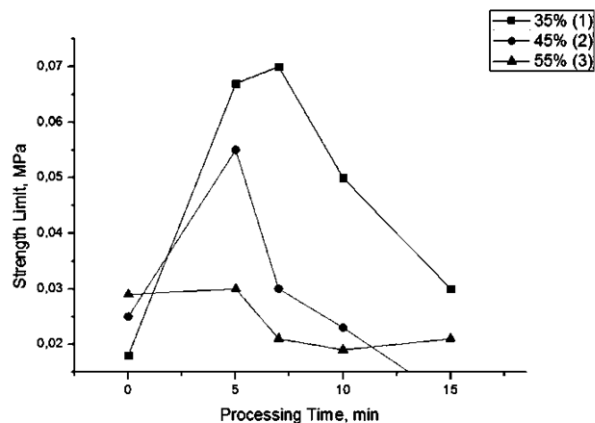


Рис. 1

Установлено, что у образцов композита из кожевенной стружки, модифицированной ВЧЕ-плазмой в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 5$ мин, и с концентрацией ПВА 35 % наблюдается повышение стойкости к истиранию на 25...35%; у образцов композита из кожевенной стружки, модифицированной ВЧЕ-плазмой в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 7$ мин, и с концентрацией ПВА 35 % наблюдается повышение стойкости к истиранию на 10...13% по сравнению с контрольными образцами. У образцов композита из кожевенной стружки, модифицированной ВЧЕ-плазмой в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 10$ мин, и с концентрацией ПВА 45 % стойкость к истиранию увеличивается на 10...25% по сравнению с контрольными образцами (рис. 2).

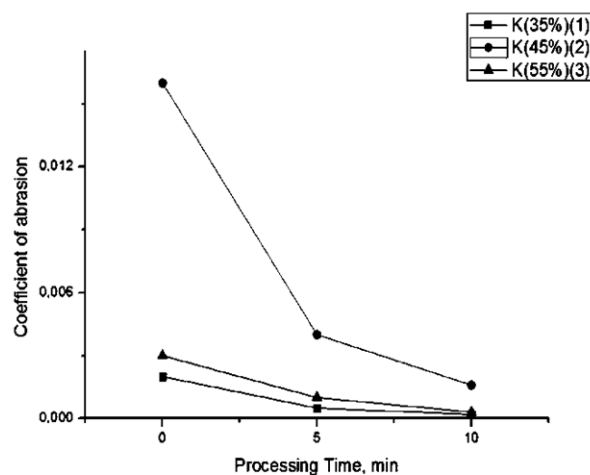


Рис. 2

Исследованы звукоизолирующие свойства полученного композита методом измерения изоляции воздушного шума внутрен-

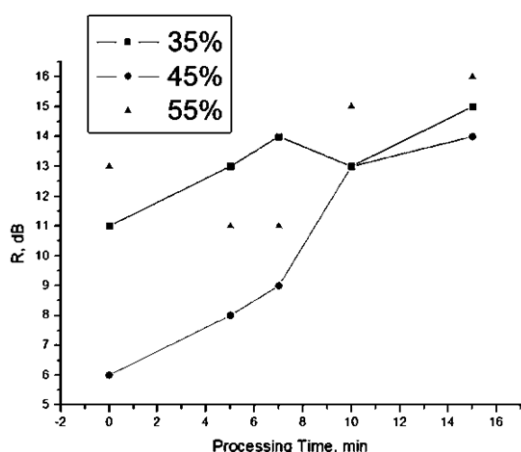


Рис. 3

Установлено, что у образцов композита из кожевенной стружки, модифицированной ВЧЕ-плазмой в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 5$ мин, и с концентрацией ПВА 35 % и 45 % звукоизолирующие свойства увеличиваются по сравнению с контрольными образцами, а у образцов композита с концентрацией ПВА 55 % уменьшаются по сравнению с контрольными образцами в камере высокого давления (КВД) (рис. 3). В камере низкого давления (КНД) значения индекса изоляции воздушного шума увеличиваются после обработки в течение 7 мин (рис. 4). У образцов композиционных материалов из кожевенной стружки, модифицированной в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 15$ мин на 15...20% улучшаются звукоизолирующие свойства по сравнению с контрольными образцами.

ВЫВОДЫ

Исходя из результатов проделанных испытаний, можно сделать вывод, что использование обработанной кожевенной стружки позволяет получить материал с удовлетворительными показателями эксплуатационных и функциональных свойств. Прочность зависит от концентрации связующего компонента и продолжительности плазменного воздействия. Плазменная обработка кожевенной стружки в

ними ограждающими конструкциями (рис. 3,4).

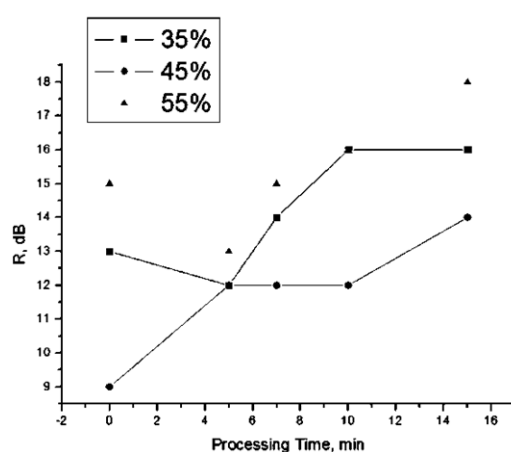


Рис. 4

режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 7...15$ мин позволяет улучшить звукоизоляцию композиционных материалов, в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 5...10$ мин позволяет увеличить стойкость к истиранию. Однако максимальная прочность наблюдается у образцов из кожевенной стружки, полученной в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 5...7$ мин, и с концентрацией ПВА 35 %.

Таким образом, ВЧЕ-плазменная обработка кожевенной стружки в режиме $W_p = 1,6$ кВт; $P = 26,6$ Па; $G = 0,04$ г/с; $t = 7$ мин позволяет снизить количество связующего компонента при одновременном повышении эксплуатационных и функциональных свойств композиционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимов Р.Г., Степин С.Н., Шаехов М.Ф., Джанбекова Л.Р. Модификация обувного картона высокочастотной плазмой пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. – 2009, №4. С.87...95.
2. Cheng H., Cheng X. Mechanical and tribological properties of MWCNTs-reinforced thermoplastic poly(p-oxybenzoate) composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – № 31 (11), 2012. P.785...795.
3. Wang X., Song Lei, Pornwannchai Wiwat, Hu Yuan, Kandola Baljinder. The effect of graphene presence in flame retarded epoxy resin matrix on the mechanical and flammability properties of glass fiber-reinforced composites // Composites: Part A. – № 53, 2013. P. 88...96.

4. Мuryчева В.В., Ясинская Н.Н. Перспективы создания в Республике Беларусь композиционной кожи и других видов композиционных материалов из отходов кожевенного производства // Мат. докл. Междунар. научн.-практ. конф.: Переработка отходов текстильной и легкой промышленности: теория и практика. – 2016. С. 8...12.

5. Miftakhov I.S., Trofimov A.V., Nagmutdinova A.I., Voznesensky E.F., Sharifullin F.S., Krasina I.V. and Rakhmatullina G.R. About a possibility of increasing the adhesion strength between mineral glass and polymeric binder under radio-frequency induction plasma treatment // Journal of Physics: Conference Series. – V.789, 2017.

6. Джанбекова Л.Р. Физическая модель взаимодействия коллагенсодержащих волокнистых материалов с низкотемпературной плазмой пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. – 2009, №4. С.193...198.

7. Рахматуллина Г.Р., Низамова Д.К., Ахвердиев Р.Ф., Рязанцева Е.Ю., Тихонова В.П., Шаехов М.Ф.. Физические процессы в капиллярно-пористом материале и покрытии в ВЧ - плазме пониженного давления // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019, Т.1, №10. С. 299...302.

8. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2000.

REFERENCES

1. Ibragimov R.G., Stepin S.N., Shaekhov M.F., Dzhanbekova L.R. Modification of shoe cardboard with low-pressure high-frequency plasma // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2009, No. 4. P.87...95.

2. Cheng H., Cheng X. Mechanical and tribological properties of MWCNTs-reinforced thermoplastic

poly(p-oxybenzoate) composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. - No. 31 (11), 2012. P.785 ... 795.

3. Wang X., Song Lei, Pornwannchai Wiwat, Hu Yuan, Kandola Baljinder. The effect of graphene presence in flame retarded epoxy resin matrix on the mechanical and flammability properties of glass fiber-reinforced composites // Composites: Part A. - No. 53, 2013. P. 88...96.

4. Murycheva V.V., Yasinskaya N.N. Prospects for the creation in the Republic of Belarus of composite leather and other types of composite materials from waste leather production // Mat. report International scientific-practical Conf.: Waste processing of textile and light industry: theory and practice. – 2016. P. 8...12.

5. Miftakhov I.S., Trofimov A.V., Nagmutdinova A.I., Voznesensky E.F., Sharifullin F.S., Krasina I.V. and Rakhmatullina G.R. About a possibility of increasing the adhesion strength between mineral glass and polymeric binder under radio-frequency induction plasma treatment // Journal of Physics: Conference Series. – V.789, 2017.

6. Dzhanbekova L.R. Physical model of interaction of collagen-containing fibrous materials with low-temperature low-pressure plasma. Bulletin of the Kazan Technological University. - 2009, No. 4. P.193...198.

7. Rakhmatullina G.R., Nizamova D.K., Akhverdiev R.F., Ryazantseva E.Yu., Tikhonova VP, Shaekhov MF. Physical processes in capillary-porous material and coatings in low-pressure HF plasma // Low-temperature plasma in the processes of applying functional coatings. - 2019, V.1, No. 10. P. 299...302.

8. Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Khashapov N.F. High-frequency plasma-jet processing of materials at reduced pressures. Theory and practice of application. - Kazan: Kazan Publishing House. state un-ta, 2000.

Рекомендована кафедрой плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов. Поступила 21.12.21.

УДК 687.03, 66.96

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_178

**ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФТ-СОПОЛИМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ КЛЕЕВОГО СЛОЯ
В ДУБЛИРОВАННОМ ПАКЕТЕ ШВЕЙНОГО ИЗДЕЛИЯ**

**FORMATION OF THE ADHESIVE LAYER'S GRAFT-COPOLYMER STRUCTURE
IN THE GARMENT DUPLICATED PARTS**

*Н.Л. КОРНИЛОВА, А.А. БИКБУЛАТОВА, С.А. КОКШАРОВ,
Д.А. МИРОШНИЧЕНКО, О.В. РАДЧЕНКО*

*N.L. KORNILOVA, A.A. BIKBULATOVA, S.A. KOKSHAROV,
D.A. MIROSHNICHENKO, O.V. RADCHENKO*

*(Ивановский государственный политехнический университет,
Московский государственный университет пищевых производств
Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново)*

*(Ivanovo State Polytechnic University,
Moscow State University of Food Production
G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo)*

E-mail: nkorn@ivgpu.com, pti@ivgpu.com, ksa@isc-ras.ru

Статья посвящена исследованию влияния проникновения полимерных дисперсий в структуру текстильного материала на изменение жесткости дублированных пакетов для основных формообразующих деталей одежды. Рассмотрены технологические режимы нанесения модифицирующих полимерных покрытий на существующие термоклеевые прокладочные материалы (ТПМ), и выявлено влияние размеров их частиц на свойства получаемого в процессе дублирования композита. Представлены зависимости показателей жесткости композитов от количества наносимой дисперсии модифицирующего полимера с различной величиной гидродинамического размера частиц в гидрозоле. Показано прогрессирующее нарастание жесткости за счет подключения поровой системы текстильной основы ТПМ и формирования трехмерного межфазного слоя. Доказана целесообразность применения методов комплексного механоакустического воздействия для уменьшения размера частиц дисперсии модифицирующего полимера до 2,5...30 нм.

The article under review is devoted to the study of penetration influence of the polymer dispersions into the structure of textile material on the reduction of duplicated packages stiffness for the main clothing shaping parts. The technological modes of applying modifying polymer coatings to existing fusible interlining materials (FIM) are considered and the influence of their particle sizes on the properties of the composite obtained in the process of duplication is found. The dependences of the composite stiffness parameters on the amount of applied dispersion of the

modifying polymer with different values of the hydrodynamic particle size are presented. A progressive increase in stiffness due to the connection of the pore system of the FIM textile base and the formation of a three-dimensional interphase layer are shown. The expediency of using methods of complex mechanoacoustic action for the particle size of the modifying polymer dispersion to 2,5 - 30 nm reduction is proved.

Ключевые слова: полиакрилатная дисперсия, механоакустическое воздействие, графт-сополимеры, полимерно-волоконистые композиты, формобразование и формозакрепление швейного изделия.

Keywords: polyacrylate dispersion, mechanoacoustic action, graft copolymers, polymer-fiber composites, creating and fixing a volumetric shape of a garment.

Термоклеевые прокладочные материалы (ТПМ) используются при изготовлении широкого ассортимента швейных изделий: мужские костюмы и сорочки, женские жакеты, юбки и брюки, специальная одежда для защиты от различных погодных и производственных факторов и т.п. Основное назначение данных материалов – придание изделию требуемой объемной формы и обеспечение ее сохранности в процессе эксплуатации [1], [2].

Ассортимент ТПМ отличается волокнистым составом и способом получения текстильной основы, видом и способом нанесе-

ния полимерного связующего (адгезива) [3], [4]. Формирование композита осуществляется в процессе склеивания основного материала и ТПМ с помощью термопластичного полимера (ТП), скрепляющего поверхностные слои текстильных материалов. В результате увеличивается жесткость и упругость отдельной детали и узлов швейного изделия. Основным недостатком существующего ассортимента ТПМ является невозможность получения композиционных материалов с широким варьированием показателей жесткости и упругости на базе одного варианта ТПМ.

Т а б л и ц а 1

Обозначение	Волокнистый состав, %	Поверхностная плотность M_S^{OM} , г/м ²	Жесткость EI_{OM} , мН·см ²		Формовочная способность Φ_{OM} , %		Воздухопроницаемость Q_{OM} , дм ³ /м ² с
			основа	уток	основа	уток	
OM1	вискоза 55, шерсть 35, полиэфир 10	240±3	4,17	3,11	30,3	33,1	183
OM2	вискоза 50, полиэфир 50	185±2	2,3	2,36	35,3	34,2	275
OM3	вискоза 80, полиэфир 20	190±2	2,0	2,0	36,1	36,1	261
OM4	шерсть 53, полиэфир 44, эластан 3	167±3	2,76	2,29	34,0	34,9	248
OM5	шерсть 99, эластан 1	167±3	5,6	3,3	26,4	33,5	218

Авторами предложена технология модификации полимерного покрытия с использованием специально подобранных полимерных препаратов, способных вступать во взаимодействие с ТП в пределах температур, ха-

рактерных для процессов дублирования деталей в швейном производстве. Получение модифицированных полимерных покрытий (МП) может быть осуществлено на базе всего многообразия существующих ТПМ, имею-

щих в качестве клеевого полимерного покрытия термопласты широкого спектра: полиолефины, алифатические и ароматические полиамиды, полиэфиры, поливинилхлориды, полиуретаны, поливинилацетаты, сополимеры этилена и винилацетата, акриловые соединения. Подбор модифицирующего препарата основывался на обеспечении качественного выполнения ТП своих непосредственных функций. Для наиболее популярного при изготовлении одежды полиамидного ТП наилучшие результаты получены при использовании в качестве МП полиакрилатов.

Для исследований в качестве основного материала (ОМ) использованы пять видов костюмных тканей, характеристика которых представлена в табл. 1.

Для модификации использованы типовые ТПМ на трикотажной основе с дополнительной уточной нитью, на одну сторону которых нанесено точечное покрытие полиамидного адгезива (термопластичного полимера – ТП). Характеристики базовых ТПМ представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Обозначение	Производитель	Волокнистый состав, %	Поверхностная плотность, M_S , г/м ²	Массовая доля нити утка, G_{WT} , %	Площадь клеевого покрытия*, S_{TP} , %
ТПМ1	Китай	п/э 30, виск.70	80	60,8	13,2
ТПМ2	Китай	п/э 30, виск.70	65	54,4	16,7
ТПМ3	Германия	п/э 27, виск.73	58	70,5	18,7
ТПМ4	Россия	п/э 60, хлоп.40	75	60,8	25,2
ТПМ5	Россия	п/э 100	70	-	15,8

Пр и м е ч а н и е. * Площадь клеевого покрытия S_{TP} , % определялась как число клеевых точек в 1 см² ТПМ, умноженное на среднюю площадь одной клеевой точки и деленное на 100.

В качестве МП использованы образцы водных олигоакрилатных дисперсий Акремос (ООО "Опытный завод акриловых дисперсий", г. Дзержинск Нижегородской обл., Россия) и Акратам AS (ПАО "Пигмент", г. Тамбов, Россия) с содержанием нелетучих веществ от 30 до 50 массовых %.

Для дезагрегации частиц в гидрозолях применяли два варианта механических воздействий: ультразвуковую обработку в дезинтеграторе УЗДН-2Т при частоте 22 кГц, а также комплексное воздействие высоких сдвиговых напряжений, ультразвука и кавитации на роторно-пульсационном активаторе (РПА) при скорости сдвига $(0.5 - 17.4)10^4 \text{ с}^{-1}$.

В результате предыдущих исследований [5...7] определены рациональные режимы основных технологических стадий получения композита. Дисперсию МП предложено наносить на ТПМ со стороны клевого слоя методом шаблонной печати с последующим подсушиванием при температуре ниже точки плавления ТП и получением модифицированного термоклеевого прокладочного материала (МПМ). Для клевого покрытия на основе полиамида ПА-12 АКР температура сушки МПМ $T_c = 60^\circ\text{C}$,

температура дублирования ОМ и МПМ $T_d = 110^\circ\text{C}$, температура влажно-тепловой обработки (ВТО) готового изделия $T_{ВТО} = 140^\circ\text{C}$. В табл. 3 представлены результаты расслаивания клеевых пакетов на базе ТПМ и МПМ после ВТО.

Данные табл. 3 свидетельствуют, что сополимерное связующее не утрачивает адгезионные свойства. Величина усилия при расслаивании пакета на 15...65% превышает уровень данного показателя для исходных ТПМ. При этом характер разрушения клевого соединения меняется с когезионного на адгезионный с выдергиванием волокон из структуры текстильного носителя, что свидетельствует об активном включении волокнистых материалов в формирование высокоразвитого межфазного слоя композитов.

В отличие от традиционного формирования 2D-структурированных клеевых прослоек адгезива, проникающего на меньшую глубину в межволоконные пространства на опорной поверхности скрепляемых материалов, графт-сополимеры должны быть внедрены в капиллярно-поровую систему отдельных волокон [8], [9]. Для этого

необходимо обеспечить проникновение дисперсии прививаемого полимера во внутриволоконные поровые пространства текстильной основы прокладочного материала. Целесообразно учитывать, что при набухании

целлюлозных волокон поперечный размер мезопоровых пустот возрастает до 25...35 нм, а диаметр субмикроскопических пор достигает 3...7 нм.

Т а б л и ц а 3

Соединяемые материалы		Усилие расслаивания клеевого соединения Р, даН/см		ΔР, %
ОМ	ТПМ	ОМ+ТПМ	ОМ+МПМ	
ОМ1	ТПМ3	4,7	7,1	51
	ТПМ2	4,1	5,8	41,5
ОМ2	ТПМ1	3,7	5,4	46
	ТПМ4	5,5	7,7	40
ОМ3	ТПМ3	4,5	6,6	46,7
	ТПМ4	5,3	7,8	47,2
ОМ4	ТПМ2	4,0	5,6	40
	ТПМ1	3,6	5,1	41,7
ОМ5	ТПМ2	4,3	6,4	48,8
	ТПМ4	5,4	7,7	42,6

Способность проникновения промышленно выпускаемых полимерных дисперсий в структуру текстильной основы ТПМ оценивали по результатам исследования размера частиц в гидрозолях методом динамического светового рассеяния. Одним из немногих препаратов, удовлетворяющих требуемым размерным параметрам, является препарат акрилатной дисперсии Акратам AS 01. Характеристика его коллоидного состояния представлена на рис. 1.

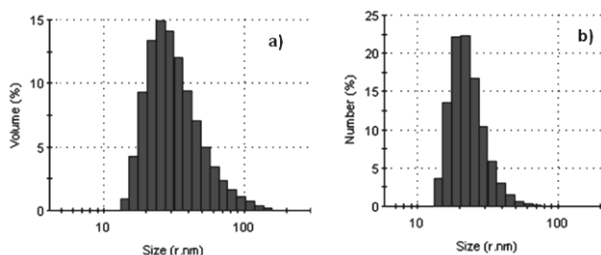


Рис. 1

На рис. 1 видно, что более 86 % относительного числа частиц и около 70 % относительного объема дисперсной фазы приходится на фракции с размером частиц менее 35 нм. Это обуславливает возможность миграции препарата в структуру целлюлозного носителя при обеспечении набухания волокнистого материала.

Выявлена возможность эффективного повышения степени дисперсности олигоакрилатных препаратов с применением ком-

плекса механоакустических воздействий: высоких сдвиговых напряжений, ультразвука и кавитации. В частности, на рис. 2 проиллюстрировано изменение размера частиц препарата Акремос 120Д после обработки на роторно-пульсационном активаторе (РПА).

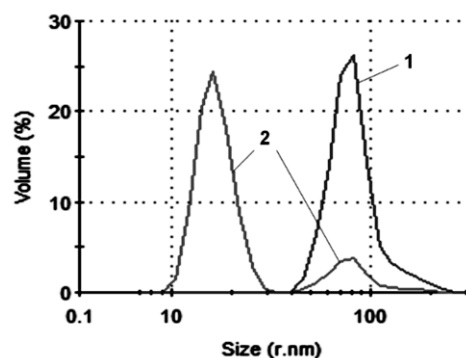


Рис. 2

Механоактивация гидрозоля обеспечивает смещение пика гидродинамического размера частиц r_{max} с 75 до 15 нм. При этом более 80 % относительного объема дисперсной фазы приходится на фракции с размером частиц менее 35 нм, способных к сорбционному поглощению мезопоровыми пространствами целлюлозного волокна. Механоактивация водной дисперсии Акратам AS 01 обеспечивает получение ультрадиспергированной формы гидрозоля с величиной параметра $r_{max} = 2,5$ нм.

Влияние количества нанесенного МП и способа его подготовки на жесткость композита после ВТО E_{I_k} получаемого в процессе дублирования композита проиллюстрировано на рис. 3. Сравнение проведено с величиной жесткости пакета костюмной ткани ОМЗ и ТПМ2. Нанесение дисперсии олигоакрилата в исходной форме (кр. 1) обеспечивает увеличение показателя E_{I_k} в 2 раза при содержании МП на материале 0,3 мас. %. Ультразвуковая обработка для дезагрегации дисперсии снижает размер частиц МП до 40 нм (кр. 2), однако этого недостаточно для проникновения внутрь волокна, в этом случае образование 3D-сополимерных структур также происходит в межнитяных и межволоконных пространствах текстильного носителя. Кроме того, прививка радикалов с меньшими размерами дает прирост E_{I_k} в 1,2 раза меньше по сравнению с нанесением одинаковых количеств МП в исходной форме.

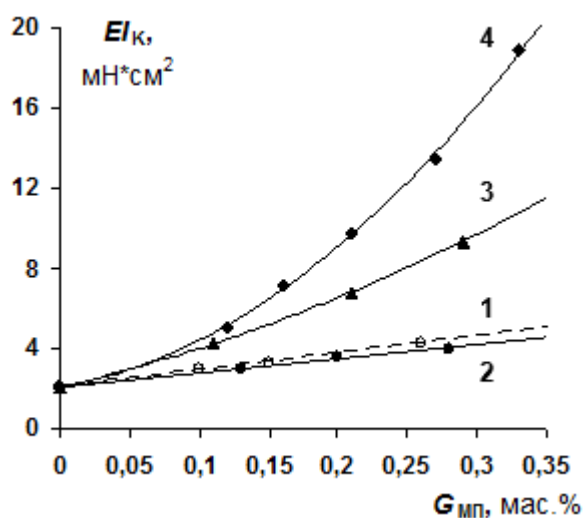


Рис. 3

При механоактивированном дроблении МП до размера мезопоровых пространств набухшего целлюлозного волокна (кр. 3) жесткость композита E_{I_k} увеличивается с 3 до 10 МН·см² в сравнении с нанесением одинакового количества неактивированной дисперсии. Применение ультрадиспергированных форм МП (кр. 4) обеспечивает полное использование внутреннего объема волокна, включая субмикроскопические поровые пространства, что отражается в повышении E_{I_k} до 10 раз.

Данные рис. 3 отражают прогрессирующее нарастание жесткости за счет подключения поровой системы текстильной основы ТПМ. Таким образом, для обеспечения проникновения прививаемого олигоакрилата в поровую структуру ТПМ целесообразно применение методов комплексного механоакустического воздействия для уменьшения размера частиц до 2,5...30 нм.

ВЫВОДЫ

На примере акрилатной дисперсии доказана эффективность модификации полиамидного покрытия типового ассортимента ТПМ. Выявлена возможность формирования межфазного слоя в виде трехмерных структур граф-сополимеров при обеспечении проникновения частиц модифицирующей дисперсии в поровую систему текстильной основы ТПМ. Методом динамического светового рассеяния оценено изменение степени дисперсности олигоакрилатных препаратов при ультразвуковой обработке и комплексном механоакустическом воздействии. Для модифицированных ТПМ показано увеличение усилия при расслаивании пакета на 15...65% и прогрессирующее нарастание жесткости формируемого композита при повышении степени дисперсности модифицирующего полимера. Доказана целесообразность применения методов комплексного механоакустического воздействия в роторно-пульсационном активаторе РПА для уменьшения размера частиц прививаемого олигоакрилата до 2,5...30 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Phebea K., Krishnaraj K. & Chandrasekaran B. Evaluating performance characteristics of different fusible interlinings // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol. 39, 2014. P. 380...385
2. Qian Zhang, Chi-wai Kan, and Chee-kooi Chan. Relationship between Physical and Low-stress Mechanical Properties to Fabric Hand of Woollen Fabric with Fusible Interlinings // Fibers and Polymers. – Vol.19, №.1, 2018. P.230...237- DOI 10.1007/s12221-018-7464-5
3. Qian Zhang and Chi-Wai Kan. A Review of Fusible Interlinings Usage in Garment Manufacture // Polymers. – 10(11), 1230, 2018. <https://doi.org/10.3390/polym10111230>
4. Kim K., Takatera M. Effects of dot-type adhesive and yam float on shear stiffness of laminated fabric with

interlining // *Text. Res. J.* – 86, 2015. P.480..492. doi/10.1177/0040517515592812

5. Koksharov S.A., Kornilova N.L., Shammut J.A., Radchenko O.V. Synthesis of a highly chained polymeric connecting in the structure of a multilayered package for garments // *Key Engineering Materials.* – V. 816, 2019. KEM. P. 219...227.

6. Koksharov S.A., Kornilova N.L., Fedosov S.V. development of reinforced composite materials with a nanoporous textile substrate and a brush-structured polymer interfacial layer // *Russian Journal of General Chemistry.* – V. 87, № 6, 2017. P. 1428...1438.

7. Кошкиаров С.А., Корнилова Н.Л., Радченко О.В., Никифорова Е.Н. Влияние структурных характеристик термоклеевых материалов на жесткость дублированного пакета // *Изв.вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2016. № 4. С. 96...101.

8. Мелешко Т.К., Иванов И.В. и др. Дифильные макромолекулярные щетки с полиимидной основной цепью и блоками полиметакриловой кислоты в боковых цепях // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б.* – 2018. Т. 60. № 1. С. 16...33.

9. Кузнецова Ю.Л., Семенычева Л.Л. Графт-сополимеры коллагена и синтетических полимеров: полиметилметакрилата и полиакриламида // *Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ // Сб. тез. Восьмой всероссийской Каргинской конф.: Полимеры-2020.* – 2020. С. 515.

3. Qian Zhang and Chi-Wai Kan. A Review of Fusible Interlinings Usage in Garment Manufacture // *Polymers.* – 10(11), 1230, 2018. <https://doi.org/10.3390/polym10111230>

4. Kim K., Takatera M. Effects of dot-type adhesive and yarn float on shear stiffness of laminated fabric with interlining // *Text. Res. J.* - 86, 2015. P.480..492. doi/10.1177/0040517515592812

5. Koksharov S.A., Kornilova N.L., Shammut J.A., Radchenko O.V. Synthesis of a highly chained polymeric connecting in the structure of a multilayered package for garments // *Key Engineering Materials.* – V. 816, 2019. KEM. P. 219...227.

6. Koksharov S.A., Kornilova N.L., Fedosov S.V. development of reinforced composite materials with a nanoporous textile substrate and a brush-structured polymer interfacial layer // *Russian Journal of General Chemistry.* – V. 87, No. 6, 2017. P. 1428...1438.

7. Koksharov S.A., Kornilova N.L., Radchenko O.V., Nikiforova E.N. Influence of structural characteristics of hot-melt adhesive materials on the rigidity of a duplicated package // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2016. No. 4. P. 96...101.

8. Meleshko T.K., Ivanov I.V. and etc. Amphiphilic macromolecular brushes with a polyimide main chain and polymethacrylic acid blocks in the side chains // *High-molecular compounds. Series B.* - 2018. V. 60. No. 1. P.16...33.

9. Kuznetsova Yu.L., Semenycheva L.L. Graft copolymers of collagen and synthetic polymers: polymethyl methacrylate and polyacrylamide // *Polymers in the strategy of scientific and technical development of the Russian Federation // Sat. abstract Eighth All-Russian Kargin Conf.: Polymers-2020.* - 2020. P. 515.

REFERENCES

1. Phebea K., Krishnaraj K. & Chandrasekaran B. Evaluating performance characteristics of different fusible interlinings // *Indian Journal of Fiber & Textile Research.* – Vol. 39, 2014. P. 380...385

2. Qian Zhang, Chi-wai Kan, and Chee-kooi Chan. Relationship between Physical and Low-stress Mechanical Properties to Fabric Hand of Woollen Fabric with Fusible Interlinings // *Fibers and Polymers.* – Vol.19, No.1, 2018. P.230...237- DOI 10.1007/s12221-018-7464-5

Рекомендована заседанием НОЦ "Центра компетенций текстильной и легкой промышленности". Поступила 30.08.21.

УДК 677.014 – 615.468

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_184

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ИЗ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ***

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT
FOR THE PREPARATION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS
FROM TEXTILE WASTE AND SECONDARY RAW MATERIALS
FOR THE MANUFACTURE OF COMPOSITE TEXTILE MATERIALS
FOR VARIOUS PURPOSES**

А.А. ЖУКОВА, А.Г. ХОСРОВЯН, Г.А. ХОСРОВЯН

A.A. ZHUKOVA, A.G. KHOSROVYAN, G.A. KHOSROVYAN

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: askarm@mail.ru; khosrovyan_haik@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы технологии и оборудования для подготовки полуфабрикатов из текстильных отходов и вторичного сырья и для изготовления композиционных текстильных материалов. Рассмотрены преимущества разработанных технологий, оборудования и способа получения композиционных текстильных материалов. Дана характеристика и преимущества использования разработанной технологической линии для подготовки полуфабрикатов и изготовления композиционных текстильных материалов. Показана вариативность разработанной технологической линии в зависимости от исходного сырья и назначения композиционных текстильных материалов. Представлены результаты теоретических исследований технологических процессов, протекающих на этапе подготовки полуфабрикатов и получении многослойных композиционных текстильных материалов.

The article under review deals with the issues of technology and equipment for the preparation of semi-finished products from textile waste and secondary raw materials, for the manufacture of composite textile materials. The advantages of the

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Департамента экономического развития и торговли Ивановской обл., проект № 20-43-370010.

developed technologies, equipment and method of obtaining composite textile materials are considered. The characteristics and advantages of using the developed technological line for the preparation of semi-finished products and the manufacture of composite textile materials are given. The variability of the developed technological line depending both on the initial raw materials and the purpose of composite textile materials is shown. The results of theoretical studies of technological processes occurring at the stage of preparing semi-finished products and obtaining multilayer composite textile materials are presented.

Ключевые слова: текстильные отходы и вторичное сырье, регенерация, композиционные текстильные материалы, оборудование и способ для получения композиционных текстильных материалов, технологические линии.

Keywords: textile waste and secondary raw materials, regeneration, composite textile materials, equipment and method for producing composite textile materials, technological lines.

В настоящее время особенно актуальными являются разработки безотходных, ресурсосберегающих технологий и оборудования для производства новых видов материалов, используемых в различных отраслях народного хозяйства.

Анализ опыта работы отечественных и зарубежных фирм, занимающихся разработкой технологий и оборудования для регенерации волокон из текстильных отходов, показывает, что существует необходимость разработки технологий и оборудования для повышения качества регенерированных волокон с целью их более эффективного использования в общем сырьевом балансе текстильной промышленности.

Повышение эффективности процесса регенерации волокон из текстильных отходов и вторичного сырья стало возможным благодаря разработке инновационной технологии с более качественной регенерацией волокон из текстильных отходов и вторичного сырья и использования в технологической линии разработанных нами оборудования для подготовки, в том числе и оборудования для рассортировки волокон, их распределения и транспортировки.

Как известно, существующие способы регенерации волокон из текстильных отходов и вторичного сырья несовершенны. Полученная из отходов волокнистая масса состоит из смеси отдельных волокон, комплек-

сов волокон, фрагментов волокон, примесей и т.д., что значительно ухудшает качество получаемой конечной продукции.

Наши разработки новой технологии и оборудования для переработки текстильных отходов и вторичного сырья на основе более качественного восстановления волокон с последующим их использованием в производстве новых видов композиционных текстильных материалов являются актуальными и необходимыми, и позволят бизнесу занять новые рыночные ниши, организовать производство новых композиционных текстильных материалов для различных отраслей народного хозяйства.

Для эффективного решения проблемы недопущения содержания в выпускаемой волокнистой смеси неразработанных комплексов волокон, фрагментов волокон, примесей и т.д. предложено использовать в технологической линии разработанное нами оборудование для рассортировки волокон, их распределения и транспортировки на основе также разработанного нами способа получения многослойных волокнистых материалов, который заключается в направленном перемещении под воздействием воздушных потоков волокнистого потока, состоящего из смеси элементарных волокон, комплексов волокон и разделении волокнистого потока на фракции по зонам формирования двух слоев (верхнего и нижнего). Верхний слой

содержит только одиночные волокна, а нижний слой – комплексы волокон. Примеси выпадают в отходы.

Преимуществом данной технологии в отличие от известных является то, что только нижний слой, состоящий из комплексов волокон, возвращается на повторную переработку, тем самым сохраняются одиночные волокна, составляющие верхний слой.

Новизна в технологии подготовки полуфабрикатов из текстильных отходов и вторичного сырья для изготовления композиционных текстильных материалов заключается в том, что полуфабрикат для изготовления композиционных текстильных материалов содержит только одиночные волокна. Минимальная длина волокна зависит от настройки оборудования для рассортировки волокон, их распределения и транспортировки.

Кроме того, дополнительное использование в технологической линии для переработки текстильных отходов разработанных нами пыльчатых разрыхлителей также обеспечивает получение волокнистой смеси с наибольшим содержанием одиночных волокон, которая затем подается на оборудование для рассортировки волокон, их распределения и транспортировки.

Применение в технологических линиях разработанных нами пыльчатых разрыхлителей повышает эффективность разрыхления и очистки волокнистого материала, снижает зажгучивание волокон, неровноту полуфабриката, повышает качество композиционного текстильного материала. В процессе расщипывания волокнистых материалов, выделения сорных примесей и уменьшения количества комплексов волокон на разработанных пыльчатых разрыхлителях важную роль играют два взаимосвязанных фактора. Первый фактор – это воздействие на комплексы волокон вращающихся рабочих органов, второй фактор (аэродинамический) – это воздействие на комплексы волокон вращающихся воздушных потоков в камерах расщипывания.

Новизна в технологии изготовления композиционных текстильных материалов заключается в применении оборудования и способа получения многослойных армированных волокнистых материалов, образую-

щихся в результате соединения одновременно сформированных равномерных по толщине и физико-механическим показателям волокнистых слоев и армирующего материала.

Преимуществами предложенной нами технологической линии изготовления композиционных текстильных материалов являются:

- упрощение и сокращение технологического процесса за счет исключения операций, протекающих на преобразователе проточесы, а также операций предварительного скрепления на иглопробивной машине, наматывания в рулон, складирование на раме и сложения волокнистых холстов с прокладыванием между них ткани для армирования и, как следствие, уменьшение времени на изготовление продукции;

- повышение качества получаемой продукции за счет дополнительной очистки и обеспыливания;

- улучшение условий труда и сокращение численности обслуживающего персонала за счет сокращения технологических операций;

- непрерывность технологического процесса, обеспеченная включением в технологическую линию разработанного нами оборудования, на котором происходит параллельное образование нескольких волокнистых слоев с последующим их соединением на данном оборудовании с материалом для армирования;

- вариативность технологической линии.

В зависимости от исходного сырья и назначения композиционных текстильных материалов определенные машины в разработанной технологической линии включаются либо выключаются. Но ключевые машины (оборудование для рассортировки волокон, их распределения и транспортировки и оборудование для получения многослойных волокнистых) работают постоянно.

Разработанные нами технологии и оборудование для подготовки полуфабрикатов из текстильных отходов и вторичного сырья и изготовления композиционных текстильных материалов позволяют получать следующие композиционные текстильные материалы:

- для изготовления костюмов сварщика, металлурга, вачег, рукавиц;
- для ремонта подземных коммуникаций (трубопроводов);
- для изготовления вентиляционных рукавов подачи воздуха в шахты;
- для сбора росы с травы;
- для локализации нефтепродуктов при их разливе;
- для изготовления обуви;
- для изготовления мебели;
- для изготовления подкрыльников для автомобилей;
- для шумоизоляции в автомобилестроении;
- для строительства автомобильных дорог (геотекстиль);
- и т.д.

При разработке технологий и оборудования для подготовки полуфабрикатов из текстильных отходов и вторичного сырья и изготовления композиционных текстильных материалов был разработан математический аппарат для описания технологических процессов, протекающих на разработанном нами оборудовании и в технологической линии [3], [4].

В результате теоретических исследований получены математическая модель процесса ударного воздействия рабочих элементов на волокнистый комплекс в разрыхлителях-очистителях, математическая модель и алгоритм для расчета условия движения волокнистого комплекса вдоль поверхности рабочего элемента в разрыхлителях-очистителях, методика расчета траекторий движения волокнистого комплекса в воздушных потоках в камерах разрыхлителей-очистителей, методика расчета скоростей воздуха в зоне аэродинамического съема волокон в разрыхлителях-очистителях, дифференциальное уравнение движения волокнистых комплексов в камере распределения при их азросъеме и движении в зону разделения на фракции в оборудовании для получения многослойных армированных волокнистых материалов и методика численного моделирования процесса движения волокнистого потока в камере аэродинамической рассортировки при получении многослойных композиционных текстильных материалов.

ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментальные исследования по определению состава волокнистой смеси после регенерации волокон из текстильных отходов вторичного сырья и эффективности процесса разволокнения в контрольных зонах технологической линии. Полученные результаты были использованы для корректировки скоростных режимов работы оборудования и количества отсасываемого технологического воздуха из контрольных зон технологической линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2471897 Российская Федерация. Способ получения многослойных волокнистых материалов и устройство для его осуществления/Хосровян Г.А., Хосровян А.Г., Красик Т.Я., Хосровян И.Г., Жегалина Т.В.– Оpubл. 10.01.2013.
2. Патент 2595992 Российская Федерация. Способ получения многослойных волокнистых материалов и устройство для его осуществления / Хосровян Г.А., Красик Т.Я., Тувин М.А., Хосровян И.Г. – Оpubл. 05.08.2016.
3. Патент № 2361022 Российская Федерация. Разрыхлитель-очиститель с многоступенчатой очисткой / Хосровян Г.А., Хосровян А.Г., Кушаков О.Н., Мкртумян А.С., Минеева Л.В., Жегалина Т.В.– Оpubл. 10.07.2009.
4. Хосровян А.Г., Мкртумян А.С., Кушаков О.Н., Красик Т.Я., Хосровян Г.А. Разработка регулятора линейной плотности на разрыхлителе-очистителе с многоступенчатой очисткой с определением граничных условий работы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №6. С. 77...79.
5. Хосровян И.Г., Красик Т.Я., Хосровян Г.А. Общая теория динамики волокнистых комплексов в процессе их взаимодействия с рабочими органами разрыхлителя // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 6. С. 194...197.
6. Хосровян И.Г. Красик Т.Я., Хосровян Г.А. Математическое моделирование движения волокнистого комплекса на колке барабана разрыхлителя // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 4. С. 85...88.
7. Тувин М.А., Хосровян И.Г., Красик Т.Я., Тувин А.А., Хосровян Г.А. Математическое моделирование процесса движения волокнистой смеси в бункерном питателе с переменной площадью поперечного сечения шахты // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 2. С. 83...87.
8. Хосровян И.Г., Красик Т.Я., Хосровян А.Г., Хосровян Г.А. Разработка теории выравнивающей способности устройства для получения многослойных волокнистых материалов// Изв. вузов. Технология

текстильной промышленности. – 2013, № 6. С.79...82.

9. Тувин М.А., Хосровян И.Г., Хосровян А.Г., Красик Т.Я., Хосровян Г.А. Математическое моделирование аэродинамической рассортировки волокон в устройстве для получения многослойных нетканых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 6. С. 71...76.

10. Хосровян А.Г., Тувин М.А., Красик Т.Я., Хосровян Г.А., Тувин А.А. Математическая модель движения волокна при его съеме ускоряющимся воздушным потоком с гарнитуры вращающегося пылевого барабана // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, №2. С. 185...188.

11. Хосровян А.Г., Хосровян И.Г., Хосровян Г.А. Движение волокнистых комплексов в процессе их аэродинамического съема в камере распределения //Международный научно-исследовательский журнал. –2021. Часть 1, № 3 (105). С. 84...88.

12. Хосровян А.Г., Хосровян Г.А. Математическое моделирование процесса очистки волокнистых материалов в разрыхлителе-очистителе //Международный научно-исследовательский журнал. –2021. Часть 1, № 4 (106). С. 86...92.

13. Хосровян А.Г., Хосровян И.Г., Хосровян Г.А. Инновационные разработки в области технологии и оборудования для производства композиционных волокнистых материалов // Научный журнал "GLOBUS" Технические науки. – 2021. Том 7, № 1 (37). С.35...39.

REFERENCES

1. Patent No. 2471897 Russian Federation. A method for producing multilayer fibrous materials and a device for its implementation / Khosrovyan G.A., Khosrovyan A.G., Krasik T.Ya., Khosrovyan I.G., Zhegalina T.V. - Publ. 01/10/2013.

2. Patent 2595992 Russian Federation. A method for obtaining multilayer fibrous materials and a device for its implementation / Khosrovyan G.A., Krasik T.Ya., Tuvin M.A., Khosrovyan I.G. – Published. 08/05/2016.

3. Patent No. 2361022 Russian Federation. Baking powder-cleaner with multi-stage cleaning / Khosrovyan G.A., Khosrovyan A.G., Kushakov O.N., Mkrtumyan A.S., Mineeva L.V., Zhegalina T.V. - Publ. 07/10/2009.

4. Khosrovyan A.G., Mkrtumyan A.S., Kushakov O.N., Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A. Development of a linear density regulator on a baking powder-cleaner with multi-stage cleaning with determination of the boundary conditions of operation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2011, No. 6. P. 77...79.

5. Khosrovyan I.G., Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A. General theory of the dynamics of fibrous complexes in

the process of their interaction with the working bodies of baking powder // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2012, No. 6. P. 194...197.

6. Khosrovyan I.G. Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of the movement of the fibrous complex on the splitter of the baking powder drum // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2013, No. 4. P. 85 ... 88.

7. Tuvin M.A., Khosrovyan I.G., Krasik T.Ya., Tuvin A.A., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of the process of movement of a fibrous mixture in a bunker feeder with a variable shaft cross-sectional area // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2015, No. 2. P. 83 ... 87.

8. Khosrovyan I.G., Krasik T.Ya., Khosrovyan A.G., Khosrovyan G.A. Development of the theory of the leveling ability of a device for obtaining multilayer fibrous materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2013, No. 6. P. 79 ... 82.

9. Tuvin M.A., Khosrovyan I.G., Khosrovyan A.G., Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of aerodynamic sorting of fibers in a device for obtaining multilayer nonwoven materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2015, No. 6. P. 71 ... 76.

10. Khosrovyan A.G., Tuvin M.A., Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A., Tuvin A.A. Mathematical model of the movement of the fiber during its removal by an accelerating air flow from the headset of a rotating serrated drum // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2017, No. 2. P. 185...188.

11. Khosrovyan A.G., Khosrovyan I.G., Khosrovyan G.A. The movement of fibrous complexes in the process of their aerodynamic removal in the distribution chamber // International Scientific Research Journal. -2021. Part 1, No. 3 (105). P. 84...88.

12. Khosrovyan A.G., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of the process of cleaning fibrous materials in a baking powder-cleaner // International Scientific Research Journal. -2021. Part 1, No. 4 (106). P. 86...92.

13. Khosrovyan A.G., Khosrovyan I.G., Khosrovyan G.A. Innovative developments in the field of technology and equipment for the production of composite fibrous materials // Scientific journal "GLOBUS" Technical sciences. – 2021. Volume 7, No. 1 (37). P.35...39.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники. Поступила 08.10.21.

УДК 677.024:63.09:004.942

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_189

**ПРОСТАЯ ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН
В ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИТАХ С ТКАНОЙ МАТРИЦЕЙ**

**SIMPLE PERCOLATION MODEL OF CRACKING
IN TEXTILE COMPOSITES WITH A WOVEN MATRIX**

*П.А. СЕВОСТЬЯНОВ, В.И. МОНАХОВ, Т.А. САМОЙЛОВА,
Ю.Б. ЗЕНЗИНОВА, Е.Н. ВАХРОМЕЕВА*

*P.A. SEVOSTYANOV, V.I. MONAKHOV, T.A. SAMOILOVA,
J.B. ZENZINOVA, E.N. VAKHROMEVA*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: petrsev46@yandex.ru

В статье представлена простая компьютерная модель развития трещины в композитном материале с тканой матрицей разных видов переплетения. Был использован метод статистической имитации динамики развития трещины как процесса перколяции. Алгоритм имитации представляет собой итерационную процедуру. На каждой итерации она достраивает уже существующую траекторию трещины новым шагом. С помощью модели получены реализации траекторий трещин. Изучены особенности распространения трещины в зависимости от вида переплетения. Анизотропия тканой основы с переплетением саржа задает общую диагональную тенденцию направления трещин, а случайная неоднородность среды ведет к нарастающему расхождению траекторий, начинающихся в одной и той же точке на границе композитного материала. В качестве интегральной оценки процесса использованы энергетические затраты на образование трещины. Исследованы энергетические затраты, необходимые для образования трещин в зависимости от переплетения и статистической неоднородности наполнителя.

The article presents a simple computer model of crack development in a composite material with a woven matrix of weave different types. The method of statistical simulation of the dynamics of crack development as a percolation process was used. The simulation algorithm is an iterative procedure. At each iteration, it completes the existing crack path with a new step. Realizations of fracture trajectories are obtained using the model. The features of crack spread are studied depending on the type of weaving. The anisotropy of the woven base with twill weave sets the general

diagonal trend in the direction of cracks, and the random inhomogeneity of the medium leads to an increasing divergence of trajectories starting at the same point on the boundary of the composite material. Energy costs for crack formation were used as an integral assessment of the process. The energy costs required for the formation of cracks are investigated depending on the interweaving and statistical inhomogeneity of the filler.

Ключевые слова: перколяция, трещина, дефект, композитный материал, статистическая имитация.

Keywords: percolation, crack, defect, composite material, statistical simulation.

Одним из основных и часто возникающих дефектов в композитных материалах являются трещины. Причин и источников возникновения трещин много как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации [1...6]. В отличие от других видов понижения уровня или потери эксплуатационных свойств материала, например, истирания, трещина распространяется в локальной области и образует непрерывную траекторию от точки своего возникновения. Траектория связывает точки материала, в которых он имеет наихудшее значение прочности по сравнению с окрестными точками. Распространение трещины относят к перколяционным процессам [7] подобно распространению электрического разряда в сплошной, но неоднородной среде. Внешне траектория трещины напоминает траекторию случайного блуждания. Однако при случайном блуждании элементы траектории на каждом этапе зависят от закономерностей самого движения и имеют вероятностный характер в однородной среде, тогда как при образовании трещины, как и при прохождении электрического разряда, элементы траектории зависят от неоднородности самой среды распространения. Возникает задача о взаимосвязи между особенностями этой неоднородности и траекторией трещины. Для решения этой задачи был использован метод статистической имитации динамики развития трещины как процесса перколяции [8...14].

Рассматривалась плоская двумерная задача в декартовых координатах X , Y . Среда, в которой происходит образование трещины, имеет форму прямоугольника с

шагом соответственно dX и dY и дискретными целочисленными координатами (r, c) , $r = 1, \dots, M$; $c = 1, \dots, N$. Ширина B и длина L среды выражены в целых числах N и M : $B = dX N$ и $L = dY M$. Способность среды сопротивляться распространению трещины в некоторой точке опишем числовой матрицей $g(r, c)$ размера $M \times N$. В более сложной постановке сопротивление среды распространению трещины в каждой точке зависит не только от координат самой точки, но и от соседних точек и должно описываться тензором в каждой точке. Однако на алгоритме имитации развития трещины это усложнение не отражается, поэтому ограничимся рассмотрением простого случая скалярной функции $g(r, c)$.

Алгоритм имитации представляет собой итерационную процедуру. На каждой итерации она достраивает уже существующую траекторию трещины новым шагом. При этом индекс r нарастает на единицу. Индекс c может остаться таким же, как и в текущем положении траектории, или уменьшится на единицу, или, наконец, возрасти на единицу, в зависимости от того, какое из трех значений: $g(r+1, c-1)$, $g(r+1, c)$ или $g(r+1, c+1)$, – является наименьшим, то есть равно наименьшему сопротивлению силам, вызывающим трещину. Итерации продолжаются, пока трещина, начавшись в одной из точек стороны прямоугольника среды распространения, не достигнет противоположной стороны. Боковые стороны выбираются достаточно удаленными от точки начала трещины, чтобы траектория трещины в любом случае выходила на про-

тивоположную сторону. Тем самым имитируется неограниченность протяженности среды в направлении, поперечном направлению распространения трещины.

На рис. 1 показаны цветовые диаграммы распределения прочности при переплетении саржа 3/1: (а) – без ($Sg = 0$) и (б) – со случайными вариациями ($Sg = 0,072$).

Для учета переплетения тканого полотна зададим его раппорт значениями элементов матрицы G , соответствующими рассматриваемому переплетению. Ниже рассматриваются четыре варианта периодической структуры тканого полотна: 1) однонаправленная вдоль основы $G = [1, -1]$; 2) однонаправленная поперек основы $G = [-1; 1]$; 3) полотно $G = [-1 1; 1 -1]$; 4) саржа 3/1 $G = [-1 0 1; 0 1 -1; 1 -1 0]$. Значения $g(r, c)$ представляют собой периодически распространённые на площадь среды до необходимых размеров матрицы G . Значения G выбраны таким образом, чтобы среднее значение $g(r, c)$ по моделируемому участку среды было равно нулю. На рис.1-а показано распределение $g(r, c)$ на примере саржевого переплетения.

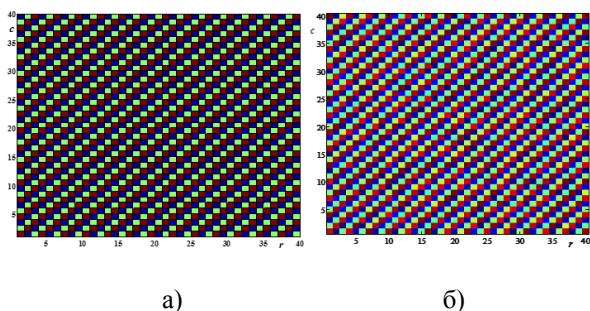


Рис. 1

Для придания образованию трещины хаотической составляющей добавим к значениям $g(r, c)$ случайную компоненту с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО) Sg . На рис.1-б показан тот же фрагмент матрицы $g(r, c)$, что и на рис.1-а, но с добавленной случайной компонентой. С увеличением Sg случайная неоднородность среды нарастает. Следовательно, переплетение создает анизотропию, а случайная компонента – стационарную, статистически одинаковую, неоднородность среды по величине сопротивления

распространению трещины. Можно считать, что анизотропную составляющую в сопротивление трещинообразованию вносит тканое полотно композитного материала, а неоднородную случайную составляющую – связующий материал, наполняющий это полотно.

Программная реализация описанного выше алгоритма распространения трещины в двумерной среде позволила получить реализации траекторий. На рис. 2 показан пример модельных траекторий трещин в образце среды с саржевым переплетением полотна 3/1 при $Sg = 0,865$. Траектории получены в пяти повторных прогонах модели при неизменных значениях параметров и условиях моделирования. Каждый прогон отличался новой реализацией $g(r, c)$, которая приводила к новой траектории. Цветовой фон отображает неоднородность среды по величине сопротивления образованию трещины.

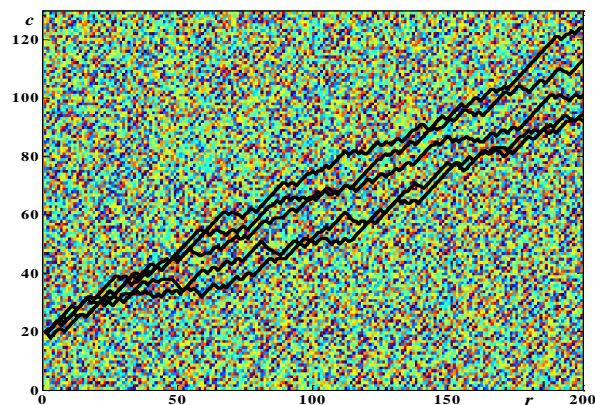


Рис. 2

Пример показывает, что анизотропия тканой основы с переплетением саржа задает общую диагональную тенденцию направления трещин, а случайная неоднородность среды ведет к нарастающему расхождению траекторий, начинающихся в одной и той же точке на границе композитного материала.

В качестве интегральной оценки процесса использованы энергетические затраты на образование трещины на единицу площади среды, которые пропорциональны криволинейному интегралу от функции $g(x,y)$ по траектории трещины

$$J = \frac{1}{L_T} \oint_{\text{по траектории}} g(x, y) d\ell \approx \frac{1}{N_T} \sum_{r, c} g(r, c), r, c \in \text{траектории}$$

В этой формуле L_T – длина траектории, N_T – число элементов модельной траектории. Очевидно, что чем меньше J , тем хуже противостоит образованию трещин композитный материал. Поскольку как анизотропная, так и случайная составляющая g (r, c) моделировались с нулевыми средними значениями, значения J имеют отрицательный знак. Они вычислялись в каждом прогоне модели. Накопленные массивы значений J по 10000 повторных прогонов модели позволили с высокой точностью и надежностью не менее 95% установить, что значе-

ния J распределены по нормальному закону, и использовать оценки среднего J_{sr} для изучения влияния различных факторов на показатель J .

С помощью модели были выполнены эксперименты, в которых варьировались четыре перечисленных выше варианта переплетения и среднее квадратическое отклонение S_g случайной компоненты. В таблицах 1...4 приведены результаты этих экспериментов для четырех вариантов переплетений тканой основы композитного материала.

Таблица 1

Одномерная вдоль основы	Wgr					
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	8,0
Sgr	0	0,1444	0,2886	0,8660	1,4434	2,3094
gSr	0	-3,03 ^{e-04}	0,0012	4,25 ^{e-04}	0,0032	0,0018
Sg	0,8165	0,8293	0,8655	1,1878	1,6632	2,4503
Jsr	-1,0000	-1,0002	-1,0002	-1,1573	-1,5164	-2,1748
Std.Err.Jsr	0	8,39 ^{e-05}	0,0002	0,0004	0,0007	0,0010
S _J	0	0,0084	0,0167	0,0435	0,0659	0,1006
Std.Err.S _J	0	5,93 ^{e-05}	0,0001	0,0003	0,0005	0,0007

В этих таблицах: Wgr – размах варьирования случайной компоненты неоднородности среды по ее сопротивлению развитию трещины; Sgr – СКО этой; gSr и Sg – оценки (по повторным прогонам) среднего значения g (r, c) и СКО; Jsr – оценка средних энергетических затрат на образование

трещины; Std.Err.Jsr – стандартная (среднеквадратическая) ошибка оценивания Jsr; S_J – оценка СКО этих энергетических затрат; Std.Err.S_J – стандартная (среднеквадратическая) ошибка оценивания S_J.

Таблица 2

Одномерная поперек основы	Wgr					
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	8,0
Sgr	0	0,1444	0,2886	0,8660	1,4434	2,3094
gSr	0	2,21 ^{e-04}	4,07 ^{e-04}	-0,0037	-0,0119	0,0045
Sg	0,8165	0,8301	0,8649	1,1933	1,6574	2,4525
Jsr	0	-0,1257	-0,2507	-0,7500	-1,2505	-1,999
Std.Err.Jsr	0	6,52 ^{e-05}	0,0001	0,0004	0,0006	0,0009
S _J	0	0,0065	0,0124	0,0363	0,0601	0,0954
Std.Err.S _J	0	4,61 ^{e-05}	8,76 ^{e-05}	0,0003	0,0004	0,0007

Таблица 3

Полотно	Wgr					
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	8,0
Sgr	0	0,1444	0,2886	0,8660	1,4434	2,3094
gSr	0	-0,00068	-0,0020	0,0032	-0,0064	-0,0077
Sg	1,0000	1,0112	1,0402	1,3240	1,7550	2,5294
Jsr	-0,9500	-1,0771	-1,1597	-1,4883	-1,8252	-2,4112
Std.Err.Jsr	0	9,53 ^{e-05}	0,00018	0,0005	0,0009	0,0013
S _J	0	0,0095	0,0184	0,0549	0,0894	0,1321
Std.Err.S _J	0	6,74 ^{e-05}	0,0001	0,0004	0,0006	0,0009

Саржа 3/1	Wgr					
	0	0,5	1,0	3,0	5,0	8,0
Sgr	0	0,1444	0,2886	0,8660	1,4434	2,3094
gSr	0	0,0002	-0,0007	-0,0014	-0,0063	-0,00003
Sg	0,8165	0,8290	0,8652	1,1897	1,6622	2,4474
Jsr	-0,9964	-0,9967	-0,9964	-1,1538	-1,51239	-2,1704
Std.Err.Jsr	0	0,0001	0,0002	0,0004	0,0006	0,0010
S _J	0	0,0083	0,0174	0,0436	0,0644	0,0961
Std.Err.S _J	0	0,0001	0,0001	0,0003	0,0005	0,0007

Малые значения стандартных ошибок оценивания говорят о достаточно большом числе повторных прогонов модели, обеспечивающих высокую точность оценивания. Для второго варианта переплетения, при котором нити ткани периодически, в пределах переплетения, препятствуют распространению трещины, средние энергозатраты на трещину примерно в 8 раз выше, чем для композита, у которого трещина распространяется вдоль одномерно направленной волокнистой основы. Однако при большой неоднородности наполнителя анизотропия основы уже не имеет такого значения и затраты у обоих вариантов переплетений становятся практически одинаковыми. Заметим, что при саржевом переплетении затраты энергии при всех уровнях случайной неоднородности практически совпадают с затратами энергии для одномерно направленной основы.

ВЫВОДЫ

Разработана простая компьютерная модель развития трещины в композитном материале с тканой матрицей разных видов переплетения. Изучены особенности распространения трещины в зависимости от вида переплетения. Исследованы энергетические затраты, необходимые для образования трещин в зависимости от переплетения и статистической неоднородности наполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Валишин А.А., Антонова И.В.* Перколяционная модель накопления микродефектов и коллапса зоны вынужденной эластичности перед фронтом трещины разрушения в полимерных и композиционных материалах // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. Вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1556>.
2. *Столяров О.Н., Горшков А.С.* Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. – 2009, №4. С.21...25.
3. *Буров А.Е.* Разрушение однонаправленного композита с расслоением в вершине поперечной трещины. – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН.
4. *Гасанов Ш.Г.* Моделирование трещинообразования в волокнистом композите при изгибе // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2018, 14 (3). С. 248...257.
5. *Корнев В.М.* Необходимые и достаточные критерии разрушения композита с хрупким связующим // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. Т. 43, №3. С. 152...160.
6. *Трещалин Ю.М.* Композиционные материалы на основе нетканых полотен. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015.
7. *Гергега А.Н.* Физические аспекты процессов самоорганизации в композитах. 1. Моделирование перколяционных кластеров фаз и внутренних границ // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2013. Т. 19, №3. С. 406...419.
8. *Севостьянов П.А., Забродин Д.А.* Обобщенная перколяционная модель износа двумерных полотен из волокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №4. С. 151...153.
9. *Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Дасюк П.Е.* Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств. – М.: "Тисо Принт", 2014. ISBN 978-5-9904852–2-8.
10. *Szablewski P.* Estimating engineering constants of a selected model of textile composite // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol.40, September. 2015. P.236...242.
11. *Jian Songa, Weidong Wen & Haitao Cui.* Finite element analysis of mechanical properties of 2.5D angle-interlock woven composites: Part 1 – Full-cell model and its validation // Indian Journal of Fibre & Textile Research. – Vol. 42, March 2017. P. 17...24.
12. *Guoqing Zhang, Yanping Xia, Hui Wang, Yu Tao, Guiliang Tao, Shantung Tu, Haiping Wu.* A Percolation Model of Thermal Conductivity for Filled Polymer Composites // Journal of Composite Materials. – Vol.44, №8, 2010. P. 963...970.
13. *Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Starushenko G.A.* Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part I: Square lattice of circular inclusions // Compos. Struct. –

179, 2017. P.617...627. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.070.

14. Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Starushenko G.A. Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part II: Square lattices of rhombic inclusions and hexagonal lattices of circular inclusions // *Compos. Struct.* – 180, 2017. P.351...359. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.068.

REFERENCES

1. Valishin, A.A., Antonova, I.V. Percolation model of accumulation of microdefects and collapse of the forced elasticity zone ahead of the fracture crack front in polymer and composite materials // *Engineering journal: science and innovations.* - 2016. - Issue. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1556>.

2. Stolyarov, ON, Gorshkov, A.S. The use of high-strength tex-stylish materials in construction // *Engineering and construction journal.* - 2009. - No. 4. - P.21-25.

3. Burov, A.E. Fracture of a unidirectional composite with delamination at the tip of a transverse crack. - Krasnoyarsk, Institute of Computational Modeling SB RAS.

4. Hasanov, Sh.G. Modeling of cracking in a fibrous composite during bending. *Structural mechanics of engineering structures and structures.* 2018. - 14 (3). - P. 248-257.

5. Kornev, V.M. Necessary and Sufficient Criteria for Fracture of a Composite with a Brittle Binder // *Applied Mechanics and Technical Physics.* - 2002. - T. 43. No. 3. - S. 152-160.

6. Treshchaln, Y.M. Composite materials based on nonwoven fabrics. - M.: Moscow State University. M.V. Lomonosov, 2015. -- 220 p., Ill.

7. Gerega, A.N. Physical aspects of self-organization processes in composites. 1. Modeling of percolation clusters of phases and internal boundaries // *Mechanics*

of composite materials and structures. - 2013. - T. 19. - No. 3. - S. 406-419.

8. Sevostyanov, P.A., Zabrodin, D.A. Generalized percolation model of wear of two-dimensional webs of fibrous materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2011. -- 4 (333). - S. 151 - 153.

9. Sevostyanov, P.A., Zabrodin, D.A., Dasyuk, P.E. Computer modeling in the tasks of studying textile materials and industries. - M.: "Tiso Print", 2014. - 264 p. ISBN 978-5-9904852-2-8

10. Szablewski, P. Estimating engineering constants of a selected model of textile composite / *Indian Journal of Fibre & Textile Research.* Vol.40, September 2015, pp.236-242.

11. Jian Songa, Weidong Wen & Haitao Cui. Finite element analysis of mechanical properties of 2.5D angle-interlock woven composites: Part 1— Full-cell model and its validation / *Indian Journal of Fibre & Textile Research.* Vol. 42, March 2017, pp. 17-24.

12. Guoqing Zhang, Yanping Xia, Hui Wang, Yu Tao, Guiliang Tao, Shantung Tu, Haiping Wu. A Percolation Model of Thermal Conductivity for Filled Polymer Composites. *Journal of Composite Materials.* 2010. Vol.44. No.8/2010-pp. 963-970.

13. Andrianov, I.V., Awrejcewicz, J., Starushenko, G.A. Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part I: Square lattice of circular inclusions. *Compos. Struct.* 2017, 179,617-627. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.070

14. Andrianov, I.V., Awrejcewicz, J., Starushenko, G.A. Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part II: Square lattices of rhombic inclusions and hexagonal lattices of circular inclusions. *Compos. Struct.* 2017, 180, 351-359. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.068

Рекомендована кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления. Поступила 26.07.21.

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ИМПРЕГНИРОВАНИЯ
В СИНТЕЗЕ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ***

**INFLUENCE OF DYNAMIC IMPACT
ON THE KINETICS OF THE IMPREGNATION PROCESS
IN THE SYNTHESIS OF A POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL**

C.B. EPШOB, E.H. KАЛИНИН, B.B. КУЗНЕЦОВ, С.А. КОКШАРОВ, И.А. СУВОРОВ
S.V. ERSHOV, E.N. KALININ, V.B. KUZNETSOV, S.A. KOKSHAROV, I.A. SUVOROV

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Институт химии растворов РАН им. Г.А. Крестова, г. Иваново)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo)**

E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru; enkalini@gmail.com; kuznetsovtex@gmail.com;
ksa@isc-ras.ru; suvorov@live.ru

Приведены результаты численного моделирования кинетики процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим, дающие возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного полимерного материала. Получены графические зависимости кинетики импрегнирования связующего в капиллярно-пористой структуре при различных значениях частот генерирования динамического режима процесса в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала.

The results of numerical simulation of the impregnation process kinetics of a reinforcing capillary-porous structure with a viscous binder are presented, making it possible to predict the given structural parameters of the synthesized composite polymer material. The graphical dependences of the impregnation kinetics of the binder in the capillary-porous structure at various frequency values of the dynamic mode of the process generating in the form of ultrasonic vibrations for various colloidal compositions of the binder, the dynamic porosity of the reinforcing component, with the values of the pressure drop at a unit length of diffusion as applied to the methods of obtaining a polymer composite material have been obtained.

Ключевые слова: численное моделирование кинетики процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим, генерирование динамического режима процесса в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, критериальная форма зависимостей процесса импрегнирования.

* Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ по проекту 20-43-370007/20 Ивановская область, "Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем".

Keywords: numerical modeling of the impregnation process kinetics of a reinforcing capillary-porous structure with a viscous binder, generation of a dynamic mode process in the form of ultrasonic vibrations for various colloidal compositions of the binder, criterial form of the impregnation process dependences.

Введение

Оптимизация функции селективности армирующей структуры композитной системы как мезофльтрационной перегородки по отношению к параметрам структуры капиллярно-пористой системы, обеспечивающей процесс массопередачи при импрегнировании вязкой связующей матрицей при формировании полимерного композитного материала (ПКМ) в условиях гидравлического вакуума, создаваемого в армирующей капиллярно-пористой структуре (КПС), обеспечивающего создание движущих сил для заполнения ее объема, при влиянии динамического воздействия на процесс синтеза полимерного композитного материала на основе моделирования переходных состояний системы в функции входных параметров процесса массопередачи является начальным этапом синтеза проблемно-ориентированной численной модели, обеспечивающей прогнозирование заданных конструктивных параметров синтезируемого композитного материала [1], [2], а также прототипирования параметров оборудования для пропитки КПС с оптимальными технико-экономическими показателями на основе сравнительного анализа статического и динамического характеристик кинетики, в том числе процессов импрегнирования при синтезе ПКМ.

Целью анализа динамического воздействия на кинетику импрегнирования при формировании ПКМ является сравнительный анализ:

- кинетических параметров процесса пропитки КПС армирующей компоненты вязким связующим при свободном ламинарном течении при статическом и динамическом колебательном воздействии на упруговязкую систему, образующую ПКМ;
- влияния структурных параметров КПС армирующей компоненты на ее гидродинамические параметры при массопередаче упруговязкой фазы в процессе импрегнирования капиллярно-пористой структуры ар-

мирующей компоненты;

- параметров аппаратных средств амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) импрегнирующего – пропиточного аппаратного обеспечения и процесса, способствующих интенсификации процесса заполнения КПС ПКМ.

Основная часть

Возможность получения аналитических решений поставленной задачи связана с введением весьма существенных допущений, с дискретизацией вычислительных процессов в пространстве и во времени, существенно снижающих универсальность численных моделей, а также их адекватность в процедурах прогнозирования выходных параметров исследуемых процессов.

С учетом закономерностей процесса импрегнирования объем Q связующего, проходящего через КПС армирующей компоненты ПКМ в единицу времени, определится как пропускная способность КПС:

$$Q = \frac{K_n P_f}{\mu H} \delta, \quad (1)$$

где P_f – перепад давлений (гидравлический вакуум) в КПС армирующей компоненты ПКМ, Па; H – толщина КПС армирующей компоненты ПКМ – путь течения связующего через армирующую составляющую, м; δ – полная площадь поперечного сечения потока связующего, м²; μ – динамическая вязкость связующего, Па·с; K_n – коэффициент проницаемости КПС армирующей компоненты, м².

Процесс импрегнирования по аналогии с процессом фильтрования представляет собой сложный массообменный гидродинамический процесс, описываемый в виде движения связующей через КПС наполнителя, обладающую фильтрующими характеристиками. При ламинарном режиме такое течение описывается уравнением Дарси в форме [3]:

$$Q = \frac{K_{\phi} S \Delta h}{H}, \quad (2)$$

где Q – пропускная способность КПС армирующей компоненты ПКМ, $\text{м}^3/\text{с}$; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь поверхности КПС в горизонтальной плоскости армирующей компоненты ПКМ, м^2 ; Δh – потери напора потока в КПС армирующей компоненты ПКМ, м ; H – толщина слоя КПС, м .

Так как входящий в формулу коэффициент фильтрации K_{ϕ} определяется экспериментально и зависит как от свойств КПС, так и от свойств связующего, то для определения гидравлических характеристик КПС армирующей компоненты ПКМ в процессе импрегнирования, независимо от индивидуальных свойств связующего, целесообразно использовать понятие проницаемости КПС армирующей компоненты ПКМ. Количественно этот показатель выражается посредством коэффициента проницаемости K_n , характеризующим только свойства КПС и связанным с коэффициентом фильтрации зависимостью:

$$K_n = \frac{K_{\phi} \mu}{\rho g}, \quad (3)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$; ρ – плотность связующего, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; μ – динамическая вязкость связующего, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

В свою очередь, для ламинарного потока зависимость между коэффициентом фильтрации K_{ϕ} и пористостью КПС (рис. 1 – зависимость коэффициента фильтрации в функции показателя Козени-Кармана (коэффициенты фильтрации: k_{fx} – хлопчатобумажной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 200 мкм; k_{fx1} – льняной ткани, соответствующий динамической (эффективной) пористости 280 мкм); k_{fx2} – углеродной ткани полотняного переплетения, соответствующий динамической (эффективной) пористости 250 мкм)) может быть определена посредством параметра Козени-Кармана [4]:

$$K_{\phi} = \frac{d_f^2}{c} \frac{\varepsilon_f^3}{(1-\varepsilon_f)^2}, \quad (4)$$

где d_f – средний диаметр волокон, мм ; ε_f – эффективная пористость КПС армирующей компоненты, c – параметр Козени-Кармана, зависящий от извитости пор (для волокнистых материалов $80 \leq c \leq 320$).

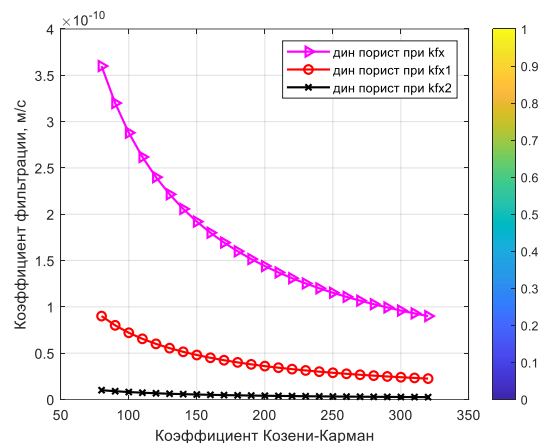


Рис. 1

Эффективная пористость армирующего материала определяется как дробный объем пор, сопоставимый по размеру с критическим диаметром молекул связующего. При этом пористость волокнистого армирующего наполнителя поддается варьированию как по величине общего объема пор, так и по изменению эффективного диаметра пор [5].

При этом, решая задачу синтеза функциональных параметров (геометрических и гидравлических) КПС ПКМ применительно к реализации процесса импрегнирования, предшествующие соображения дают возможность представить уравнение Дарси (2) посредством коэффициента проницаемости:

$$Q = K_n S \left(\frac{P_f}{\mu H} \right), \quad (5)$$

где P_f – величина гидравлического вакуума – источника движущих сил процесса импрегнирования, Па .

Для КПС армирующей компоненты ПКМ, имеющих поры в виде параллельного

пучка капилляров с диаметрами одного порядка, коэффициент проницаемости K_{Π} может быть определен как

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d_K^4}{128} n, \quad (6)$$

где d_K – диаметр капилляра, м; n – количество пор на единицу поверхности КПС, m^{-2} .

При использовании коэффициента проницаемости в критериях, характеризующих процесс течения связующего через КПС армирующей компоненты, имеет место линейная зависимость между этими критериями в соответствии с гипотезой Козени-Кармана. Однако отклонение от линейности закона процесса импрегнирования может наступить при различных пороговых значениях, определяемых критерием Рейнольдса для различных параметров функционирования (гидродинамических параметров) КПС ПКМ.

Это может быть объяснено наличием в поровых каналах местных сопротивлений, вследствие чего многоструйный поток жидкости движется через пористую структуру по криволинейным траекториям с непрерывно изменяющимися скоростями и ускорениями, причем в один и тот же момент времени в различных поровых каналах одной фильтрующей КПС эти показатели могут существенно различаться, следствием чего является нарушение устойчивости гидродинамических параметров потока связующей компоненты через КПС ПКМ.

Прогнозируя геометрические параметры КПС, задавшись значениями d_K , n и имея в виду, что средняя скорость импрегнирования – заполнения пор КПС – $v_{\phi} = Q/S$, получим графическую зависимость скорости импрегнирования от коэффициента фильтрации для различных значений коэффициента динамической вязкости связующего (рис. 2 – скорость импрегнирования в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям динамической вязкости связующего ($\mu_1=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2); $\mu_2=6,0$ Па·с (ПВС марки 27/1) – для коллоидных композиций поливинилового спирта при

12%-ной концентрации матрицы; $\mu_1=3,5$ Па·с – для коллоидной композиции акрилатного полимера (оксилат жирных кислот – TUBIVIS DRL 170)).

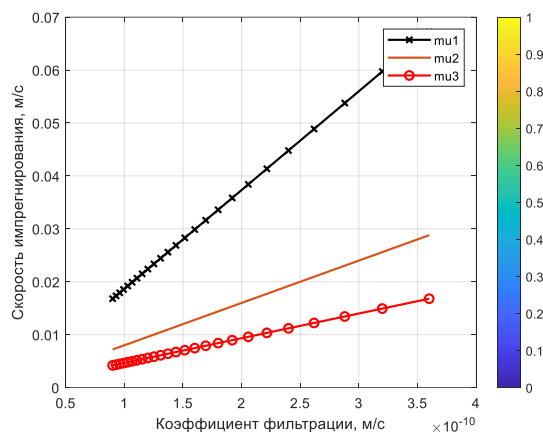


Рис. 2

Полученные графические зависимости дают возможность определить местные значения скорости импрегнирования в КПС ПКМ (как перегородку) с расчетом значения пропускной способности КПС по заданным величинам гидравлического вакуума. Зависимость среднего значения пропускной способности КПС от заданной величины вакуума показана на рис. 3 – скорость импрегнирования в функции коэффициента фильтрации применительно к различным значениям создаваемого вакуума: $dP=0,2E6$ Па – методом контактной формовки; $dP1=50E6$ Па – методом прессования (давление впрыска); $dP2=0,1E6$ Па – методом вакуумной инфузии.

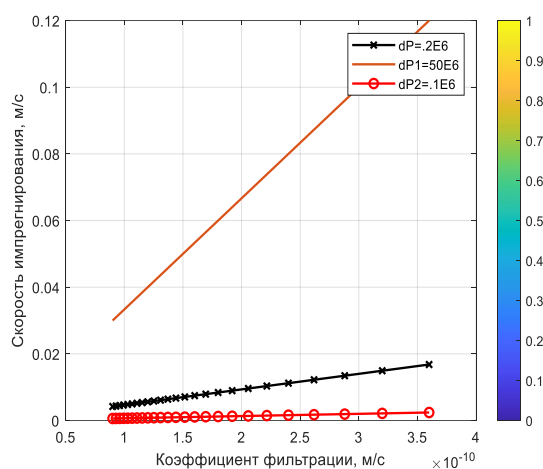


Рис. 3

Так как большинство КПС армирующей компоненты ПКМ имеет поры неправильной формы и переменного сечения, расположенные произвольно по пути движения связующего, то реальное значение коэффициента проницаемости K_p этих материалов возможно определить только экспериментально или прогнозировать методами синтеза и анализа стохастических моделей.

Одним из направлений повышения производительности процесса импрегнирования капиллярно-пористой структуры нами рассматривается возможность сообщения системе ультразвуковых колебаний [10], [11], создающих при динамическом режиме знакопеременное давление P_w , носящее волновой характер, вследствие чего выражение, определяющее скорость импрегнирования, имеет вид [5]:

$$V_{\phi} = \frac{K_{\phi} D_p + P_w}{\mu} \cdot \frac{1}{1} \quad (7)$$

Таким образом, при динамическом режиме скорость V_{ϕ} движения частиц связующего через КПС имеет большую величину, чем при статическом режиме нагружения за счет дополнительного знакопеременного давления ΔP . Подключая в численную модель [6] дополнительные параметры устройства, генерирующего динамический режим процесса импрегнирования, мы получили зависимости скорости движения связующего в КПС для различных значений частот генерирования динамического режима процесса импрегнирования в форме ультразвуковых колебаний (рис. 4 – зависимости скорости импрегнирования связующего через КПС от коэффициента фильтрации в статическом и динамическом режимах при заданных частотах колебаний ультразвукового генератора: dyn – 50000 кГц; dyn1 – 42000 кГц; dyn2 – 35000 кГц).

При достаточно малой скорости движения связующего через КПС основную часть гидравлических потерь составляют потери на трение, а на долю потерь в местных сопротивлениях приходится сравнительно небольшая величина. Режим движения связующего в порах при этом будет носить ламинарный характер, а потери на трение бу-

дут связаны со скоростью потока посредством линейной зависимости в соответствии с уравнением Дарси (4).

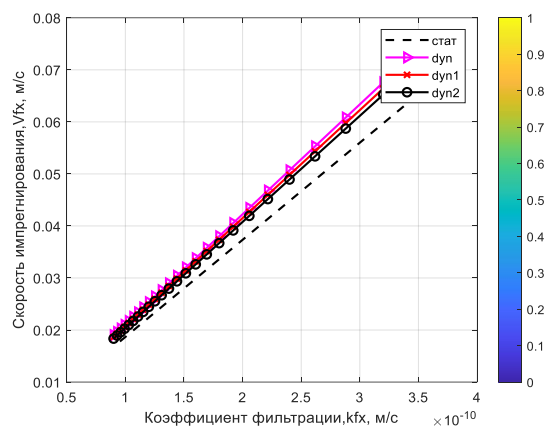


Рис. 4

Увеличение производительности процесса импрегнирования за счет повышения скорости течения гидродинамический режим движения потока будет отклоняться от ламинарного, что связано с возрастанием относительного влияния гидравлических потерь в местных сопротивлениях на суммарные потери в КПС армирующей компоненты ПКМ, причем течение жидкости не будет подчиняться зависимостям, соответствующим уравнению (5).

Для определения оптимальной скорости течения связующего через КПС армирующей компоненты КПК необходимо иметь показатель, выраженный в критериальной форме, так как сложность происходящих при этом явлений и многообразие различных факторов, влияющих на рассматриваемый процесс, не позволяют решать описывающие его уравнения в аналитическом виде.

Движение связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ помимо критерия Рейнольдса (Re), как меры отношения инерционных сил и сил трения в КПС [3], будет определяться также критерием Эйлера, характеризующим зависимость скорости импрегнирования от полного перепада давлений в КПС армирующей компоненты ПКМ и являющегося мерой отношения сил гидравлического давления и сил инерции в потоке связующего:

$$Re = \frac{v_{\phi} \rho \sqrt{K_{\Pi}}}{\mu}$$

$$Eu = \frac{\Delta p \sqrt{K_{\Pi}}}{H v_{\phi}^2 \rho} \quad (8)$$

Поскольку движущая сила в процессе импрегнирования определяется глубиной гидравлического вакуума, создаваемого в КПС армирующей компоненты ПКМ по пути движения связующего, то применяется модифицированный критерий Эйлера, в котором показатель средней скорости импрегнирования выражен в виде численно равного ему показателя удельной пропускной способности КПС армирующей компоненты ПКМ при заданной величине вакуума [9], характеризующего для несжимаемой жидкости с постоянными физическими параметрами отношение сил давления и сил инерции с позиций величины не абсолютного давления, а его изменения.

Для характеристики влияния толщины слоя КПС армирующей компоненты ПКМ на процесс импрегнирования КПС критерий Эйлера (Eu) целесообразно преобразовать, заменив показатель перепада давления – гидравлического вакуума, величиной градиента давления $\Delta p/H$ [3].

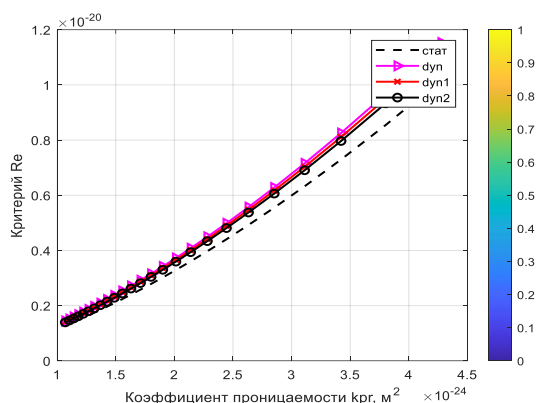


Рис. 5

Экспериментальное определение параметра, определяющего геометрические характеристики КПС армирующей компоненты ПКМ – коэффициентом проницаемости K_{Π} , величина которого зависит только от геометрических параметров КПС армирующей компоненты ПКМ [3], дает возможность выразить модифицированный критерий Эйлера в виде:

Зависимости изменяющихся критериев Re и Eu от величины гидравлического вакуума в виде градиента давления $\Delta p/H$ применительно к условиям движения фильтруемой связующей через проницаемую КПС в условиях статического режима движения и режима интенсифицированного ультразвуковыми колебаниями, сообщенными вязкой связующей, показаны на рис. 5 (значения критерия Рейнольдса Re в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах при динамической вязкости связующего ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы) и рис. 6 (характер изменения критериев Эйлера (а) и Лагранжа (б) в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах импрегнирования для динамической вязкости связующей ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы).

Критерий Эйлера будет в случае ламинарного режима течения иметь очень большие значения, так как силы давления во много раз превышают величину инерционных сил, а величина критерия Рейнольдса будет крайне мала ввиду преобладающего влияния сил трения (рис.6-а), то есть

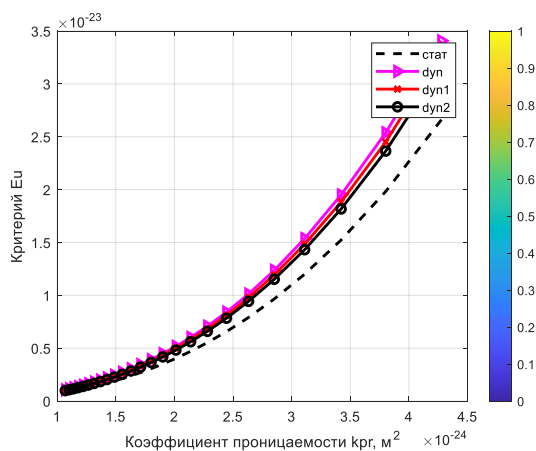
$$Re \rightarrow 0; Eu \rightarrow \infty,$$

а в качестве критерия подобия может быть использован критерий Лагранжа (La), определяемый как произведение вырождающихся критериев Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu) [9]

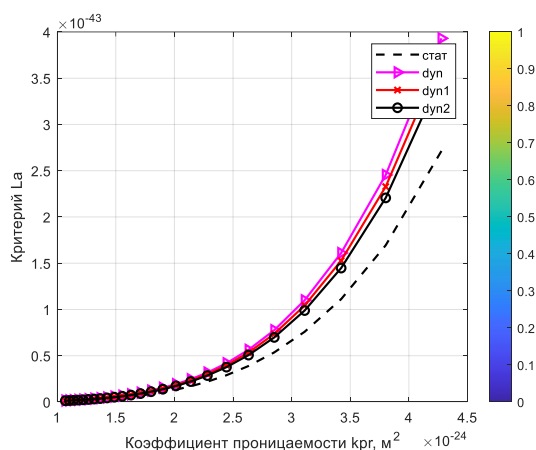
$$La = Re Eu = \frac{\Delta p K_{\Pi}}{v_{\phi} \mu H}$$

Постоянство критерия Лагранжа при заданных технологических параметрах про-

цесса импрегнирования в условиях ламинарного режима свидетельствует об автономности процессов перемещения связующего через КПС ПКМ, то есть об их автоматическом подоби (рис. 6-б).



(а)



(б)

Рис. 6

Подобие процесса импрегнирования при ламинарном режиме в случае выбора в качестве геометрического параметра, входящего в критерии подобия, коэффициента проницаемости K_{II} является неполным, так как в этом случае граничные значения применимости линейного закона фильтрования зависят от частных значений свойств фильтрующей способности структурных параметров армирующей КПС ПКМ.

Изложенное справедливо для движения связующего через КПС армирующей компоненты ПКМ, то есть для процесса импрегнирования КПС ПКМ.

Поскольку в реальных условиях в связующем, хотя и содержатся твердые частицы, но накопления этих частиц в порах фильтрующей перегородки и на ее поверхности не приводит к изменению пористости КПС армирующей компоненты ПКМ ввиду систематического обновления КПС армирующей компоненты ПКМ и тем самым к изменению режима течения жидкой связующей через КПС ПКМ.

Трансфер связующего через КПС ПКМ, как фильтрующую перегородку, реализуется при заданных параметрах: при постоянных значениях гидравлического вакуума и скоростях импрегнирования, определяющих задаваемые значения параметров технологического процесса (рис. 2, 3).

Критериальная форма зависимостей, характеризующих процесс импрегнирования как частного случая процесса фильтрования связующего через КПС ПКМ в условиях гидравлического вакуума при изменении скорости течения, характеризуется критерием гомотронности [8]:

$$No = \frac{v_{\phi} \tau}{\sqrt{K_{II}}},$$

где τ – длительность процесса импрегнирования (заполнения КПС ПКМ), с.

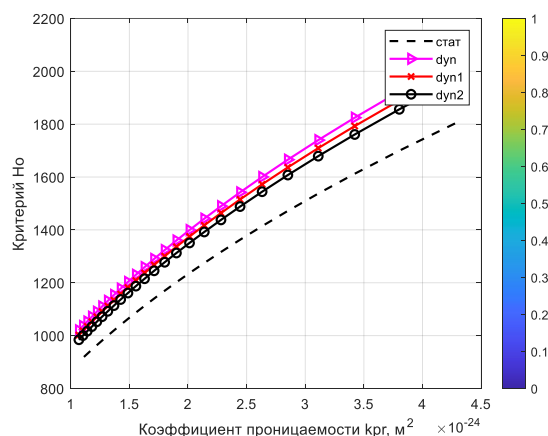


Рис. 7

Значения критерия No , характеризующие изменчивость средней скорости заполнения КПС ПКМ при заданной величине гидравлического вакуума и в условиях ста-

тического и динамического режимов нагружения системы, приведены на рис. 7 (характер изменения критерия гомохронности – Но, в зависимости от коэффициента проницаемости КПС при статическом и динамическом режимах по значениям динамической вязкости связующей ($\mu=1,5$ Па·с (ПВС марки 10/2) – для коллоидной композиции поливинилового спирта при 12%-ной концентрации матрицы).

Так как движущей силой процесса импрегнирования является перепад давлений на пористой перегородке, то очевидно, что процесс фильтрования определяется зависимостью вида [9]:

$$Eu = f(No),$$

где в модифицированном критерии Эйлера показатель средней скорости фильтрации заменен численно равным ему показателем удельной пропускной способности пористой перегородки при соответствующем перепаде давления (6).

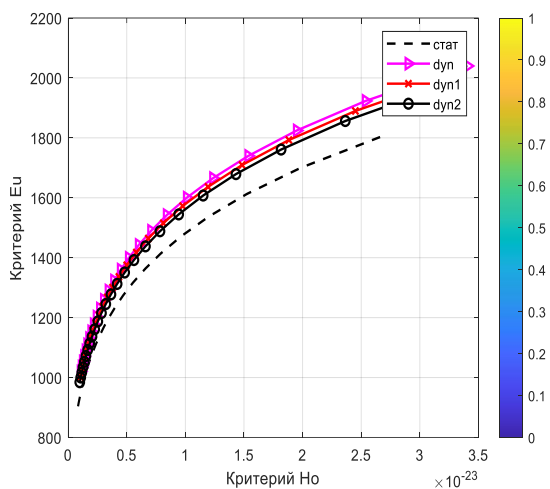


Рис. 8

Применительно к процессу импрегнирования с самоочищающейся структурой КПМ эта зависимость получена нами и представлена на рис. 8 (зависимость модифицированного критерия Эйлера в функции критерия гомохронности Но – при статическом и динамическом режимах с динамической вязкостью связующего ПВС марки 10/2 $\mu=1,5$ Па·с – для коллоидной композиции поливинилового спирта при

12%-ной концентрации матрицы).

Она позволяет установить значения кинетических параметров процесса импрегнирования, которые необходимы для его реализации по заданным структурным параметрам КПС ПКМ.

Процессы адсорбции вязкой связующей текстильным армирующим очень чувствительны к линейному размеру пор. Если размеры микропор соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул, то адсорбция протекает не послойным заполнением поверхности молекулами, а по механизму объемного заполнения [4].

Решение обратной задачи, ориентированной на синтез полимерной волокнистой пористой армирующей структуры – как фильтрующей перегородки, дает возможность определить усредненные значения диаметра капилляра и их количество на единицу площади пористой структуры.

Входными параметрами синтеза являются заданные пропускная способность КПС ПКМ, величина гидравлического вакуума системы, геометрические характеристики, физико-механические свойства фильтруемой жидкости – связующего.

Приведенные графические зависимости дают возможность синтеза КПС армирующей компоненты ПКМ с переменной плотностью пористой структуры по пути движения связующего, обеспечивающей заданные значения коэффициента проницаемости K_p в соответствии с визуализированными результатами вычислительного эксперимента, представленными на рис. 5...7.

ВЫВОДЫ

Результаты численного моделирования влияния динамического воздействия на кинетику процесса импрегнирования армирующей капиллярно-пористой структуры вязким связующим дают возможность прогнозирования задаваемых структурных параметров синтезируемого композитного материала, а также предпосылки к прототипированию технологического оборудования для реализации исследуемого процесса при оптимальных технико-экономических показателях.

Получены графические зависимости кинетических показателей импрегнирования связующего в капиллярно-пористой структуре при различных значениях генерируемых частот динамического воздействия в форме ультразвуковых колебаний для различных коллоидных композиций связующего, динамической пористости армирующей компоненты, с величинами перепада давления на единичной длине диффузии применительно к методам получения полимерного композитного материала.

Приведенные результаты компьютерного анализа результатов численного моделирования кинетики процесса импрегнирования связующего с учетом транзитного расхода при движении связующего через пористую структуру с учетом значений критерия гомохронности, характеризующего гидродинамические условия в нестационарных режимах ламинарного потока связующего, дают возможность системного подхода в решении задачи анализа технологических параметров процесса импрегнирования капиллярно-пористой структуры армирующей компоненты полимерного композитного материала вязкой связующей, а также реализовать технологию синтеза аппаратного обеспечения системы по заданным конструкционным характеристикам на основе методов компьютерного объектно-ориентированного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мизонов В.Е. Моделирование, расчет и оптимизация теплообменных процессов в текстильной промышленности. – Иваново, 2010. ISBN 978-5-9616-0350-7.
2. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Синтез ячеечной модели массообмена в процессе обезвоживания волокнистого материала распределенным давлением // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №6. С. 118...121.
3. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур. – режим доступа <https://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf/>
4. Schiavi A., Shtrepi L., Corona D. Effective scale of microstructure of fibrous permeable materials. – ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018.
5. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S.A. and Baranov A. Numerical Model of the Mass Transfer Transition States in the Vacuum Infusion Process of the Polymer Matrix and the Reinforcing

Filler Structure // XVI international scientific and practical conference "new polymeric composite materials, Микитаевские чтения, НПКСМ-2020. – РФ, Нальчик, 2020.

6. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Метод ячеечного моделирования как инструмент численного анализа массообмена при отжиге текстильного материала в валковой паре // Сб. мат. Всерос. научн.-технич. конф.: Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. С. 14...18.

7. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Использование механических колебаний как фактора интенсификации массообменных процессов в технологии обработки капиллярно-пористых структур // Сб. мат. Всерос. научн.-техн. конф.: Динамика машин и рабочих процессов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 96...98.

8. Olyak M.R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – Vol. 102, 2013. P. 185...191.

9. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена. – М.: Высшая школа, 2018.

10. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. S. Ershov, E. Kalinin. Technical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts) P.123...128.

11. Пат. №2435992 Российская Федерация, МПК F15B 21/12, B06B 1/18. Устройство для создания импульсного режима нагружения исполнительных органов технологических машин. 19.04.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. №34.

REFERENCES

1. Mizonov V.E. Modeling, calculation and optimization of heat and mass transfer processes in the textile industry. – Ivanovo, 2010. ISBN 978-5-9616-0350-7.
2. Ershov S.V., Kalinin E.N. Synthesis of a cell model of mass transfer in the process of dehydration of a fibrous material by distributed pressure. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2011, No. 6. pp. 118...121.
3. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Methods for studying porous structures. – access mode <https://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf/>
4. Schiavi A., Shtrepi L., Corona D. Effective scale of microstructure of fibrous permeable materials. – ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018.
5. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S.A. and Baranov A. Numerical Model of the Mass Transfer Transition States in the Vacuum Infusion Process of the Polymer Matrix and the Reinforcing Filler Structure // XVI international scientific and practical conference "new polymeric composite materials, Mikitaev Readings, NPKM-2020. – RF, Nalchik, 2020.

6. Ershov S.V., Kalinin E.N. The method of cell modeling as a tool for numerical analysis of mass transfer during the extraction of textile material in a roll pair // Sat. mat. Vseros. scientific and technical Conf.: Modern trends in the development of information technology in textile science and practice. - Dimitrovgrad: DITI NRNU MEPhI, 2012. S. 14 ... 18.

7. Ershov S.V., Kalinin E.N. The use of mechanical vibrations as a factor in the intensification of mass transfer processes in the technology of processing capillary-porous structures // Sat. mat. Vseros. scientific-technical Conf.: Dynamics of machines and working processes.- Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2012. P. 96...98.

8. Olyak M.R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – Vol. 102, 2013. P. 185...191.

9. Gukhman A.A. Application of the theory of similarity to the study of heat and mass transfer processes. – M.: Higher school, 2018.

10. Cell modeling of mass transfer in a dewatering process of fiber by distributed pressure. S. Ershov, E. Kalinin. Technical Transactions 5/2017 Mechanics year. 2017 (114), Cracow University of technology, (Chemical Abstracts) P.123...128.

11. Pat. No. 2435992 Russian Federation, IPC F15B 21/12, B06B 1/18. A device for creating a pulsed loading mode for the executive bodies of technological machines. 04/19/2010; publ. 10.12.2011, Bull. No. 34.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 07.12.21.

УДК 539.3

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_204

ОСОБЕННОСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НАМОТКИ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ "НИТЯНОЙ МОДЕЛИ"

PECULIARITIES OF COMPOSITE TUBES STRUCTURE DESIGN ON THE BASIS OF "THREAD MODEL"

А.Н. ПОЛИЛОВ, О.Ю. СКЛЕМИНА

A.N. POLILOV, O.YU. SKLEMINA

(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук)

(Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Science)

E-mail: polilovan@mail.ru; sklemina97@yandex.ru

На примере намоточной трубы, материал которой находится в плоском напряженном состоянии, рассмотрена простейшая нитяная модель волокнистого композита, согласно которой все приложенные усилия воспринимаются только равнонапряженными волокнами. Эта модель позволяет определить схемы рационального армирования (углы намотки и толщины слоев), обеспечивающие минимальную массу трубы при удовлетворении условий прочности при заданных внутреннем давлении, осевой силе и крутящем моменте.

Формально, уравнения нитяной модели позволяют выбирать любые углы армирования, но в некоторых случаях определяемые "рациональные" толщины слоев оказываются отрицательными, что выглядит некоторым парадоксом, обсуждаемым в данной статье. Конкретные примеры метода совершенствования структуры армирования на основе нитяной модели приведены для композитных баллонов для сжатого газа.

For the case of wound composite tube with wall at plane stress state the simplest thread model of fiber-reinforced-plastic is considered, and according to this model all applied forces acted on equal-stressed fibers only. This model makes it possible to design optimal structure of reinforcement (angles of wound and thickness of layers) corresponding to minimum mass of tube for satisfaction the strength conditions at a given internal pressure, longitudinal load and torsion moment.

The equations of thread model make it possible to choose any angles of reinforcement, but in some cases the founded "optimum" thicknesses became negative, being a kind of paradox, the latter is discussed in the article. Some examples of reinforcement structure improvement method on the basis of thread model are shown for composite gas tanks.

Ключевые слова: композитная труба, нитяная модель, намотка, напряженное состояние, кручение, толщина слоя, равнонапряженные волокна, нормальные напряжения, касательные напряжения.

Keywords: composite tube, thread model, winding, stress state, torsion, layer thickness, uniformly stressed fibers, normal stresses, shear stresses.

Введение

Трубы и сосуды давления занимают широкую область эффективного применения полимерных волокнистых композитов, и расчетам намоточных труб и баллонов для газового топлива посвящена обширная литература [1...5].

С точки зрения инженерной механики представляет интерес возможность оптимизировать структуру армирования с учетом сложного напряженного состояния, возникающего в стенке композитной трубы или баллона.

Баллоны для газового топлива справедливо считаются потенциально опасными объектами, поэтому большое внимание уделяется методам их проектирования [6], [7] и критериям прочности [8...10] намоточных композитов.

Цель настоящей статьи состоит в обосновании инженерного метода проектирования структуры армирования композитных труб и сосудов давления.

1. Нитяная модель при плоском напряженном состоянии

В качестве примера будем рассматривать композитную трубу, намотанную однонаправленной волокнистой лентой под разными углами α к продольной оси (рис. 1). Если в намотанной под углом α однонаправленной ленте возникают напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ (локальная ось 1 выбрана

вдоль волокон, а ось 2 – поперек), то их проекции в осях, связанных с трубой, представляются в следующем виде [1], [6]:

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} = \sigma_z &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha + \tau_{12} \sin 2\alpha, \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha - \tau_{12} \sin 2\alpha, \\ \sigma_{z\theta} = \tau_{z\theta} &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha + \tau_{12} \cos 2\alpha.\end{aligned}\quad (1)$$

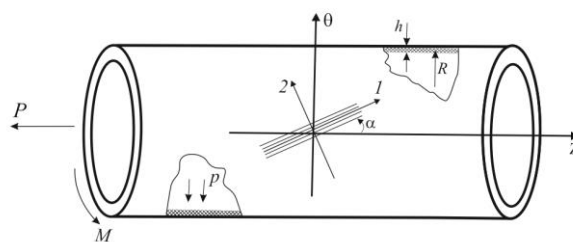


Рис. 1

В нитяной модели считается, что всю нагрузку несут только равнонапряженные волокна, и в них в предельном состоянии достигаются критические напряжения $\sigma_1^* = \sigma_0$. Средние напряжения $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_z, \bar{\tau}_{\theta z}$ в трубе получаются суммированием напряжений в m слоях с разной ориентацией α_i ($i=1, \dots, m$), с учетом толщин h_i этих слоев. В силу гипотезы о тонкостенности трубы распределение напряжений в ее стенке можно

считать однородным. В этом случае уравнения (1) принимают вид:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_\theta &= \sigma_0 \sum_{i=1}^m (h_i \sin^2 \alpha_i), \\ \bar{\sigma}_z &= \sigma_0 \sum_{i=1}^m (h_i \cos^2 \alpha_i), \\ \bar{\tau}_{\theta z} &= \sigma_0 \sum_{i=1}^m (h_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i).\end{aligned}\quad (2)$$

При действии внутреннего давления p , продольной силы P и крутящего момента M средние напряжения можно выразить через средний радиус трубы R простейшими формулами:

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{pR}{h}; \quad \bar{\sigma}_z \approx \frac{P}{2\pi Rh}; \quad \bar{\tau}_{\theta z} \approx \frac{M}{2\pi R^2 h}.\quad (3)$$

В предельном состоянии напряжение вдоль волокон в слоях достигает предела прочности σ_0 , что соответствует из (2), (3) выполнению трех условий:

$$\begin{aligned}1. \quad & A = h_1 + h_2 \sin^2 \alpha_2, \\ 2. \quad & B = h_2 \cos^2 \alpha_2 \Leftrightarrow 1. + 2. \Rightarrow A + B = h_1 + h_2 = h, \\ 3. \quad & C = h_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \Leftrightarrow \frac{3.}{2.} \Rightarrow \frac{C}{B} = \frac{M^*}{P^* R} = \operatorname{tg} \alpha_2 = t, \\ \text{из } 2. \Rightarrow & h_2 = B(1 + t^2) = \frac{B^2 + C^2}{B} = \frac{[P^{*2} + (M^*/R)^2]}{2\pi P^* R \sigma_0},\end{aligned}\quad (5)$$

$$\text{из } 1. \Rightarrow h_1 = A - h_2 \frac{t^2}{1+t^2} = A - \frac{C^2}{B} = \frac{1}{\sigma_0} \left(p^* R - \frac{M^{*2}}{2\pi P^* R^3} \right) \Rightarrow$$

$$h = h_1 + h_2 = A + B.$$

Численный пример:

$$R = 200 \text{ мм}; \quad P^* = 1000 \text{ кН}; \quad p^* = 100 \text{ атм} = 10 \text{ МПа},$$

$$M^* = 100 \text{ кН} \times \text{м}; \quad \sigma_0 = 1000 \text{ МПа},$$

$$A = \frac{p^* R}{\sigma_0} = 2 \text{ мм}; \quad B = \frac{P^*}{2\pi R \sigma_0} \approx 0.8 \text{ мм}; \quad C = \frac{M^*}{2\pi R^2 \sigma_0} \approx 0.4 \text{ мм};\quad (6)$$

$$t = 0.5; \quad \alpha_2 = 0.464 \approx 27^\circ; \quad h_1 = 1.8 \text{ мм}; \quad h_2 = 1 \text{ мм}; \quad h = 2.8 \text{ мм}.$$

$$\begin{aligned}A &= \frac{p^* R}{\sigma_0} = \sum_{i=1}^m (h_i \sin^2 \alpha_i), \\ B &= \frac{P^*}{2\pi R \sigma_0} = \sum_{i=1}^m (h_i \cos^2 \alpha_i), \\ C &= \frac{M^*}{2\pi R^2 \sigma_0} = \sum_{i=1}^m (h_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i).\end{aligned}\quad (4)$$

Из (4) для заданных соотношений между нагрузками можно определить отношения толщин слоев, намотанных под разными углами. Остановимся на двух слоях – это 4 параметра: 2 угла и две толщины. Зная три приложенных усилия, можно из трех уравнений (4) найти три параметра из четырех, задавшись одним из них.

2. *Нахождение рациональных углов намотки и толщин слоев при комбинированной нагрузке. Примеры расчета*

2.1. Если наиболее опасно окружное напряжение, создаваемое внутренним давлением, то выбираем один угол $\alpha_1 = 90^\circ$, а другой угол α_2 и две толщины h_1, h_2 находим из уравнений (4):

2.2. Если считается, что наиболее опасна осевая сила, можно выбрать один угол, равным нулю: $\alpha_1=0$, а другой угол α_2 и

две толщины h_1, h_2 найдутся из уравнений (4), как и в (5), с использованием исходных данных (6):

$$\begin{aligned}
 1. & A = h_2 \sin^2 \alpha_2; \\
 2. & B = h_1 + h_2 \cos^2 \alpha_2 \Leftrightarrow 1. + 2. \Rightarrow A + B = h_1 + h_2 = h; \\
 3. & C = h_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \Leftrightarrow \frac{1.}{3.} \Rightarrow \frac{A}{C} = \operatorname{tg} \alpha_2 = t = 5 \Rightarrow \alpha_2 = 1.37 \approx 79^\circ. \\
 \text{из } 1. & \Rightarrow h_2 = A(1 + t^2) / t^2 = 2.08 \text{ мм}; \\
 \text{из } 2. & \Rightarrow h_1 = B - h_2 \frac{1}{1 + t^2} = 0.72 \text{ мм} \\
 h & = h_1 + h_2 = A + B = 2.8 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

2.3. Возьмем три семейства волокон: для сопротивления окружным напряжениям – под углом $\alpha_1 = 90^\circ$, осевым напряжениям $\alpha_2 = 0$, касательным – $\alpha_3 = 45^\circ$. Три уравнения (4) равновесия по нитяной

модели позволяют предельно просто определить три необходимые толщины h_1, h_2, h_3 (табл. 1 – результаты оценок толщин слоев и углов намотки по нитяной модели для данных (6)):

$$\begin{aligned}
 1. & h_1 + \frac{1}{2} h_3 = A; \quad 2. h_2 + \frac{1}{2} h_3 = B; \quad 3. \frac{1}{2} h_3 = C \Rightarrow \\
 h_3 & = 2C; \quad h_2 = B - C; \quad h_1 = A - C \Rightarrow h_1 + h_2 + h_3 = A + B (!)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Важно отметить, что наличие кручение требует для создания рационального проекта приложения нормальных напряжений. В частности, можно создать сложное

напряженное состояние из трех компонент напряжений $A=B=C$, при котором для реализации нитяной модели будет достаточно одного угла симметричной намотки $\pm 45^\circ$.

Т а б л и ц а 1

$\pm\alpha_1^\circ$	$\pm\alpha_2^\circ$	$\pm\alpha_3^\circ$	$h_1, \text{ мм}$	$h_2, \text{ мм}$	$h_3, \text{ мм}$
90	27	-	1,8	1,0	-
0	79	-	0,72	2,08	-
90	0	45	1,6	0,4	0,8
90	0	60	1,31	0,57	0,92
90	0	30	1,76	0,12	0,92

2.4. Подобный 2.3 расчет легко проделать и для произвольного дополнительного

угла: $\alpha_3 = \alpha$ ($\alpha_1 = 90^\circ; \alpha_2 = 0$).

$$\begin{aligned}
 1. & h_1 + h_3 \sin^2 \alpha = A; \quad 2. h_2 + h_3 \cos^2 \alpha = B; \quad 3. h_3 \sin \alpha \cos \alpha = C \Rightarrow \\
 h_3 & = \frac{C}{\sin \alpha \cos \alpha}; \quad h_2 = B - C \operatorname{ctg} \alpha; \quad h_1 = A - C \operatorname{tg} \alpha; \\
 h_1 + h_2 + h_3 & = A + B - C(\operatorname{tg} + \operatorname{ctg} - \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha}) = A + B !!
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.5. Для любых трех углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ укладки волокон, удобных для расчетов или выбранных из технологических соображений, нитяная модель сводится к реше-

нию системы из трех линейных уравнений (4) с тремя неизвестными толщинами слоев h_1, h_2, h_3 :

$$\begin{aligned} 1. a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3 &= A \leftrightarrow a_i = \sin^2 \alpha_i; \\ 2. b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3 &= B \leftrightarrow b_i = \cos^2 \alpha_i = 1 - a_i; \\ 3. c_1 h_1 + c_2 h_2 + c_3 h_3 &= C \leftrightarrow c_i = \sin \alpha_i \cos \alpha_i = \sqrt{a_i b_i}; \\ 1. + 2. &\Rightarrow h_1 + h_2 + h_3 = A + B \quad (!) \end{aligned}$$

Общее решение

$$\begin{aligned} \Delta &= a_1 (b_2 c_3 - b_3 c_2) - a_2 (b_1 c_3 - b_3 c_1) + a_3 (b_1 c_2 - b_2 c_1); \\ h_1 \Delta &= A (b_2 c_3 - b_3 c_2) - a_2 (B c_3 - b_3 C) + a_3 (B c_2 - b_2 C); \\ h_2 \Delta &= a_1 (B c_3 - b_3 C) - A (b_1 c_3 - b_3 c_1) + a_3 (b_1 C - B c_1); \\ h_3 \Delta &= a_1 (b_2 C - B c_2) - a_2 (b_1 C - B c_1) + A (b_1 c_2 - b_2 c_1). \end{aligned}$$

С учетом $b_i = 1 - a_i$

$$\begin{aligned} \Delta &= c_1 (a_2 - a_3) - c_2 (a_1 - a_3) + c_3 (a_1 - a_2); \\ h_1 \Delta &= A [(1 - a_2) c_3 - (1 - a_3) c_2] - a_2 [B c_3 - C] + a_3 [B c_2 - C]; \\ h_2 \Delta &= a_1 [B c_3 - C] - A [(1 - a_1) c_3 - (1 - a_3) c_1] + a_3 [C - B c_1]; \\ h_3 \Delta &= a_1 [C - B c_2] - a_2 [C - B c_1] + A [(1 - a_1) c_2 - (1 - a_2) c_1]; \\ (h_1 + h_2 + h_3) \Delta &= A [c_1 (a_2 - a_3) + c_2 (a_3 - a_1) + c_3 (a_1 - a_2)] + \\ &+ B [c_1 (a_2 - a_3) + c_2 (a_3 - a_1) + c_3 (a_1 - a_2)] = (A + B) \times \Delta; \\ h_1 + h_2 + h_3 &= A + B \quad !! \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, из решения системы трех уравнений доказано, что для произвольных трех углов сумма толщин трех слоев с различной ориентацией равнонапряженных волокон всегда одинакова и зависит только от приложенных осевых и окружных напряжений и от прочности вдоль волокон.

Обратим внимание, что формулы (9) содержат комбинации параметров с номерами 1, 2, 3, и знак + соответствует четным расстановкам (1-2-3, 3-1-2, 2-3-1), а знак минус – нечетным (1-3-2, 3-2-1, 2-1-3), например, $+a_1 b_2 c_3; -a_1 b_3 c_2; -a_2 b_1 c_3$.

Из рассмотренных примеров 2.1 – 2.5 видно, что вес любой рационально намотанной трубы зависит только от приложенных нормальных напряжений, а добавление касательных напряжений меняет лишь со-

отношения между толщинами разных слоев.

Но! Подобная рациональная намотка возможна при определенных ограничениях на приложенные нагрузки.

3. Ограничения на углы и толщины при заданных внешних нагрузках

Как видно из примера 2.3, когда один из углов составляет 45° , требования к нагрузкам, для которых возможен рациональный проект, имеют вид:

$$h_2 = B - C \geq 0 \Rightarrow 1) B \geq C; h_1 \geq 0 \Rightarrow 2) A \geq C. \quad (10)$$

При нарушении этих условий оптимальный, равнонапряженный проект невозможен.

Если для сопротивления кручению один угол принят $\alpha_1 = 45^\circ$, то из (4) получаем три уравнения для нахождения второго угла α_2 и двух толщин h_1, h_2 :

$$1. A = \frac{1}{2}h_1 + h_2 \sin^2 \alpha_2; \quad 2. B = \frac{1}{2}h_1 + h_2 \cos^2 \alpha_2; \quad 3. C = \frac{1}{2}h_1 + h_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \Rightarrow$$

$$2. - 1. \Rightarrow h_2 = (B - A) \frac{1+t^2}{1-t^2}; \quad 2. - 3. \Rightarrow h_2 = (B - C) \frac{1+t^2}{1-t} \Rightarrow$$

$$\frac{B - A}{B - C} = 1 + t \Rightarrow t = \frac{C - A}{B - C} < 0??! \text{ для данных (6).}$$

Наличие слоя с углом 45° делает возможным создать оптимальную намотку только при значительных касательных напряжениях, когда требуемая по условию кручения (условие 3) толщина C больше одной из требуемых по нормальным напряжениям толщин B или A (либо $A < C$, либо $B < C$). Если одновременно $A > C$ и $B > C$, то получается противоречие: из $A - C > 0 \Rightarrow \alpha < \pi/4$, и одновременно из $B - C > 0 \Rightarrow \alpha > \pi/4$.

ВЫВОДЫ

1. Применение нитяной модели – простейший способ предварительного подбора рациональной структуры армирования, после которого необходимо применять уточненные критерии прочности для оценки несущей способности.

2. Все рациональные проекты с равнонапряженными волокнами обеспечивают одинаковую, минимально возможную массу композитной трубы для заданных окружного и осевого напряжений. Добавление кручения изменяет лишь отношения толщин слоев с продольной, окружной и наклонной намоткой, но есть ограничения на допустимые значения касательных и нормальных напряжений, чтобы можно было реализовать рациональную систему намотки при выбранной схеме армирования.

3. Сформулированы ограничения на возможные углы армирования, в рамках которых возможно построить рациональный проект композитной трубы при заданных внешних нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А.* Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1977.
2. *Huang Ch., Ren M., Li T., Chang X., Lei Y.* Trans-scale modeling framework for failure analysis of cryogenic composite tanks// Composites Part B: Engineering. – Vol. 85, 2016. P. 41..49. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.023>.
3. *Grogan D. M., Ó Brádaigh C. M., McGarry J. P., Leen S. B.* Damage and permeability in tape-laid thermoplastic composite cryogenic tanks// Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – Vol. 78, 2015. P. 390..402. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.037>.
4. *Соломонов Ю.С., Георгиевский В.П., Недбай А.Я., Андрюшин В.А.* Методы расчета цилиндрических оболочек из композиционных материалов. – М.: Физматлит, 2009.
5. *Бакулин В.Н.* Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций. Том 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. – М.: физматлит, 2008.
6. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов В.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. Серия "Библиотека расчетчика". – М.: Машиностроение, 1984.
7. *Sklemina O. Yu., Polilov A.N., Tatus N.A.* Analytical and finite element method of calculation of multi-shell gas tanks. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 747 012131. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012131>.
8. *Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А.* Сопrotивление жестких полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1967.
9. *Бажанов В.Л., Гольденблат И.И., Копнов В.А., Поспелов А.Д., Синюков А.М.* Сопrotивление стеклопластиков. – М.: Химия, 1968.
10. *Tsai S.W., Wu E.M.* A general theory of strength for anisotropic materials// Journal of Composite Materials. – Vol. 2, № 1, 1971. P. 191...206. <https://doi.org/10.1177/002199837100500106>.

REFERENCES

1. Obratsov I.F., Vasiliev V.V., Bunakov V.A. Optimal reinforcement of shells of revolution made of composite materials. - M.: Mashinostroenie, 1977.
2. Huang Ch., Ren M., Li T., Chang X., Lei Y. Trans-scale modeling framework for failure analysis of cryogenic composite tanks// Composites Part B: Engineering. – Vol. 85, 2016. P. 41...49. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.023>.
3. Grogan D. M., Ó Brádaigh C. M., McGarry J. P., Leen S. B. Damage and permeability in tape-laid thermoplastic composite cryogenic tanks// Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – Vol. 78, 2015. P. 390...402. <https://doi.org/10.1016/j.composites.2015.08.037>.
4. Solomonov Yu.S., Georgievsky V.P., Nedbay A.Ya., Andryushin V.A. Methods for calculating cylindrical shells from composite materials. – M.: Fizmatlit, 2009.
5. Bakulin V.N. Methods of optimal design and calculation of composite structures. Volume 1. Optimal design of structures from composite and traditional materials. – M.: fizmatlit, 2008.
6. Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov V.G. Calculation of multilayer plates and shells from composite materials. Series "Calculator Library". - M.: Mashinostroenie, 1984.
7. Sklemina O.Yu., Polilov A.N., Tatus N.A. Analytical and finite element method of calculation of multishell gas tanks. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. sci. Eng. 747 012131. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012131>.
8. Malmeister A.K., Tamuzh V.P., Teters G.A. Resistance of rigid polymeric materials. – Riga: Zinatne, 1967.
9. Bazhanov V.L., Goldenblat I.I., Kopnov V.A., Pospelov A.D., Sinyukov A.M. Fiberglass resistance. – M.: Chemistry, 1968.
10. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials// Journal of Composite Materials. – Vol. 2, No. 1, 1971. P. 191...206. <https://doi.org/10.1177/002199837100500106>.

Рекомендована ученым советом. Поступила 08.10.21.

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_210

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВЯЗКОУПРУГОСТИ*

MATHEMATICAL MODELING OF POLYMER TEXTILE MATERIALS DEFORMATION PROPERTIES FROM THE STANDPOINT OF VISCOUS ELASTICITY SPECTRAL ANALYSIS

А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.М. ЛИТВИНОВ

A.V. DEMIDOV, A.G. MAKAROV, N.V. PEREBOROVA, A.M. LITVINOV

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: rector@sutd.ru; makvin@yandex.ru; nina1332@yandex.ru; litalmih@yandex.ru

Рассматриваются вопросы математического моделирования деформационных свойств полимерных текстильных материалов с позиции спектрально анализа вязкоупругости. Дается спектральная интерпретация развиваемых методов анализа и прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости нитей аморфно-кристаллического строения в зоне неразрушающих механических воздействий.

* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

The issues of mathematical modeling of polymeric textile materials deformation properties from the standpoint of viscoelasticity spectral analysis are considered. A spectral interpretation of the developed methods of analysis and prediction of the nonlinear-hereditary viscoelasticity of amorphous-crystalline filaments in the zone of non-destructive mechanical effects is given.

Ключевые слова: математическое моделирование, полимерные текстильные материалы, деформационные процессы, релаксация, ползучесть, спектр релаксации.

Keywords: mathematical modeling, polymer textile materials, deformation processes, relaxation, creep, relaxation spectrum.

Введение

Актуальность темы обусловлена сложностью физически обоснованного как анализа физико-механических свойств полимерных текстильных материалов аморфно-кристаллического строения, так и прогнозирования их деформированных состояний в зоне неразрушающих механических воздействий. Вязкоупругость полимерных текстильных материалов считается обусловленной чередованием упорядоченных и неупорядоченных областей расположения цепочечных макромолекул [1].

Обобщение классических представлений теории линейно-наследственной вязкоупругости на свойства полимерных текстильных материалов в рамках представлений об активирующем характере механических воздействий позволило разработать ряд методик определения параметров уравнений нелинейно-наследственной вязкоупругости и расчетного прогнозирования процессов деформирования или нагружения [2].

Методы

Был предложен рекуррентный метод расчета нелинейно-наследственных спектров релаксации или запаздывания по задаваемым ядрам интегральных уравнений нелинейно-наследственного типа. В настоящей статье дается более обоснованная спектральная интерпретация развиваемого метода анализа и прогнозирования процессов деформирования синтетических нитей в зоне неразрушающих механических воздействий [3].

Деформационный или геометрический вариант моделирования нелинейно-наслед-

ственной вязкоупругости наглядно иллюстрируется обобщенной моделью Максвелла, представленной на рис. 1 (деформационный (геометрический) вариант моделирования: $\tilde{\tau}_{ie}$ – время релаксации i -го элемента модели; N_i – количество таких элементов; n – количество значений времен релаксации $\tilde{\tau}_{ie}$; σ – полное напряжение) [4].

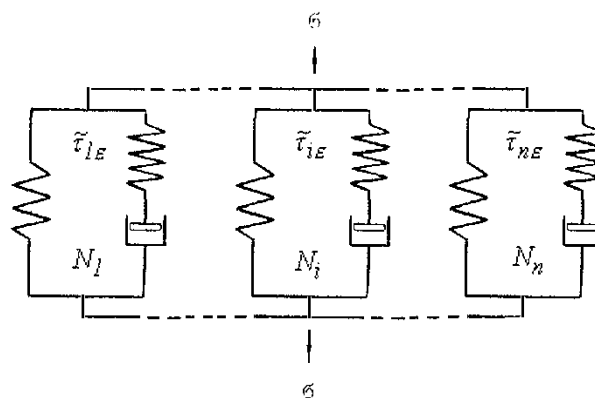


Рис. 1

Обозначим количество всех элементов модели:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (1)$$

E_0 – модуль упругости всей модели; E_∞ – модуль вязкоупругости всей модели; $E_0 N^{-1}$ – модуль упругости каждого элемента; $E_\infty N^{-1}$ – модуль вязкоупругости каждого элемента, то есть модуль каждой левой пружины элемента; время релаксации каждого из N_i элементов:

$$\tilde{\tau}_{ie} = \Delta\eta_{ie} N(E_o - E_\infty)^{-1}, \quad (2)$$

где $\Delta\eta_{ie}$ – коэффициент вязкости каждого из N_i i -х элементов; $\Delta\eta_{ie}$ зависит от деформации ε одинаково у всех элементов.

Условие совместности деформаций всех элементов $\varepsilon_i = \varepsilon$, а условие равновесия каждого из N_i i -х элементов представляет собой дифференциальное уравнение:

$$N(\tilde{\tau}_{ie}\Delta\dot{\sigma}_i + \Delta\sigma_i) = E_o(\tilde{\tau}_{ie}\dot{\varepsilon} + c\varepsilon), \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_i$ – напряжение i -го элемента; $c = E_\infty \cdot E_o^{-1}$ – коэффициент полноты упругости модели. В режиме простой релаксации – когда $\varepsilon = \text{const}$ – из (3) получается релаксирующий модуль i -го элемента:

$$\frac{\Delta\sigma_{ie}}{\varepsilon} = \Delta E_{iet} = N^{-1}E_o \left(c + (1-c)\exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_{ie}}\right) \right), \quad (4)$$

где t – внешнее время, отсчитываемое от

где в соответствии с (7):

$$\sum_{i=1}^n E_{iet} = E_{et} = cE_o + E_o(1-c) \sum_{i=1}^n N_i N^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_{ie}}\right) \quad (9)$$

– модуль релаксации всей модели [6].

При $n \rightarrow \infty$ суммирование элементов дискретной модели (9) заменяется интегри-

$$E_{et} = E_\infty + (E_o - E_\infty) \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{N}_\varepsilon \exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_\varepsilon}\right) d \ln \tilde{\tau}_\varepsilon, \quad (10)$$

при соблюдении условия:

$$\sum_{i=1}^n N_i N^{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{N}_\varepsilon d \ln \tilde{\tau}_\varepsilon, \quad (11)$$

где $N_i N^{-1}$ – нормированная дискретная функция распределения количества релаксирующих частиц N по их временам релаксации $\tilde{\tau}_{ie}$; спектр релаксации \bar{N}_ε – это функция распределения бесконечно большого числа частиц по значениям их времен релаксации $\tilde{\tau}_\varepsilon$ [7].

момента квазимгновенного приложения деформации " ε ".

Решение дифференциального уравнения (3) с учетом (4) [5]

$$\Delta\sigma_i = N^{-1}E_o\varepsilon_t + \int_0^t \varepsilon_{t-s} \frac{\partial \Delta E_{ies}}{\partial s} ds. \quad (5)$$

Сложение только i -х элементов дает напряжение

$$N_i \Delta\sigma_i = \sigma_i = N_i N^{-1} E_o \varepsilon_t + N_i \int_0^t \varepsilon_{t-s} \Delta E'_{ies} ds, \quad (6)$$

где $\Delta E'_{ies} = \frac{\partial \Delta E_{ies}}{\partial s}$;

$$N_i \Delta E_{iet} = E_{iet} \quad (7)$$

– модуль релаксации сложенных N_i элементов, имеющих одно и тоже время релаксации $\tilde{\tau}_{ie}$.

Сложение всех элементов модели дает полное напряжение всей модели с учетом (5)

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i = \sigma_t = E_o \varepsilon_t + \int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{es} ds, \quad (8)$$

рованием некоторой непрерывной функции распределения моделируемых частиц по их временам релаксации:

Принципиальное отличие рассмотренного спектра \bar{N}_ε от классического спектра состоит в том, что логарифмическая шкала времени релаксации определенным образом – а именно через среднестатистическое значение τ_ε – зависит от деформации ε как от параметра [8]. Поэтому рассмотренный вариант моделирования назван геометрическим или деформационным.

Уравнение состояния модели (8) пригодно как для своего дискретного ядра (9),

так и для непрерывного ядра (10) и вследствие этого считается каноническим. Нелинейность моделируемых вязкоупругих свойств, в отличие от классической линейности [9], накладывает определенные ограничения на производимые математические процедуры.

Так, при переходе от уравнения (3) к уравнению (5) с помощью лапласовых преобразований операционного исчисления и свойств интегральных сверток, можно дифференцировать функцию (4) и нельзя дифференцировать деформацию вследствие ее двойной роли в уравнениях (3) и (5) [10], где ее следует рассматривать как параметр.

Для простого режима ползучести $\varepsilon_{\sigma t}$, когда $\sigma = \text{const}$, из уравнения (8) получается возможность определения функции податливости $D_{\sigma t}$ по модулю релаксации (9) или (10) данной модели (рис. 1) в символической записи [11]:

$$\frac{\varepsilon_{\sigma t}}{\sigma} = D_{\sigma t} \overset{\text{L}}{=} p^{-2} \{E_{\sigma t}\}^{-1} = \{t\} \{E_{\sigma t}\}^{-1}, \quad (12)$$

где $\{E_{\sigma t}\}$ – лапласово изображение оригинала $E_{\sigma t}$; $\overset{\text{L}}{=}$ – символ преобразования Лапласа. С учетом (12) интегральное уравнение (8) решается относительно деформации как функции времени:

$$\varepsilon_t = E_0^{-1} \sigma_t + \int_0^t \sigma_{t-s} D'_{\sigma s} ds. \quad (13)$$

Однако воспользоваться каноническим уравнением (13), полученным для той же самой модели (рис. 1), весьма трудно из-за того, что, в соответствии с (12), ядро уравнения (13) содержит время релаксации, которое в неявном виде зависит от неизвестной величины деформации ε_t как от параметра.

Для материалов указанного типа вполне удовлетворительным является следующее решение интегрального уравнения (10) [12]:

$$\bar{N}_{\varepsilon} \cong (E_0 - E_{\infty})^{-1} \left. \frac{\partial E_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t=\bar{t}_{\varepsilon}}, \quad (14)$$

показывающее, что производная модуля релаксации по логарифмической шкале времени по своей сути, так же как и спектр релаксации, отражает распределение частиц материала по их временам релаксации. В связи с этим каноническое уравнение (8) рекомендуется использовать в виде [13]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t + \int_{-\infty}^{\ln t} \varepsilon_{t-s} \frac{\partial E_{\sigma s}}{\partial \ln s} d \ln s, \quad (15)$$

и тогда физический смысл ядра уравнения (15) становится более ясным, по сравнению с ядром уравнения (8).

Рассмотренный спектральный смысл канонического уравнения нелинейно-наследственного типа (15) или (8) сохраняет свою силу при любом выборе аппроксимирующей функции для модуля релаксации как функции времени, зависящей от деформации как от параметра. Поэтому сформулированная спектральная интерпретация данного варианта нелинейно-наследственной вязкоупругости может считаться универсальной [14].

Силовому варианту теории нелинейно-наследственной вязкоупругости соответствует обобщенная модель Кельвина-Фойхта-Мейера, представленная на рис. 2 (силовой вариант моделирования: $\bar{t}_{i\sigma}$ – время запаздывания i -го элемента модели; N_i – количество таких элементов; n – количество значений времен запаздывания $\bar{t}_{i\sigma}$; σ – напряжение).

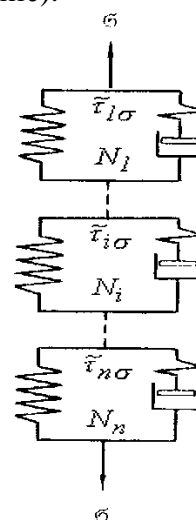


Рис. 2

По аналогии с предыдущей моделью (рис. 1), формула (1), а также характеристики c , E_0 и E_∞ сохраняются. Модулем упругости каждого элемента модели (рис. 2) становится NE_0 , а модулем вязкоупругости каждого элемента, то есть его левой пружины, становится NE_∞ .

Временем запаздывания каждого из N_i i -х элементов становится:

$$\tilde{\tau}_{i\sigma} = c^{-1} \Delta\eta_{i\sigma} N^{-1} (E_0 - E_\infty)^{-1}, \quad (16)$$

где $\Delta\eta_{i\sigma}$ – коэффициент вязкости в каждом из N_i i -х элементов. $\Delta\eta_{i\sigma}$ зависит от напряжения одинаково у всех элементов. Условие совместности деформации всех элементов:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{i\sigma}}{\sigma} = \Delta D_{i\sigma} = N^{-1} E_0^{-1} c^{-1} \left(1 - (1-c) \exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_{i\sigma}}\right) \right), \quad (20)$$

где $N^{-1} E_0^{-1} = \Delta D_0$ – упругая податливость одного элемента модели; $N^{-1} E_\infty^{-1} = \Delta D_\infty$ – вязкоупругая податливость одного элемента [16].

По аналогии с (5) получается решение дифференциального уравнения (18) с учетом (20), то есть уравнение состояния одного из N_i i -х элементов:

$$\frac{\varepsilon_{i\sigma}}{\sigma} = D_{\sigma t} = E_\infty^{-1} - E_\infty^{-1} (1-c) \sum_{i=1}^n N_i N^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_{i\sigma}}\right) \quad (23)$$

– податливость всей модели, причем $\Delta D_{i\sigma} N_i = D_{i\sigma}$ – податливость суммы i -х элементов, а $\sum_{i=1}^n D_{i\sigma} = D_{\sigma t}$. Как видно из (23),

теперь уже сложностей расчета по (13) нет.

По аналогии с (10), при $n \rightarrow \infty$ вместо (23) получим:

$$D_{\sigma t} = E_\infty^{-1} - E_\infty^{-1} (1-c) \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{Q}_\sigma \exp\left(-\frac{t}{\tilde{\tau}_\sigma}\right) d \ln \tilde{\tau}_\sigma \quad (24)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^n N_i \Delta\varepsilon_i = \varepsilon_t, \quad (17)$$

где ε_t – полная деформация всей модели [15].

По аналогии с (3) уравнение равновесия для каждого из N_i i -х элементов модели при условии $c \neq 0$

$$NE_0 (\tilde{\tau}_{i\sigma} \Delta\dot{\varepsilon}_i + \Delta\varepsilon_i) = \tilde{\tau}_{i\sigma} \dot{\sigma} + c^{-1} \sigma, \quad (18)$$

причем

$$\Delta\varepsilon_i N_i = \varepsilon_i \quad (19)$$

– деформация элементов с одинаковым временем запаздывания $\tilde{\tau}_{i\sigma}$.

В режиме простой ползучести, когда $\sigma = \text{const}$, из (18) получается податливость элемента по аналогии с (4):

$$\Delta\varepsilon_i = N^{-1} E_0^{-1} \sigma_t + \int_0^t \sigma_{t-s} \Delta D'_{i\sigma s} ds, \quad (21)$$

а сложение всех элементов модели:

$$\sum_{i=1}^n N_i \Delta\varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \varepsilon_t \quad (22)$$

приводит к уравнению состояния всей модели (13), где

$$\sum_{i=1}^n N_i N^{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{Q}_\sigma d \ln \tilde{\tau}_\sigma = 1, \quad (25)$$

где, по аналогии с (11), слева дискретное распределение N частиц по их временам запаздывания, а справа интегрируется спектр запаздывания, то есть распределение бесконечно большого числа частиц по логарифмической шкале времени запаздывания $\tilde{\tau}_\sigma$, зависящего от напряжения как от параметра, так же, как зависит от напряжения их среднестатистическое значение τ_σ [17].

Именно в связи с такой зависимостью вариант моделирования (рис. 2) назван силовым. По аналогии с (8), уравнение состояния (22) пригодно как для дискретного ядра (23), так и для непрерывного ядра (24), и поэтому называется каноническим [18].

Специфика нелинейности моделируемых вязкоупругих свойств материала накладывает определенные ограничения на математические процедуры при переходе от (18) к (21), аналогично переходу от (3) к (5). Здесь следует дифференцировать по податливости и не следует дифференцировать по напряжению, поскольку последнее, как в (18), так и в (21), играет двойную роль и может быть рассмотрено как параметр.

Для простого режима релаксации σ_{et} , когда $\varepsilon = \text{const}$, из уравнения (13) получается формула для определения модуля релаксации модели (рис. 2) по податливости (23) или (24) в символическом виде:

$$E_{et} \stackrel{\text{def}}{=} p^{-2} \{D_{\sigma t}\}^{-1} = \{t\} \{D_{\sigma t}\}^{-1}. \quad (26)$$

С учетом (26) из уравнения (13) снова получаем интегральное уравнение (8).

Поскольку, в соответствии с (26), в полученном каноническом уравнении (8) напряжение содержится также и под знаком интеграла в неявном виде, использование уравнения (8) оказывается затруднительным – по аналогии с возможностью расчетов по формуле (13), которая была получена для первой модели (рис.1).

Таким образом, для деформационного варианта (рис.1) оказывается действенным уравнение (8), а для силового варианта (рис. 2) – уравнение (13).

По аналогии с (14), удовлетворительным решением уравнения (24) является [19]:

$$\bar{Q}_{\sigma} \cong (D_{\infty} - D_0)^{-1} \left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t=\tau_{\sigma}}, \quad (27)$$

откуда видна простая взаимосвязь спектра запаздывания с логарифмическим ядром податливости, входящим в уравнение (13).

При необходимости формула (27) так же, как и формула (14), может быть заменена более точным решением [20].

Из (27) отчетливо видно, что производную податливости по логарифмической шкале времени следует интерпретировать так же, как и спектр запаздывания, то есть как распределение частиц по временам запаздывания. В связи с этим уравнение (13) следует использовать в виде:

$$\varepsilon_t = E_0^{-1} \sigma_t + \int_{-\infty}^{\ln t} \sigma_{t-s} \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln s} d \ln s, \quad (28)$$

где ядро становится более ясным, чем в уравнении (13).

Такая спектральная интерпретация уравнений (28) и (13) сохраняется при любом выборе аппроксимирующей функции для податливости как функции времени, зависящей так же от напряжения, как от параметра, то есть указанная интерпретация силового варианта нелинейно-наследственной вязкоупругости может считаться универсальной [21].

Обоснованность использования логарифмических шкал в уравнениях нелинейно-наследственной вязкоупругости (15) и (28) следует и из наблюдаемой пропорциональности между логарифмической шкалой среднестатистических времен релаксации или запаздывания и потенциальным барьером [22]:

$$kT \cdot \ln \frac{\tau_{\varepsilon}}{\tau_0} \cong U_{\varepsilon},$$

или

$$kT \cdot \ln \frac{\tau_{\sigma}}{\tau_0} \cong U_{\sigma}, \quad (29)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура по Кельвину; $\tau_0 \cong 10^{-13}$ с; U_{ε} и U_{σ} – убывающие энергии активации с начальными значениями $U_{\infty} \cong U_{\sigma\infty} \cong 100$ кДж / моль.

Близость этих зависимостей, полученных по измерениям релаксации и ползучести, не позволяет отдать предпочтение временам релаксации или временам запаздывания, то есть какому-либо из рассмотренных - деформационному (15) или силовому (28) – вариантам теории нелинейно-наследственной вязкоупругости, предназначае-

мым для анализа и расчетного прогнозирования сложных режимов воздействия, когда $\varepsilon \neq \text{const}$ и $\sigma \neq \text{const}$.

Уравнение (15) нагляднее всего применяется к аналитическому описанию и физической интерпретации диаграммы растяжения [23].

Уравнение (28) полезно использовать, например, при анализе или прогнозировании восстановительных деформационных процессов. При этом, в частности, полезно убедиться, что больцмановский принцип суперпозиции, на котором построена теория линейной вязкоупругости [2], является свойством также и обеих рассмотренных обобщенных моделей (рис. 1 и 2) [24].

Существенно то, что в логарифмическом ядре уравнения (15) в нормированном виде содержится деформационно-временная аналогия, а в логарифмическом ядре уравнения (28), также в нормированном виде, содержится сило-временная аналогия.

Наиболее наглядно эти аналогии проявляются при построении указанных ядер в преобразованных логарифмических шкалах [25]:

$$\ln s - \ln \tau_\varepsilon = \ln \frac{s}{\tau_\varepsilon},$$

или

$$\ln s - \ln \tau_\sigma = \ln \frac{s}{\tau_\sigma}, \quad (30)$$

где τ_ε и τ_σ – среднестатистические времена релаксации и запаздывания, зависящие от деформации и напряжения соответственно.

В первом, деформационном варианте, ядра, полученные на различных уровнях деформации, совпадут. Во втором, силовом варианте, ядра, полученные на различных уровнях напряжения, также совпадут [26].

Таким образом, названия двух рассмотренных вариантов теории нелинейно-наследственной вязкоупругости согласуются с названиями заложенных в них аналогий – деформационно-временной и сило-временной соответственно. Подчеркнем, что наличие указанных аналогий следует

считать признаком проявления нелинейно-наследственной вязкоупругости. В то же время отсутствие таких аналогий еще не означает, что имеет место линейно-наследственная вязкоупругость.

Если при работе с реальным материалом появляются признаки линейно-наследственной вязкоупругости, то есть когда среднестатистические значения времен релаксации и запаздывания становятся постоянными, то все формулы упрощаются. В этом случае уравнения (12) и (26) полностью совпадут, а (8) и (13) или (15) и (28) станут идентичными при соблюдении любого из следующих условий, получаемых из (15) и (28) соответственно [27]:

- при $\sigma = \text{const}$

$$E_0 D_{\sigma t} + \int_{-\infty}^{\ln t} D_{\sigma; t-s} \frac{\partial E_{\varepsilon s}}{\partial \ln s} d \ln s = 1, \quad (31)$$

- при $\varepsilon = \text{const}$

$$D_0 E_{\varepsilon t} + \int_{-\infty}^{\ln t} E_{\varepsilon; t-s} \frac{\partial D_{\sigma s}}{\partial \ln s} d \ln s = 1. \quad (32)$$

Опыт работы с полимерными нитями из ПКА, ПЭТ, ПАН и др., у которых ярко выражена нелинейно-наследственная вязкоупругость, показывает, что воспользоваться формулами (12) и (26) или (31) и (32) значительно сложнее, чем в случае линейно-наследственной вязкоупругости. Стремление к минимуму характеристик моделей обоих вариантов (рис. 1 и 2) облегчает расчеты по (31) и (32) или по (12) и (26), но затрудняет соблюдение этих условий.

Как в случае линейно-наследственной вязкоупругости, так и в случае нелинейно-наследственной вязкоупругости, оказывается продуктивным принцип согласованного определения модуля релаксации и податливости из экспериментов с одновременным контролем за удовлетворительным соблюдением условий эквивалентности (31) и (32) обоих используемых вариантов моделирования – деформационного (15) и силового (28) [28].

В соответствии с приведенными моделями (рис. 1 и 2), как в случае линейно-наследственной вязкоупругости, так и в случае нелинейно-наследственной вязко-

упругости, спектры следует интерпретировать не как распределение модуля релаксации или податливости, а как распределение частиц по логарифмическим временам релаксации или запаздывания соответственно, причем в случае нелинейно-наследственной вязкоупругости указанные времена становятся зависимыми от деформации или напряжения.

Указанные зависимости в ядрах релаксации и запаздывания (14) и (27) уравнений состояния (15) и (28) функционируют через среднестатистические времена релаксации и запаздывания, отражая свой активационный характер.

Таким образом, выбираемая нормированная функция релаксации $\phi_{\text{ст}}$ или запаздывания $\phi_{\text{от}}$ в удовлетворительном приближении представляет собой проинтегрированное распределение частиц по логарифмической шкале времен релаксации (14) или запаздывания (27). Такая физическая интерпретация выбираемых нормированных функций представляется особо полезной при сравнительном анализе физико-механических свойств различных материалов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 2. С.12...16.

2. Макаров А.Г. Определение аналитической взаимосвязи нормированных ядер релаксации и ползучести в линейной теории вязкоупругости текстильных материалов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 2. С. 13...17.

3. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных парашютных строп//Химические волокна. – 2015, № 6. С. 60...67.

4. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных парашютных строп//Химические волокна. – 2016, № 2. С. 52...58.

5. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А., Коновалов А.С. Методы моделирования и сравнительного анализа усадки и деформационно-восстановительных свойств арамидных текстильных материалов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 3. С. 253...257.

6. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С. Методы повышения конкурентоспособности отечественных арамидных текстильных материалов на основе комплексного анализа их функциональных свойств// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, №6. С.267...272.

7. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов - основа анализа их эксплуатационных свойств//Химические волокна. –2018, № 2. С.36...39.

8. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Козлов А.А., Васильева Е.К. Разработка интегральных критериев оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов//Химические волокна. – 2018, № 4. С. 54...56.

9. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Егорова М.А., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна. – 2018, № 4. С.117...120.

10. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформационно-восстановительных свойств и усадки арамидных текстильных материалов//Химические волокна. – 2018, № 5. С.89...92.

11. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Васильева Е.К., Шванкин А.М., Егоров И.М. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна. – 2018, № 6. С.3...6.

12. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования и анализа их эксплуатационных свойств//Химические волокна. – 2018, № 6. С. 87...90.

13. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Математическое моделирование и расчетное прогнозирование вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен - средство оценки их функционально-эксплуатационного назначения// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 4. С. 229...234.

14. Макаров А.Г., Максимов В.В., Коновалов А.С., Козлов А.А., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Компьютерное моделирование и качественный анализ деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов для парашютостроения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 5. С. 248...253.

15. Демидов А.В., Переборова Н.В., Макаров А.Г., Киселев С.В. Методы системного анализа релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения //Химические волокна. – 2020, № 3. С. 28...31.

16. Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. Математическое моделирование и системный анализ вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов//Химические волокна. – 2020, № 3. С. 48...51.

17. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Демидов А.В. Разработка методов улучшения функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Химические волокна. – 2020, № 3. С. 64...67.

18. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Киселев С.В., Егоров И.М. Компьютерное прогнозирование функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения//Химические волокна. – 2020, № 4. С. 20...21.

19. Демидов А.В., Макаров А.Г., Вагнер В.И., Егорова М.А. Методы системного анализа функционально-эксплуатационных деформационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения //Химические волокна. – 2020, № 4. С. 28...30.

20. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егоров И.М., Макарова А.А. Применение спектрального моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов при исследовании их функциональности//Химические волокна. – 2020, № 4. С. 74...77.

REFERENCES

1. Makarov A.G. Control of parameters of nonlinear hereditary nuclei of relaxation and delay of synthetic threads. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2000, no. 2, p. 12-16.

2. Makarov A.G. Determination of the analytical relationship of the normalized nuclei of relaxation and creep in the linear theory of viscoelasticity of textile materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2002, No. 2, p. 13 - 17.

3. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Mathematical modeling and computer prediction of deformation processes of polymer parachute lines. *Chemical fibers*, 2015, no. 6, p. 60 - 67.

4. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Mathematical modeling and computer prediction of deformation processes of polymer parachute lines. *Chemical fibers*, 2016, no. 2, p. 52-58.

5. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Konovalov A.S. Methods of modeling and comparative analysis of shrinkage and deformation-recovery properties of aramid textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2018, No. 3 (375), p. 253-257.

6. Pereborova NV, Makarov AG, Egorova MA, Klimova NS. Methods for increasing the competitiveness of domestic aramid textile materials on the basis of a comprehensive analysis of their functional properties // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya*

Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018, No. 6 (377), p. 267-272.

7. Pereborova NV, Demidov AV, Makarov AG, Klimova NS. Modeling of relaxation-deformation processes of aramid textile materials - the basis for the analysis of their operational properties // *Chemical fibers*. 2018, no. 2, p. 36-39.

8. Pereborova N.V., Makarov A.G., Kozlov A.A., Vasilyeva E.K. Development of integral criteria for the optimality of mathematical modeling of relaxation and recovery processes of polymer textile materials. *Chemical fibers*, 2018, no. 4, p. 54-56.

9. Makarov A.G., Pereborova N.V., Wagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spectral analysis of viscoelastic creep of geotextile nonwovens // *Chemical fibers*, 2018, no. 4, p. 117-120.

10. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A. Mathematical modeling and comparative analysis of deformation-recovery properties and shrinkage of aramid textile materials // *Chemical fibers*, 2018, no. 5, p. 89-92.

11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Vasilyeva E.K., Shvankin A.M., Egorov I.M. Mathematical modeling and computer prediction of viscoelastic creep of geotextile nonwovens // *Chemical fibers*, 2018, no. 6, p. 3-6.

12. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Increasing the competitiveness of aramid textile materials based on mathematical modeling and analysis of their performance // *Chemical fibers*, 2018, no. 6, p. 87-90.

13. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Mathematical modeling and computational prediction of the viscoelasticity of geotextile nonwoven fabrics - a means of assessing their functional and operational purpose // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2019, No. 4 (382) p. 229-234.

14. Makarov A.G., Maksimov V.V., Konovalov A.S., Kozlov A.A., Wagner V.I., Vasilyeva E.K. Computer modeling and qualitative analysis of the deformation and relaxation properties of polymer materials for parachute construction *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2019, No. 5 (383), p. 248-253.

15. Demidov A.V., Pereborova N.V., Makarov A.G., Kiselev S.V. Methods for system analysis of relaxation and recovery properties of polymeric textile materials for technical purposes. *Chemical fibers*, 2020, no. 3, p. 28 - 31.

16. Egorov I.M., Makarov A.G., Egorova M.A., Pereborova N.V. Mathematical modeling and system analysis of the viscoelastic-plastic properties of marine polymer ropes. *Chemical fibers*, 2020, no. 3, p. 48 - 51.

17. Egorova M.A., Egorov I.M., Pereborova N.V., Demidov A.V. Development of methods for improving the functional and operational properties of polymeric textile materials. *Chemical fibers*, 2020, no. 3, p. 64 - 67.

18. Pereborova N.V., Makarov A.G., Kiselev S.V., Egorov I.M. Computer prediction of the functional and operational properties of polymeric textile materials for

technical purposes. Chemical fibers, 2020, no. 4, p.20...21.

19. Demidov A.V., Makarov A.G., Wagner V.I., Egorova M.A. Methods of system analysis of functional and operational deformation properties of polymer textile materials for technical purposes. Chemical fibers, 2020, no. 4, p. 28 - 30.

20. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorov I.M., Makarova A.A. Application of spectral modeling of deformation-relaxation processes of polymeric textile materials in the study of their functionality. Chemical fibers, 2020, no. 4, p. 74-77.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 07.09.21.

УДК 539.3

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_219

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕЛИНЕЙНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**MATHEMATICAL MODELING OF NONLINEAR STRESS-STRAIN STATE
OF MULTILAYER STRUCTURES COMPOSITE MATERIALS**

В.Г. ДМИТРИЕВ, С.В. ХЕЙЛО

V.G. DMITRIEV, S.V. KHEYLO

**(Московский авиационный университет
Национальный исследовательский университет),
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))**

**(Moscow Aviation Institute (National Research University),
Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))**

E-mail: vgd2105@mail.ru; sheilo@yandex.ru

В статье разрабатываются адекватные математические модели и вычислительные алгоритмы для исследования особенностей процессов деформирования различных несущих конструкций (пластины, оболочки вращения, арки, панели, перекрытия, балки) из композитов на волокнистой основе при больших перемещениях и произвольных углах поворота нормали. Для дискретизации исходной континуальной задачи по пространственным переменным используется метод конечных разностей с заменой дифференциальных операторов конечно-разностными второго порядка аппроксимации. Вычислительный алгоритм решения существенно нелинейной краевой задачи строится на основе адаптации квазидинамической формы метода установления с построения явной двухслойной разностной схемы по времени второго порядка точности. Получены оценки оптимальных значений параметров итерационного процесса.

The paper develops mathematical models and computational algorithms for studying the features of the deformation processes of various load-bearing structures (plates, shells, arches, panels, ceilings, beams) made of fiber-based composites at large changes and angles of the normal rotation. The finite difference method is used to solve the problem of spatial variables. In this case, the differential operators are replaced by finite-difference operators of the approximation second order. The computational algorithm for solving a nonlinear boundary value problem is based on the dynamic form of establishing a two-layer difference scheme method of the second order accuracy. Estimates of the optimal values parameters of the iterative process are obtained.

Ключевые слова: расчет конструкций из композитных материалов, конечные разности, нелинейные задачи, метод установления, аппроксимация.

Keywords: calculation of structures made of composite materials, finite differences, nonlinear problems, establishment method, approximation.

В производстве современных конструкций достаточно широко используются волокнистые композиты. Использование таких материалов в ответственных конструкциях (в машиностроении, авиастроении) требует определения напряженно-деформированного состояния под действием внешних нагрузок [1...5].

Исследование реальных физических процессов методами вычислительного эксперимента является одним из эффективных современных направлений, позволяющих существенно сократить материальные и экономические затраты как при проектировании, так и изготовлении различных изделий. Основным этапом вычислительного эксперимента является разработка математических моделей, адекватно описывающих исследуемые физические процессы и объекты, а также построение экономичных вычислительных алгоритмов решения соответствующих дискретных уравнений, допускающих их практическую реализацию на ЭВМ [6...15]. В большинстве случаев эти конструкции являются оболочками вращения, пластинами, балками, которые процессе эксплуатации претерпевают существенное изменение начальной геометрии при больших перемещениях и углах поворота нормали к координатной поверхности, что вызывает необходимость разработки и развития как адекватных математических моделей, так и универсальных вычисли-

тельных алгоритмов решения существенно нелинейных краевых задач.

При построении математической модели начальная (недеформированная) геометрия изделий может быть как прямолинейной, так и криволинейной.

В общем случае рассматриваются упругие однослойные и многослойные изделия из волокнистых композитов. В качестве координатной поверхности (поверхности приведения) однослойной конструкции принимается срединная поверхность, а для многослойной конструкции из ВК за координатную поверхность может быть принята срединная поверхность одного из слоев, поверхность контакта слоев или линия, проходящая через центры тяжести поперечных сечений. Размер поперечного сечения по нормали к оси полагается малым по сравнению с радиусом кривизны деформированной оси. Для описания процессов деформирования таких конструкций при больших перемещениях точек координатной поверхности и неограниченных углах поворота нормали к ней в качестве неизвестных принимаются изменения декартовых координат x , y поскольку использование традиционных компонент тангенциального u и нормального w перемещения для рассматриваемого варианта геометрически нелинейного деформирования тонкостенных конструкций приводит к значительному усложнению структуры уравнений [15], [16].

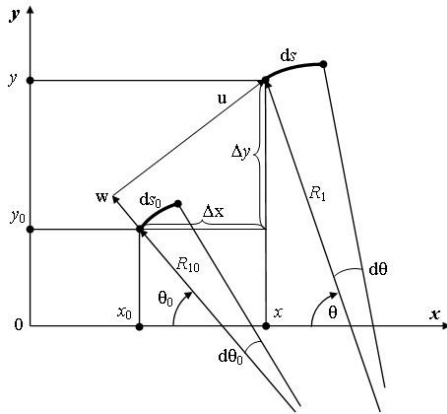


Рис. 1

$$ds_0 = \sqrt{dx_0^2 + dy_0^2}; \quad \sin \theta_0 = \frac{dx_0}{ds_0}; \quad \cos \theta_0 = \frac{dy_0}{ds_0}; \quad ds_0 = R_{10} d\theta_0; \quad k_{10} = \frac{1}{R_{10}} = \frac{d\theta_0}{ds_0}, \quad (1)$$

где R_{10} – радиус кривизны в направлении образующей (рис. 1).

В результате деформации элемент будет иметь длину ds , координаты x, y , угол поворота θ и кривизну k_1 . Рассматривая координаты x, y как функции линейной координаты s вдоль деформированной образующей $x=x(s), y=y(s)$, для деформированного состояния имеем соотношения, аналогичные (1):

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}, \quad \sin \theta = \frac{dx}{ds}, \quad \cos \theta = \frac{dy}{ds}, \quad ds = R_1 d\theta, \quad k_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{d\theta}{ds}, \quad (2)$$

где θ – угол между осью x и нормалью к деформированной образующей. Ограничения на угол поворота $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, аналогичный кинематическому параметру "жесткой" нормали в рамках гипотез Кирхгоффа-Лява, не

До деформации элемент недеформированной образующей длиной ds_0 имеет начальные координаты x_0, y_0 , кривизну k_{10} и начальный угол θ_0 между осью x и нормалью к образующей (рис. 1 – начальный и деформированный элемент конструкции). Полагая координаты x_0, y_0 заданными функциями линейной координаты вдоль образующей $x_0=x_0(s_0), y_0=y_0(s_0)$, для начального (недеформированного) состояния можно записать

накладываются. Компоненты деформации вдоль образующей E_{11} , а также изменение кривизны поверхности приведения K_{11} определяются как:

$$E_{11} = \frac{ds - ds_0}{ds_0} = \frac{ds}{ds_0} - 1, \quad K_{11} = k_1 - k_{10} = \frac{d\theta}{ds} - \frac{d\theta_0}{ds_0}. \quad (3)$$

Введем силовые факторы в поперечном сечении конструкции: продольную T , поперечную силу Q и изгибающий момент M , а также $q_x=q_x(s)$ и $q_y=q_y(s)$ – компоненты интенсивности распределенной нагрузки $q=q(s)$. Не теряя общности, ограничимся случаем физических соотношений для случая упругих панелей при их цилиндрическом изгибе. Для однослойной конструкции толщиной h :

$$T = B_{11} E_{11}, \quad M = D_{11} K_{11}, \quad (4)$$

где $B_{11} = \frac{Eh}{1-\mu^2}$ – жесткость на растяжение;

$$D_{11} = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \text{ – изгибная жесткость.}$$

Для многослойной конструкции из композитов со слоями переменной толщины h_m силовые факторы выражаются через компоненты деформации координатной поверхности по формулам из [17], [18] (рис. 2 – поперечное сечение многослойной конструкции (M –число слоев).)

$$T = B_{11} E_{11} + A_{11} K_{11}, \quad M = A_{11} E_{11} + D_{11} K_{11}. \quad (5)$$

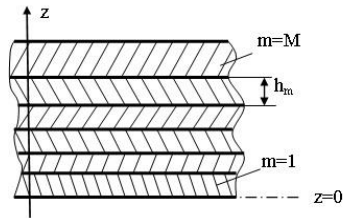


Рис. 2

Жесткостные коэффициенты A_{11} , B_{11} , D_{11} определяются через упругие характеристики слоев и их толщины:

$$B_{11} = \sum_{m=1}^M \int_{z_{m-1}}^{z_m} \frac{E_m}{1-\mu_m^2} dz, \quad A_{11} = \sum_{m=1}^M \int_{z_{m-1}}^{z_m} \frac{E_m z}{1-\mu_m^2} dz, \quad D_{11} = \sum_{m=1}^M \int_{z_{m-1}}^{z_m} \frac{E_m z^2}{1-\mu_m^2} dz, \quad (6)$$

где E_m , μ_m – модули упругости первого рода и коэффициенты Пуассона композита m -го слоя; m – индекс слоя, $1 \leq m \leq M$, M – число слоев.

Физические соотношения балки шириной b и толщиной h могут быть получены из (4)...(6) как частный случай.

Уравнения равновесия элемента панели в проекциях на оси, связанные с деформированной координатной поверхностью, имеют вид:

$$\frac{dT}{ds} + k_1 Q + q_u = 0, \quad \frac{dQ}{ds} - k_1 T + q_w = 0, \quad Q = \frac{dM}{ds}. \quad (7)$$

Соотношения (1)...(7) дополняются граничными условиями на краях $s=s_0$ и $s=s_L$, которые на крае $s=s_0$ формулируются следующим образом:

$$x(s_0) = x_0; \quad y(s_0) = y_0; \quad k_1(s_0) = k_{10} = 1/R_{10}. \quad (9)$$

При численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) – (9) дискретизация по пространственным переменным осуществляется методом конечных разностей (МКР) [13 – 15]. В области непрерывного изменения аргумента s вводятся две сетки: основная с целочисленными индексами i и вспомогательная с индексами $i \pm 1/2$, узлы которой располагаются

- жесткое защемление
 $x(s_0) = x_0; \quad y(s_0) = y_0; \quad \theta(s_0) = \theta_0;$ (8)
- шарнирное закрепление

посередине между узлами основной сетки $i \pm 1$ (рис. 3). Первоначальная геометрия задается сеточными функциями $(x_0)_i$, $(y_0)_i$, где $1 \leq i \leq N$, N – число точек дискретизации. Тогда конечно-разностные аппроксимации дифференциальных соотношений (1) могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} (\Delta s_0)_{i-1/2} &= \Delta s_1 = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}; \quad (\Delta s_0)_{i+1/2} = \Delta s_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2}; \\ \sin \alpha_1 &= \frac{\Delta y_1}{\Delta s_1}, \quad \theta_1 = (\theta_0)_{i-1/2} = \frac{\pi}{2} - \alpha_1; \quad \sin \alpha_2 = \frac{\Delta y_2}{\Delta s_2}, \quad \theta_2 = (\theta_0)_{i+1/2} = \frac{\pi}{2} - \alpha_2; \\ (\Delta s_0)_i &= \frac{(\Delta s_0)_{i-1/2} + (\Delta s_0)_{i+1/2}}{2}; \quad (k_{10})_i = \frac{(\theta_0)_{i+1/2} - (\theta_0)_{i-1/2}}{(\Delta s_0)_i}, \end{aligned}$$

где $\Delta x_1 = (x_0)_i - (x_0)_{i-1}$, $\Delta y_1 = (y_0)_i - (y_0)_{i-1}$, $\Delta x_2 = (x_0)_{i+1} - (x_0)_i$, $\Delta y_2 = (y_0)_{i+1} - (y_0)_i$.

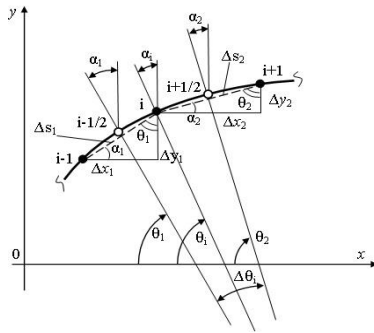


Рис. 3

$$\frac{T_{i+1/2} - T_{i-1/2}}{\Delta s_i} + 0,5(k_1)_i(Q_{i-1/2} + Q_{i+1/2}) + (q_x)_i = 0, \quad (10)$$

$$\frac{Q_{i+1/2} - Q_{i-1/2}}{\Delta s_i} - 0,5(k_1)_i(T_{i-1/2} + T_{i+1/2}) + (q_y)_i = 0, \quad Q_{i-1/2} = \frac{M_i - M_{i-1}}{\Delta s_1}, \quad Q_{i+1/2} = \frac{M_{i+1} - M_i}{\Delta s_2},$$

где $(q_x)_i$, $(q_y)_i$ – сеточные функции компонент поверхностной нагрузки. Поскольку для аппроксимации параметров НДС как в начальном, так и деформированном состоянии используются однотипные конечно-разностные аппроксимации, то при $(q_x)_i = (q_y)_i = 0$ недеформированное состояние является точным решением сеточных уравнений (10), что подтверждает корректность разработанных разностных аппроксимаций.

Для численного решения системы сеточных уравнений (10) используется квазидинамическая форма метода установления с переходом к эволюционной задаче путем замены уравнений равновесия на уравнения движения в вязкой среде [17...19]. Представляя конечно-разностные аналоги уравнений равновесия в операторной форме:

$$[L_{\Delta s}(U_k)]_i + (q_k)_i = 0, \quad (11)$$

$$[\dot{u}_k]_i^{(n+1/2)} = \frac{[2m_k - \varepsilon_k \Delta t]_i}{[2m_k + \varepsilon_k \Delta t]_i} [\dot{u}_k]_i^{(n-1/2)} + \frac{2 \Delta t [L_{\Delta s}(U_k) + q_k]_i^{(n)}}{[2m_k + \varepsilon_k \Delta t]_i} \quad (13)$$

и сеточные функции обобщенных перемещений $[u_k]_i^{(n+1)}$ на временном слое $t^{(n+1)}$:

$$[u_k]_i^{(n+1)} = [u_k]_i^{(n)} + t [\dot{u}_k]_i^{(n+1/2)}. \quad (14)$$

Деформированное состояние описывается сеточными функциями узловых перемещений x_i и y_i с аппроксимацией соотношений (2) конечно-разностными операторами. Конечно-разностные аналоги уравнений равновесия (7), дискретизированные относительно узловой точки основной сетки i , записываются в виде:

где $[L_{\Delta s}(U_k)]_i$ – соответствующие обобщенные конечно-разностные операторы для вектора U_k сеточных функций перемещений: $U_1 = u_i$, $U_2 = w_i$, $(q_1)_i = (q_x)_i$, $(q_2)_i = (q_y)_i$, нестационарные уравнения метода установления можно записать следующим образом:

$$[L_{\Delta s}(U_k)]_i + (q_k)_i = (m_k \ddot{u}_k)_i + (\varepsilon_k \dot{u}_k)_i, \quad (12)$$

где ε_k – параметры удельной вязкости искусственной среды, ρ – плотность; $m_k = \rho h$ ($k=1, 2$).

Аппроксимация уравнений (12) на временной сетке с шагом $\Delta t = \text{const}$ с использованием разностных операторов второго порядка точности (Δt^2) позволяет получить в явном виде выражения для скоростей $[\dot{u}_k]_i^{(n+1/2)}$ на временном слое $t^{(n+1/2)}$:

Таким образом, разностная аппроксимация нестационарных уравнений (12) приводит к итерационному процессу (13), (14) нахождения решения исходной стационарной задачи (11). Параметры итерационного процесса – удельные вязкости среды $\varepsilon_k(i)$ и

шаг по времени Δt – определяются из условия ускорения сходимости и устойчивости разностной схемы [18], [19]. Для случая

$$\varepsilon_k = 2a_{\varepsilon,(k)} \sqrt{\frac{m_k \mu_{1,(k)} \mu_{2,(k)}}{\mu_{1,(k)} + \mu_{2,(k)}}}; \quad \Delta t_k = 2a_{t,(k)} \sqrt{\frac{m_k}{\mu_{1,(k)} + \mu_{2,(k)}}}, \quad (15)$$

где $\mu_{1,(k)}$ и $\mu_{2,(k)}$ – наименьшие и наибольшие собственные числа для соответствующих разностных операторов; $a_{\varepsilon,(k)}$ и $a_{t,(k)}$ – поправочные коэффициенты.

Шаг по времени Δt для всей разностной схемы определяется из условия вида: $\Delta t = \min \Delta t_k$. Для нелинейных задач точное определение границ спектров разностных – наименьшие собственные числа

$$\mu_{1,(1)} = 4 \frac{B_{11}}{\Delta s_0^2} \sin^2 \frac{\pi \Delta s_0}{2 L_0}, \quad \mu_{1,(2)} = 16 \frac{D_{11}}{\Delta s_0^4} \sin^4 \frac{\pi \Delta s_0}{2 L_0} + k_{10}^2 B_{11}, \quad (16)$$

– наибольшие собственные числа

$$\mu_{2,(1)} = 4 \frac{B_{11}}{\Delta s_0^2} \cos^2 \frac{\pi \Delta s_0}{2 L_0}, \quad \mu_{2,(2)} = 16 \frac{D_{11}}{\Delta s_0^4} \cos^4 \frac{\pi \Delta s_0}{2 L_0} + k_{10}^2 B_{11}, \quad (17)$$

где k_{10} – характерное значения кривизны.

Аналогичная математическая модель для исследования существенно нелинейных процессов деформирования листовых материалов из композитных материалов может быть построена, когда в качестве исходных используются соотношения теории мягких оболочек.

Разработанная математическая модель и вычислительный алгоритм решения сеточных уравнений позволяет более точно по сравнению с классическими моделями (уравнения Кирхгова-Лява, Тимошенко) определять параметры НДС многослойных конструкций при произвольных перемещениях и углах поворота. Полученные результаты позволяют провести последующую оптимизацию с возможностью их оптимизации по структурным весовым параметрам, с сокращением материальных затрат.

Результаты проведенного вычисления по сходимости, точности и достоверности предложенных математических моделей показали, что разработанные модели позволяют исследовать такие конструкции в докритической и закритических областях при максимальных перемещениях, достигающих порядка нескольких десятков толщин

стационарного итерационного процесса оценочные формулы с учетом структуры уравнений (14) запишутся в виде [13], [15]:

операторов связано со значительными математическими трудностями, поэтому $\mu_{1,(k)}$ и $\mu_{2,(k)}$ оцениваются в рамках линейных соотношений при соответствующих упрощениях в исходных уравнениях. Оценочные формулы для $\mu_{1,(k)}$ и $\mu_{2,(k)}$ для случая однослойной ортотропной конструкции можно представить следующим образом:

и более, в то время как в обычных подходах в рамках линейных моделей ограничены перемещениями порядка 0,3 толщин, а геометрически нелинейные модели, например, в рамках среднего изгиба (квадратичная теория Новожилова В.В.) позволяют расширить эту область применения до 10...15 толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988.
2. Nikbakt S., Kamarian S., Shakeri M. A review on optimization of composite structures. part I: Laminated composites // Composite Structures. – Vol. 195, 2018. P. 158...185.
3. Паймушин В.Н., Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Холмогоров С.А. О специфике работы композитного несущего слоя трехслойной пластины при локальном нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020, № 4. С. 152...164.
4. Vasiliev V., Morozov E.V. Advanced mechanics of composite materials // UK: Oxford. – 2007.
5. Олейников А.И. Оценка жесткости и прочности слоистых композитов // Композиты и наноструктуры. – 2017. Т. 9, № 2 (34). С. 77...79.

6. *Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В.* Расчет напряжения в слоистом материале // Труды ВИАМ. – 2018, № 10 (70). С. 93...106.
7. *Zhao W., Xie Z., Wang X., Li X., Hao J.* Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2019.
8. *Zarei A., Khosravifard A.* A meshfree method for static and buckling analysis of shear deformable composite laminates considering continuity of interlaminar transverse shearing stresses // *Composite Structures*. – 2019. P. 206...218.
9. *Vosoughi A.R., Darabi A., Anjabin N., Topal U.* A mixed finite element and improved genetic algorithm method for maximizing buckling load of stiffened laminated plates // *Aerospace and Technology*. – Vol. 70, 2017. P. 378...387.
10. *Tran L.V., Wahab M.A., Kim S.E.* An isogeometric finite element approach for thermal bending and buckling analyses of laminated composite plates // *Composite Structures*. – Vol. 179, 2017. P. 35...39.
11. *Ramaswamy S., Rajadurai J.S., Moshi A.A.M.* Comparative analysis on classical laminated plate theory and higher order lamination plate theory for crossply FRP composite structures // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. – Vol. 14, № 11, 2017. P. 5444...5449.
12. *Ragb O., Matbuly M.S.* Buckling analysis of composite plates using moving least squares differential quadrature method // *International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. – Vol. 18, № 6, 2017. P. 292...301.
13. *Liew K.M., Pan Z.Z., Zhang I.W.* An overview of layerwise theories for composite laminates and structures: Development, numerical implementation and application // *Composite Structures*. – Vol. 216, 2019. P.240...259.
14. *Бульбович Р.В., Ознобишин А.Б., Рогожникова Е.Н.* Численно-экспериментальное исследование многослойных цилиндрических корпусов с локальными расслоениями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020, № 63. С. 40...51.
15. *Бакулин В.Н.* Блочная конечно-элементная модель для послойного анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных оболочек с нерегулярной структурой // Изв. Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2018, № 4. С.66...73.
16. *Григолюк Э.И., Шалашилин В.И.* Проблемы нелинейного деформирования: Метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1988.
17. *Dmitriev V.G., Egorova O.V., Starovoitov E.I.* Particularities of mathematical modeling of deformation processes for arched and panel designs of composites with large displacements and rotation angles // *INCAS Bulletin*. – 2020, 12(Special Issue). P. 53...66.
18. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. – М.: Физматлит. Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
19. *Dmitriev V.G., Egorova O.V., Rabinsky Lev N.* Solution of nonlinear initial boundary-value problems of the mechanics of multiply connected composite material shells on the basis of conservative difference schemes // *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. – Vol. 6, Is. 4, 2015. P.265...277.

REFERENCES

- Vasiliev V., Morozov E.V. Mechanics of composite materials // Moscow, Publishing house of Mashinostroenie. 1988. 269 p.
- Nikbakt S., Kamarian S., Shakeri M. A review on optimization of composite structures. part I: Laminated composites // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 195. - PP. 158-185.
- Paimushin V. N., Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R., Kholmogorov S. A. On the specifics of the operation of the composite load-bearing layer of a three-layer plate under local loading. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2020. № 4. P. 152-164.
- Vasiliev V., Morozov E.V. Advanced mechanics of composite materials // UK: Oxford. – 2007.
- Oleynikov A. I. Evaluation of stiffness and strength of layered composites *Composites and nanostructures*. 2017. T. 9. № 2 (34). P. 77-79.
- Oreshko E. I., Erasov V. S., Lashov O. A., Podzhivotov N. Yu., Kachan D. V. Calculation of stress in a layered material. *Works of VIAM*. 2018. № 10 (70). P. 93-106.
- Zhao W., Xie Z., Wang X., Li X., Hao J. Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. - 2019.
- Zarei A., Khosravifard A. A meshfree method for static and buckling analysis of shear deformable composite laminates considering continuity of interlaminar transverse shearing stresses // *Composite Structures*. – 2019. - PP. 206-218.
- Vosoughi A.R., Darabi A., Anjabin N., Topal U. A mixed finite element and improved genetic algorithm method for maximizing buckling load of stiffened laminated plates // *Aerospace and Technology*. - 2017. – Vol. 70. - PP. 378-387.
- Tran L.V., Wahab M.A., Kim S.E. An isogeometric finite element approach for thermal bending and buckling analyses of laminated composite plates // *Composite Structures*. - 2017. – Vol. 179. - PP. 35-39.

11. Ramaswamy S., Rajadurai J.S., Moshi A.A.M. Comparative analysis on classical laminated plate theory and higher order lamination plate theory for cross-ply FRP composite structures // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. - 2017. – Vol. 14. - № 11. - PP. 5444-5449.
12. Ragb O., Matbully M.S. Buckling analysis of composite plates using moving least squares differential quadrature method // International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. – 2017. – Vol. 18. - № 6. - PP. 292-301.
13. Liew K.M., Pan Z.Z., Zhang I.W. An overview of layerwise theories for composite laminates and structures: Development, numerical implementation and application // Composite Structures. – 2019. – Vol. 216. - PP. 240-259.
14. Bulbovich R. V., Oznobishin A. B., Rogozhnikova E. N. Numerical and experimental study of multi-layer cylindrical shells with local bundles. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering. 2020. № 63. P. 40-51
15. Bakulin V. N. Block finite element model for layer-by-layer analysis of the stress-strain state of three-layer shells with an irregular structure. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics. 2018. № 4. P. 66-73.
15. Grigolyuk E. I., Shalashilin V. I. Problems of nonlinear deformation: A method for continuing the solution by parameter in nonlinear problems of mechanics of a solid deformable body. - M.: Nauka, 1988. - 232 p.
16. Dmitriev, V.G., Egorova, O.V., Starovoitov, E.I. Particularities of mathematical modeling of deformation processes for arched and panel designs of composites with large displacements and rotation angles. IN-CAS Bulletin, 2020, 12 (Special Issue), p. 53-66.
17. Dmitriev V. Applied Mathematic Technologies in Nonlinear Mechanics of Thin-Walled Constructions. Chapter 4. Book Mathematics Applied to Engineering and Management Sciences. Edited by Mangey Ram and S. B. Singh. CRC Press Taylor & Francis Group. BocaRaton, 2019, pp. 71-116.
18. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobelkov G. M. Numerical methods. - M.: Fizmatlit. Laboratory of Basic Knowledge, 2001. - 632 p.
19. Dmitriev V.G., Egorova O.V., Rabinsky Lev N. Solution of nonlinear initial boundary-value problems of the mechanics of multiply connected composite material shells on the basis of conservative difference schemes. - Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, 2015. Volume 6, Issue 4, pp. 265-277.
- Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 15.11.21.

УДК 539.434:677.494
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_226

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
РЕЛАКСАЦИОННЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КОМПОЗИТОВ,
АРМИРОВАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ***

**MATHEMATICAL MODELING AND PREDICTION
OF RELAXATION AND DEFORMATION PROCESSES
OF COMPOSITES REINFORCED WITH TEXTILE MATERIALS**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.А. МАКАРОВА, Н.С. КЛИМОВА, А.М. ЛИТВИНОВ, В.И. ВАГНЕР

N.V. PEREBOROVA, A.A. MAKAROVA, N.S. KLIMOVA, A.M. LITVINOV, V.I. VAGNER

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: nina1332@yandex.ru; anastasiaquish@yahoo.com; nsk-klimova@yandex.ru; litalmih@yandex.ru; wagner@nerv@mail.ru

В статье описываются методы математического моделирования и системного анализа релаксационных и деформационных процессов композитов и армирующих их текстильных материалов. Математическое модели-

* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

рование и последующий системный анализ релаксационных и деформационных процессов композитов и текстильных материалов позволяет провести качественную оценку их функциональных и эксплуатационных возможностей.

The article describes methods of mathematical modeling and system analysis of relaxation and deformation processes of composites and textile materials reinforcing them. Mathematical modeling and subsequent system analysis of the relaxation and deformation processes of composites and textile materials allows a qualitative assessment of their functional and operational capabilities.

Ключевые слова: композиты, текстильные материалы, релаксационные процессы, деформационные процессы, математическое моделирование, прогнозирование.

Keywords: composites, textile materials, relaxation processes, deformation processes, mathematical modeling, forecasting.

Исходными данными для построения математической модели релаксационного процесса композитов и армирующих их текстильных материалов является эксперимент. По данным проведенного эксперимента в логарифмическо-временной шкале приведенного времени строится "семейство" кривых релаксации, то есть "семейство" кривых зависимости напряжения σ от логарифма приведенного времени для разных уровней постоянной деформации ε .

Полученное таким образом "семейство" кривых релаксации на основе формулы

$$E(\varepsilon, t) = \sigma(t) / \varepsilon \quad (1)$$

перестраивается в "семейство" кривых модуля релаксации $E_{\text{et}} = E(\varepsilon, t)$.

Математическое моделирование релаксационного процесса исследуемых материалов проводится на основе принципа деформационно-временной аналогии [1...3], когда "семейство" кривых модуля релаксации (σ – напряжение, ε – деформация, t – время), построенное по логарифмической шкале приведенного времени $\ln(t/t_1)$ (t_1 – некоторое фиксированное значение "базового" времени), путем параллельных сдвигов вдоль логарифмическо-временной шкалы накладывается на некоторую "обобщенную" кривую релаксации, задаваемую

нормированной функцией $\varphi(\ln(t/t_1))$.

При этом в качестве нормированной функции φ , как правило, выбирают одну из следующих функций [4...6]:

- интеграл вероятностей (ИВ)

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a} \ln \frac{t}{\tau} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2)$$

которая является интегральной функцией нормального распределения,

- нормированный арктангенс логарифма (НАЛ)

$$\varphi = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_n} \ln \frac{t}{\tau} \right), \quad (3)$$

которая является интегральной функцией распределения вероятностного закона Коши,

- гиперболический тангенс (ГТ)

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(1 + \text{th} \left(\frac{A_n}{2} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right), \quad (4)$$

- функцию Кольрауша (ФК)

$$\varphi = 1 - e^{-(t/\tau)^{k_n}} \quad (5)$$

и некоторые другие (здесь a_n , b_n , A_n , k_n , – структурные коэффициенты, характери-

зующие интенсивность вязкоупругого процесса).

Аппроксимация модуля релаксации $E_{\varepsilon t} = E(\varepsilon, t)$ с помощью какой-нибудь нормированной релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t} = \varphi(\varepsilon, t)$ типа (2)...(5) будет иметь следующий вид:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_{\varepsilon t}, \quad (6)$$

где E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости.

При этом если в качестве релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ выбрать интеграл вероятностей ИВ, то формула (6) примет вид:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (7)$$

В случае выбора других релаксационных функций получаем:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad (8)$$

– для функции НАЛ,

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\varepsilon}}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad (9)$$

– для функции ГТ и

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_\varepsilon} \right)^{k_{n\varepsilon}}} \right) \quad (10)$$

– для функции ФК.

В формулах (7)...(10):

– τ_ε – время релаксации, зависящее от деформации ε ;

– константы $a_{n\varepsilon}$, $b_{n\varepsilon}$, $A_{n\varepsilon}$, $k_{n\varepsilon}$ характеризуют интенсивность процесса релаксации и зависят от свойств исследуемой полимерной нити; индекс n указывает на то, что выбрана нормальная логарифмическая шкала приведенного времени.

Несомненным достоинством моделей (6)...(10) является то, что они содержат

наименьшее возможное число параметров, имеющих определенный физический смысл:

– $E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} (\sigma(\varepsilon, t)/\varepsilon)$ – модуль упругости, характеризующий квазимгновенное значение модуля релаксации, то есть его значение в начале процесса релаксации;

– $E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (\sigma(\varepsilon, t)/\varepsilon)$ – модуль вязкоупругости, характеризующий квазиравновесное значение модуля релаксации, то есть его значение в конце процесса релаксации;

– структурные параметры $a_{n\varepsilon}$, $b_{n\varepsilon}$, $A_{n\varepsilon}$, $k_{n\varepsilon}$ характеризуют скорость (интенсивность) процесса релаксации;

– время релаксации $\tau_\varepsilon = \tau(\varepsilon)$ характеризует время прохождения половины процесса релаксации при заданном значении деформации ε .

Учитывая, что модуль релаксации определяется формулой (6), получаем простейшие выражения для прогнозирования напряжения:

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - (E_0 - E_\infty) \varepsilon \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (11)$$

– для функции ИВ,

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - (E_0 - E_\infty) \varepsilon \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad (12)$$

– для функции НАЛ,

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - \frac{E_0 - E_\infty}{2} \varepsilon \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\varepsilon}}{2} \left(\frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \right) \quad (13)$$

– для функции ГТ и

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - (E_0 - E_\infty) \varepsilon \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_\varepsilon} \right)^{k_{n\varepsilon}}} \right) \quad (14)$$

– для функции ФК.

Формулами (11)...(14) можно пользоваться для прогнозирования релаксационных процессов композитов и армирующих их текстильных материалов [7...9].

Аналогично построению математической модели релаксационного процесса исходными данными для построения матема-

тической модели деформационного процесса композитов и армирующих их текстильных материалов является эксперимент. По данным проведенного эксперимента в логарифмическо-временной шкале приведенного времени строится "семейство" кривых ползучести, то есть "семейство" кривых зависимости деформации ε от логарифма приведенного времени для разных уровней постоянного напряжения σ .

Далее указанное "семейство" кривых ползучести на основе формулы:

$$D(\sigma, t) = \varepsilon(t)/\sigma \quad (15)$$

перестраивается в "семейство" кривых податливости $D_{\sigma t} = D(\sigma, t)$.

Далее на основе принципа сило-временной аналогии производится моделирование вязкоупругой ползучести (изменение во времени деформации ε , зависящей от напряжения σ) – "семейство" кривых податливости $D(\sigma, t) = \varepsilon(t)/\sigma$ (σ – напряжение, ε – деформация, t – время), построенное по логарифмической шкале приведенного времени $\ln(t/t_1)$ (t_1 – некоторое фиксированное значение "базового" времени), путем параллельных сдвигов вдоль логарифмическо-временной шкалы накладывается на некоторую "обобщенную" кривую податливости, задаваемую нормированной функцией $\varphi(\ln(t/t_1))$, в качестве которой обычно выбирают одну из функций (2)...(5).

При этом аппроксимация податливости $D_{\sigma t} = D(\sigma, t)$ с помощью какой-нибудь нормированной функции запаздывания $\varphi_{\sigma t} = \varphi(\sigma, t)$ типа (2)...(5) будет иметь следующий вид:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{\sigma t}, \quad (16)$$

где D_0 – начальная упругая податливость; D_∞ – предельно-равновесная податливость.

При этом если в качестве функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ выбрать интеграл вероятностей ИВ, то формула (16) примет вид [10]:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (17)$$

В случае выбора других функций запаздывания, получаем:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \right) \quad (18)$$

– для функции НАЛ,

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \frac{1}{2} \left(1 + \text{th} \left(\frac{A_{n\sigma}}{2} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \right) \quad (19)$$

– для функции ГТ и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \left[1 - e^{-\left(t/\tau_\sigma\right)^{k_{n\sigma}}} \right] \quad (20)$$

– для функции ФК.

В формулах (17)...(20): τ_σ – время запаздывания, зависящее от напряжения σ ; константы $a_{n\sigma}$, $b_{n\sigma}$, $A_{n\sigma}$, $k_{n\sigma}$ характеризуют интенсивность процесса ползучести и зависят от свойств исследуемой полимерной нити; индекс n указывает на то, что выбрана нормальная логарифмическая шкала приведенного времени.

Несомненным достоинством моделей (16) - (20) является то, что они содержат наименьшее возможное число параметров, имеющих определенный физический смысл:

- $D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} (\varepsilon(\sigma, t)/\sigma)$ – начальная упругая податливость, характеризующая квазимгновенное значение податливости, то есть ее значение в начале деформационного процесса;

- $D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (\varepsilon(\sigma, t)/\sigma)$ – предельно-равновесная податливость, характеризующая квазиравновесное значение податливости, то есть ее значение в конце деформационного процесса;

- структурные параметры $a_{не}$, $b_{не}$, $A_{не}$, $k_{не}$ характеризуют скорость (интенсивность) деформационного процесса;
 - время запаздывания (ползучести) $\tau_{\sigma} = \tau(\sigma)$ характеризует время прохождения половины деформационного процесса при заданном значении напряжения σ .

Учитывая, что податливость определяется формулой (16), получаем простейшие выражения для прогнозирования деформации [11...13]:

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0\sigma + (D_{\infty} - D_0)\sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{не}\sigma} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (21)$$

- для функции ИВ,

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0\sigma + (D_{\infty} - D_0)\sigma \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{не}\sigma} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) \right) \quad (22)$$

- для функции НАЛ,

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0\sigma + (D_{\infty} - D_0)\sigma \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_{не}}{2} \cdot \ln \left(\frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) \right) \right) \quad (23)$$

- для функции ГТ и

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0\sigma + (D_{\infty} - D_0)\sigma \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\sigma}} \right)^k n \sigma} \right) \quad (24)$$

- для функции ФК.

Формулами (21)...(24) можно пользоваться для прогнозирования деформационных процессов композитов и армирующих их текстильных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Initial stage of stress relaxation in oriented polymers. *Physics of the Solid State*. – Vol. 58, № 4, 2016. P. 840...846.
2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers. *Technical Physics*. – Vol. 60, № 2, 2015. P. 240...245.
3. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A., Rymkevich P.P. Modelling of directed polymers deformation processes based on the description of the kinetics of supramolecular structures separated by energy barriers. *Magazine of Civil Engineering*. – Vol. 44, № 9, 2013. P. 76...83+103...104.
4. Rymkevich P.P., Romanova A.A., Golovina V.V., Makarov A.G. The energy barriers model for the physical description of the viscoelasticity of synthetic polymers: Application to the uniaxial orientational drawing

of polyamide films // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – Vol. 52, № 12, 2013. P.1829...1847.

5. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. A version of modeling of nonlinear-hereditary viscoelasticity of polymer materials//*Mechanics of Solids*. – №44 (1), 2009. P. 122...130.

6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Predicting the nonlinear hereditary viscoelasticity of polymers//*Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – №48 (6), 2007. P. 897...904.

7. Makarov A.G. Determining the analytical correlation between the standardized nuclei of relaxation and creep in textile materials//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2002, №2. P. 13...17.

8. Stalevich A.M., Makarov A.G. Forecasting the deformation recovery process and the reverse relaxation in polymer materials//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2002, №3. P. 10...13.

9. Stalevich A.M., Makarov A.G. Determining the inherent viscoelastic relaxation spectrum for synthetic filaments//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2000, №3. P. 8...12.

10. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modeling of Deformation-Relaxation Processes of Aramid Textile Materials – the Foundation for Analyzing Their Operational Properties// *Fibre Chemistry*. – Vol. 50, №2, 2018. P. 104...107.

11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Konovalov A.S. Methods of simulation and comparative analysis of shadow and deformation-reducing properties of aramide textile materials//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, №3. P. 253...257.

12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Wagner V.I. Modeling and forecasting viscoelastic properties of textile materials with a complex structure//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2014, №6. P. 120...124.

13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. The criteria of optimal selection of mathematical model of textile materials viscoelasticity//*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2006, №5. P. 21...25.

REFERENCES

1. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Initial stage of stress relaxation in oriented polymers. *Physics of the Solid State*. – Vol. 58, № 4, 2016. P. 840...846.
2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers. *Technical Physics*. – Vol. 60, № 2, 2015. P. 240...245.
3. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A., Rymkevich P.P. Modelling of directed polymers deformation processes based on the description of the kinetics

of supramolecular structures separated by energy barriers. Magazine of Civil Engineering. – Vol. 44, № 9, 2013. P. 76...83+103...104.

4. Rymkevich P.P., Romanova A.A., Golovina V.V., Makarov A.G. The energy barriers model for the physical description of the viscoelasticity of synthetic polymers: Application to the uniaxial orientational drawing of polyamide films // Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – Vol. 52, № 12, 2013. P.1829...1847.

5. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. A version of modeling of nonlinear-hereditary viscoelasticity of polymer materials//Mechanics of Solids. – №44 (1), 2009. P. 122...130.

6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Predicting the nonlinear hereditary viscoelasticity of polymers//Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – №48 (6), 2007. P. 897...904.

7. Makarov A.G. Determining the analytical correlation between the standardized nuclei of relaxation and creep in textile materials//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2002, №2. P. 13...17.

8. Stalevich A.M., Makarov A.G. Forecasting the deformation recovery process and the reverse relaxation in polymer materials//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2002, №3. P. 10...13.

9. Stalevich A.M., Makarov A.G. Determining the inherent viscoelastic relaxation spectrum for synthetic

filaments//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2000, №3. P. 8...12.

10. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modeling of Deformation-Relaxation Processes of Aramid Textile Materials – the Foundation for Analyzing Their Operational Properties// Fibre Chemistry. – Vol. 50, №2, 2018. P. 104...107.

11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Kononov A.S. Methods of simulation and comparative analysis of shadow and deformation-reducing properties of aramide textile materials//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, №3. P. 253...257.

12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Wagner V.I. Modeling and forecasting viscoelastic properties of textile materials with a complex structure//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2014, №6. P. 120...124.

13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. The criteria of optimal selection of mathematical model of textile materials viscoelasticity//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, №5. P. 21...25.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 27.10.21.

УДК 677.024.1

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_231

КОМПЬЮТЕРНЫЕ 3D-МОДЕЛИ ТКАНЫХ АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОМПОЗИТОВ

COMPUTER 3D MODELS OF WOVEN REINFORCING MATERIALS FOR COMPOSITES

А.Н. БИЗЮК, Н.Н. ЯСИНСКАЯ

A.N. BIZYUK, N.N. YASINSKAYA

(Витебский государственный технологический университет, Беларусь)

(Vitebsk State University of Technology, Belarus)

E-mail: biziuk.andrei@gmail.com; yasinskaynn@rambler.ru

При изготовлении волокнистых полимерных композитов, в частности, реализации процесса пропитки текстильной армирующей основы связующим, одним из важнейших свойств является способность пропитываться вязкой жидкостью. Эта способность обусловлена капиллярно-пористой структурой волокнистого материала. Поэтому создание компьютерных 3D-моделей армирующих структур является актуальной задачей.

Предложен новый подход к описанию структуры тканых армирующих материалов, сводящийся к моделированию траекторий волокон и нитей в произвольном ткацком переплетении с использованием прямоугольных функций и уравнений винтовой линии на основе имитационного моделирования взаимодействия отдельных волокон. Описан метод, учитывающий взаимное расположение каждого волокна внутри текстильных нитей, из которых построено заданное ткацкое переплетение, что позволит прогнозировать способность армирующей тканой основы пропитываться полимерным связующим при формировании полимерных композиционных материалов. Разработано программное обеспечение на языке функционального программирования Haskell, позволяющее изобразить трехмерную модель каждого волокна в нити в виде линии, совокупности точек или трубочки заданного диаметра. Приведены результаты моделирования геометрической структуры тканых материалов, доказывающие возможность практического применения разработанного метода моделирования.

In the manufacture of fibrous polymer composites and, in particular, in the implementation of the impregnation process of the textile reinforcing base with a binder, one of the most important properties is the ability to soak a viscous liquid. This ability is due to the capillary-porous structure of the fibrous material. Therefore, the creation of computer 3D models of reinforcing structures is a topical problem. We propose a new approach to the description of woven reinforcing materials structure, reduced to modeling the trajectories of fibers and threads in an arbitrary weave structure using rectangular functions and helix equations based on simulation modeling of the individual fibers interaction. We describe a method which takes into account the relative location of each fiber inside the textile threads from which a given weave structure is constructed. This will allow to predict the ability of the reinforcing woven base to soak a polymer binder during the formation of polymer composite materials. The software has been developed in the Haskell functional programming language, which allows to depict a three-dimensional model of each fiber in a thread in the form of a line, a set of points or a tube of a given diameter. The results of modeling the geometric structure of woven materials are presented, proving the possibility of the developed modeling method practical application.

Ключевые слова: композиты, армирующие тканые материалы, математическое моделирование, программное обеспечение, 3D- модели.

Keywords: composites, reinforcing woven materials, mathematical modeling, software, 3D models.

Введение

Моделирование структуры текстильных материалов, близкой к его реальному строению, является актуальной задачей в области прогнозирования свойств армирующих основ для композитов. На сегодняшний день этому вопросу посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [1...7]. Большинство работ связано с разработкой геометрических моделей, позволяющих проводить виртуальные испытания

3D-тканых армирующих структур на начальных этапах их проектирования, что в свою очередь позволяет прогнозировать механические свойства новых изделий. Некоторые методы построения геометрической модели представляют ткань при помощи набора математических инструментов (матрицы, уравнения), увязывающих нити друг с другом. Часто применяется моделирование на основе метода конечных элементов. При использовании метода ко-

нечных элементов обычно моделирование идет на уровне нитей, а не на уровне отдельных волокон.

Целью работы является предложение нового подхода к описанию структуры ткани, сводящегося к моделированию траекторий волокон и нитей в произвольном ткацком переплетении с использованием прямоугольных функций и уравнений винтовой линии на основе имитационного моделирования взаимодействия отдельных волокон. Метод позволяет учитывать взаимное расположение каждого волокна внутри текстильных нитей, из которых построено заданное ткацкое переплетение, что позволит прогнозировать способность армирующей тканой основы пропитываться полимерным связующим при формировании полимерных композиционных материалов.

Методы

В армирующих тканях чаще всего используются главные (простые) переплетения – полотняное, саржевые, атласное сатиновое [8...10].

При моделировании ткацких переплетений требуется описать с помощью формул траекторию каждой нити. Для полотняного переплетения траектория нити будет хорошо описываться периодической функцией на основе функции \sin или \cos . Такой способ моделирования траекторий нитей был использован авторами в работе [4]. При необходимости моделирования переплетений отличных от полотняного, такой способ не будет работать.

В данной статье авторами предлагается универсальный способ моделирования траекторий нитей, задаваемых произвольным раппортом. Если рассмотреть траекторию нити в переплетении, отличном от полотняного, то можно заметить, что она является периодической, но длина участков на лицевой стороне и на изнаночной отличается. Для моделирования такой траектории необходима функция, позволяющая задавать соотношение между длиной участков на лицевой и изнаночной сторонах. Такие функции известны в физике и электронике, и это соотношение называется "скважность".

Для моделирования импульсной периодической функции с заданной скважностью и аппроксимации траектории нити в ткацком переплетении используем прямоугольные функции, которые описываются следующим выражением:

$$P(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } |t| > \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, & \text{if } |t| = \frac{1}{2} \\ 1, & \text{if } |t| < \frac{1}{2} \end{cases}. \quad (1)$$

Прямоугольную функцию можно представить как предел рациональной функции:

$$P(t) = \lim_{n \rightarrow \infty, n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{(2 \cdot t)^{2n} + 1}. \quad (2)$$

Для аппроксимации траектории нити в ткани можно задать некоторое небольшое n и, используя линейную комбинацию аппроксимаций прямоугольной функции, получить необходимую траекторию нити в переплетении (рис. 1 – комбинация аппроксимаций прямоугольной функции $P(t - 1) + 2 \cdot P(t - 3) + 0.7 \cdot P(2 \cdot (t - 5))$), описывающей траекторию нити с петлями в точках с координатами 1, 3 и 5).

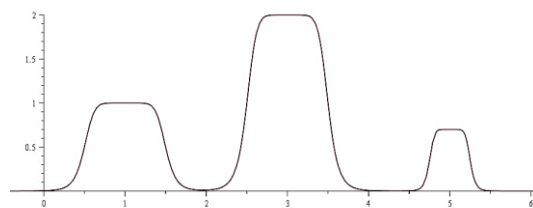


Рис. 1

Траектория каждого отдельного волокна в крученой нити может быть аппроксимирована винтовой линией с прямолинейной осью, направленной вдоль оси x :

$$\begin{cases} x = t, \\ y = \cos(t), \\ z = \sin(t). \end{cases} \quad (3)$$

Требуется построить винтовую линию с осью, проходящей по траектории, описываемой функцией (2) или линейной комбинацией

цией таких функций. Чтобы это осуществить, зададим функцию, вычисляющую вектор-нормаль к траектории в заданной точке и функцию, вычисляющую длину траектории от начальной точки до заданной:

$$n(t) = \begin{bmatrix} n(t)_x \\ n(t)_y \\ n(t)_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f'(t)}{\sqrt{(f'(t))^2 + 1}} \\ 1 \\ \frac{f'(t)}{\sqrt{(f'(t))^2 + 1}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $f(t)$ – функция траектории нити.

Функция, вычисляющая длину траектории:

$$l(t) = \int_0^t \sqrt{(f'(t))^2 + 1}. \quad (5)$$

Тогда, используя (2), (3), (4), (5), можно записать функцию для отдельного волокна в нити, описываемой ее траекторией в переплетении:

$$\text{fib}(t) = \begin{bmatrix} t + \sin(l(t))n(t)_x \\ \cos(l(t)) \\ f(t) + \sin(l(t))n(t)_z \end{bmatrix} \dots (6)$$

Введем дополнительные коэффициенты, позволяющие регулировать шаг витков винтовой линии, ее радиус, а также учитывать параметры смещения винтовой линии вдоль каждой из осей координат:

$$\begin{aligned} \text{fib2}(t, s, d, r) = \\ = \begin{bmatrix} t + s \sin(l(t)d + r_x)n(t)_x, \\ s \cos(l(t)d + r_x) + r_y, \\ f(t) + s \sin(l(t)d + r_x)n(t)_z + r_z, \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

где d – коэффициент, регулирующий число витков винтовой линии на единицу длины нити; s – коэффициент, задающий радиус винтовой линии; r – вектор смещений; r_x – смещение по оси x ; r_y – смещение по оси y ; r_z – смещение по оси z .

На рис. 2 изображена траектория отдельного волокна нити, заданная функцией $\Pi(t - 1) + 2(t - 3) + 0,7\Pi(2(t - 5))$.

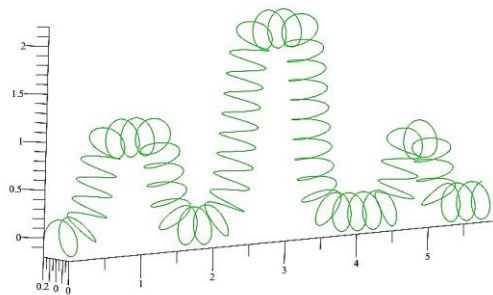


Рис. 2

На рис. 2 изображена траектория отдельного волокна нити, заданная функцией $\Pi(t - 1) + 2(t - 3) + 0,7\Pi(2(t - 5))$.

При имитационном моделировании участка ткани каждое волокно каждой нити представляется как конечное множество точек пространства, координаты которых определяются формулой (7).

Волокна имеют отличную от 0 толщину, поэтому при моделировании нескольких волокон одной и той же нити по формуле (7) с использованием генератора случайных чисел модели волокон будут геометрически пересекаться, что значительно снижает качество модели и применимость ее на практике. Для повышения качества модели необходимо учитывать физические взаимодействия между отдельными волокнами. Данную задачу предлагается решить в два этапа: на первом этапе генерируются траектории всех волокон по формуле (7) с использованием генератора случайных чисел; на втором этапе, с учетом толщины волокон, рассчитываются физические взаимодействия между волокнами в тех областях, где их модели пересекаются. После корректировки траектории уже не будут полностью соответствовать формуле (7), поэтому должны задаваться другим способом. Произвольная траектория задается дискретизацией с заданным шагом. Следовательно после первого шага моделирования будет проведена дискретизация и траектория каждого волокна будет представлена конечной последовательностью точек пространства с известными координатами. Исходную траекторию в таком случае можно аппроксимировать, проведя линию (ломаную или сглаженную) через эти точки. На

втором этапе моделирования будут корректироваться позиции отдельных точек траектории и таким образом можно выполнить все условия.

Для моделирования взаимодействия волокон между собой представим волокна как совокупность конечного множества упругих частиц. Каждая обладает собственным набором характеристик, на которые действуют внешние силы, под воздействием которых частицы изменяют свое положение в пространстве. Частицы находят положение, в котором действующие на них силы уравниваются друг другом. К характеристикам частиц будут относиться следующие: форма, размеры, связи с соседними частицами, положение в пространстве, масса. Силы, воздействующие на частицы, должны быть противоположно направленными, чтобы было возможно достижение равновесия.

На каждое волокно действует сила, стремящаяся распрямить его, и силы воздействия других волокон. Таким образом, если текстильная нить состоит из более чем одного волокна, они не смогут полностью распрямиться, так как будут воздействовать друг на друга и отталкиваться. Найдя точку равновесия в этом взаимодействии, мы получим реалистичную модель нити или ткани.

Чтобы смоделировать силу, стремящуюся распрямить волокно, рассмотрим дифференциальное уравнение затухающих колебаний струны:

$$a^2 \Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - d \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (8)$$

где u – функция траектории струны; a – фазовая скорость; d – коэффициент затухания колебаний; Δ – оператор Лапласа.

Решая это нестационарное уравнение численно, получим геометрические положения частиц волокна с заданными шагами по оси времени. Начальное условие для дифференциального уравнения будет соответствовать начальному положению частиц волокна.

Для моделирования силы отталкивания между частицами волокон, нужно для каж-

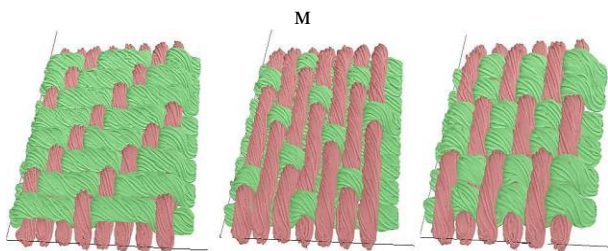
дой найти "соседей" – частицы, которые лежат в непосредственной близости от рассматриваемой и при этом сферы, с радиусами равными радиусам волокон и центрами соответствующими положениям частиц, пересекаются. Чем сильнее пересекаются сферы, тем больше должна быть сила отталкивания. Для поиска "соседей" выбранной частицы требуется найти расстояния до всех частиц, которые не принадлежат одному и тому же волокну. Если это расстояние меньше суммы радиусов волокон, которым принадлежат две частицы, то на исходную частицу должна действовать сила отталкивания, направленная вдоль прямой, на которой лежат центры этих частиц, и пропорциональная разности между суммой радиусов и расстоянием между центрами.

Для оптимизации перебора частиц при поиске "соседей" в трехмерном пространстве применим "октодерево" или "восьмеричное дерево" – специальную структуру хранения данных, которая позволяет ускорить процесс поиска элементов, принадлежащих окрестности заданной точки в трехмерном пространстве. Идея восьмеричного дерева состоит в том, что начальная область, включающая в себя все точки, делится на восемь "октантов" – параллелепипедов равного размера. Все множество точек делится на восемь частей по признаку принадлежности определенному октанту. Определение принадлежности точки октанту выполняется очень быстро, так как грани октантов параллельны координатным плоскостям. Далее, те октанты, количество точек в которых превышает определенный порог, также делятся на восемь частей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока количество точек в каждой области не будет меньше заданного порога. Таким образом, восьмеричное дерево представляет собой рекурсивную структуру. После того, как дерево построено и все точки распределены по листьям этого дерева, можно осуществлять поиск точек в заданной окрестности от выбранной. Древоподобная структура позволяет значительно ускорить поиск, и сложность поиска при увеличении количества точек возрастает медленно.

После определения списка "соседей" выбранной частицы, для упрощения нахождения результирующей силы отталкивания, действующей на выбранную частицу, найдем центр масс всех частиц-соседей. Результирующая сила действует в направлении от центра масс. Таким образом, требуется определять только расстояние от центра масс до выбранной точки, а не расстояния от всех точек-соседей, что значительно уменьшает объем расчетов.

Результаты и обсуждения

Для моделирования участка ткани с заданным раппортом разработано программное обеспечение на языке функционального программирования Haskell. Программное обеспечение позволяет изобразить трехмерную модель каждого волокна в нити в виде линии, совокупности точек или трубочки заданного диаметра. На рис. 3 (3D-модели текстильных переплетений: а) саржевое; б) сатиновое; в) репсовое) изображены модели различных переплетений, полученные с использованием разработанного программного обеспечения.



ВЫВОДЫ

Разработан универсальный метод моделирования траекторий волокон и текстильных нитей в произвольном ткацком переплетении с использованием прямоугольных функций и уравнений винтовой линии. Метод реализован в программном обеспечении, позволяющем смоделировать участок тканой армирующей основы с заданным раппортом для исследования процесса пропитки связующими при формировании полимерных волокнистых композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen X.* Modelling and Predicting Textile Behaviour. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.

2. *Lomov S.V., Huysmans G., Verpoest I.* Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models // *Textile Research Journal*. – №71, 2001. P.34...43.

3. *Севостьянов П.А.* Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств. – М.: Тисо Принт, 2014.

4. *Ясинская Н.Н., Бизюк А.Н., Разумеев К.Э.* Моделирование структуры текстильных материалов для формирования слоистых композитов // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2018, №378. С.273...277.

5. *Киселев А.М., Хамматова В.В., Киселев Н.В.* Разработка математической модели структуры 3D-тканей // *Дизайн и технологии*. – 2019, № 111. С.82...88.

6. *Колесников П.Н., Иванов А.Н., Хамматова Э.А., Киселев А.М.* Компьютерные трехмерные модели текстильных материалов полотняного переплетения // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014, № 9. С.49...51.

7. *Бенецкая В.В., Селиверстов В.Ю., Киселев А.М., Рудовский П.Н., Киселев М.В.* Моделирование структуры тканей // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2013, № 345. С.23...28.

8. *Перепелкин К.Е.* Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб : Научные основы и технологии, 2009.

9. *Трещалин Ю.М.* Композиционные материалы на основе нетканых полотен. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015.

10. *Vazeko V.V., Yasinskaya N.N.* Analysis of the structure of the textile reinforcement of a composite material // *Fibre Chemistry*. – 2014, № 4. С.245...249.

REFERENCES

1. *Chen X.* Modeling and Predicting Textile Behaviour. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.

2. *Lomov S.V., Huysmans G., Verpoest I.* Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models // *Textile Research Journal*. - No. 71, 2001. P.34 ... 43.

3. *Sevostyanov P.A.* Computer modeling in the problems of research of textile materials and industries. – М.: Tiso Print, 2014.

4. *Yasinskaya N.N., Bizyuk A.N., Razumeev K.E.* Modeling the structure of textile materials for the formation of layered composites // *Izv. universities. Technology of the textile industry*. - 2018, No. 378. P.273...277.

5. *Kiselev A.M., Khammatova V.V., Kiselev N.V.* Development of a mathematical model of the structure of 3D tissues // *Design and technology*. - 2019, No. 111. P. 82 ... 88.

6. *Kolesnikov P.N., Ivanov A.N., Khammatova E.A., Kiselev A.M.* Computer three-dimensional models of plain weave textile materials // *Bulletin of the Kazan Technological University*. - 2014, No. 9. P. 49 ... 51.

7. *Benetskaya V.V., Seliverstov V.Yu., Kiselev A.M., Rudovsky P.N., Kiselev M.V.* Modeling of tissue

structure // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2013, No. 345. P. 23 ... 28.

8. Perepelkin K.E. Reinforcing fibers and fibrous polymer composites. - St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2009.

9. Treshchalin Yu.M. Composite materials based on non-woven fabrics. - M.: Moscow State University. M.V. Lomonosov, 2015.

10. Bazeko V.V., Yasinskaya N.N. Analysis of the structure of the textile reinforcement of a composite material // Fiber Chemistry. - 2014, No. 4. P. 245 ... 249. 1. Chen X. Modeling and Predicting Textile Behavior. - Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.

2. Lomov S.V., Huysmans G., Verpoest I. Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models // Textile Research Journal. - No. 71, 2001. P.34 ... 43.

3. Sevostyanov P.A. Computer modeling in the problems of research of textile materials and industries. - M.: Tiso Print, 2014.

4. Yasinskaya N.N., Bizyuk A.N., Razumeev K.E. Modeling the structure of textile materials for the formation of layered composites // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2018, No. 378. P.273...277.

5. Kiselev A.M., Khammatova V.V., Kiselev N.V. Development of a mathematical model of the structure of 3D tissues // Design and technology. - 2019, No. 111. P. 82 ... 88.

6. Kolesnikov P.N., Ivanov A.N., Khammatova E.A., Kiselev A.M. Computer three-dimensional models of plain weave textile materials // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2014, No. 9. P. 49 ... 51.

7. Benetskaya V.V., Seliverstov V.Yu., Kiselev A.M., Rudovsky P.N., Kiselev M.V. Modeling of tissue structure // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2013, No. 345. P. 23 ... 28.

8. Perepelkin K.E. Reinforcing fibers and fibrous polymer composites. - St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2009.

9. Treshchalin Yu.M. Composite materials based on non-woven fabrics. - M.: Moscow State University. M.V. Lomonosov, 2015.

10. Bazeko V.V., Yasinskaya N.N. Analysis of the structure of the textile reinforcement of a composite material // Fiber Chemistry. - 2014, No. 4. P. 245 ... 249..

Рекомендована кафедрой экологии и химических технологий. Поступила 18.10.21.

УДК 677.024.1

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_237

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОБЪЕМНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ 3D-ТКАНЕЙ УГЛЕРОДНЫМИ НИТЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОКСЕЛЬНОГО ПОДХОДА К ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

THEORETICAL CALCULATION OF VOLUMETRIC FILLING 3D FABRICS WITH CARBON FILAMENTS USING A PROMISSORY NOTE APPROACH TO THEIR DESIGN

H.B. КИСЕЛЁВ, М.В. КИСЕЛЕВ, А.Б. БАЛАШОВ, С.Е. ГОЛУБЕВ

N.V. KISELEV, M.V. KISELEV, A.B. BALASHOV, S.E. GOLUBEV

(ООО НПО "Программируемые Композиты", Россия)

(ООО NPO "Programmable Composites" LLC, Russia)

E-mail: kstu-tplv@yandex.ru; kisselev50@mail.ru; balashovandrej@yandex.ru; golubev007@mail.ru

Статья посвящена исследованию влияния объемного заполнения преформы композиционного материала углеродной нитью с точки зрения его механической прочности. Наиболее актуальна данная задача для технологии 3D-ткачества, где заполнение углеродной нитью происходит по всем трем координатным осям. Для построения аналитической модели объемного заполнения 3D-тканей использован воксельный подход. Разработана математическая модель заполнения объема вокселя углеродными нитями

для 3D-ткачества. В качестве упрощающих допущений при построении модели выбран один тип поперечного сечения углеродной нити в форме окружности. Выполнено исследование разработанной модели с точки зрения выбора различных диаметров армирующих нитей для получения наибольшего объемного заполнения вокселя углеродными нитями. Сделаны выводы по работе.

The article is devoted to the study of the volumetric filling influence of the composite material preform with a carbon filament from the standpoint of its mechanical strength. This task is the most relevant one for 3D weaving technology, where filling with carbon thread occurs along all three coordinate axes. A voxel approach was used to construct an analytical model of 3D tissues volumetric filling. A mathematical model of filling the voxel volume with carbon filaments for 3D weaving has been developed. As simplifying assumptions in the construction of the model, one type of a carbon filament cross-section in the form of a circle was chosen. The study of the developed model is carried out from the standpoint of choosing different diameters of reinforcing filaments to obtain the largest volume filling of the voxel with carbon filaments. Conclusions are made.

Ключевые слова: композиционные материалы, 3D-ткачество, углеродная нить, математическое моделирование, прочность.

Keywords: composite materials, 3D weaving, carbon filament, mathematical modeling, strength.

К композиционным материалам, особенно производимым на основе высокомодульных и высокопрочных химических волокон и нитей, и изделиям, изготавливаемым из них, предъявляются высокие требования к эксплуатационным характеристикам. При этом наиболее важной эксплуатационной характеристикой композиционных материалов является их прочность при различных напряженно-деформированных состояниях, характерных для условий работы изделия. Для повышения прочности композиционных материалов используют различные армирующие нити, их структуры, технологии изготовления и др. В данной статье выполнено исследование зависимости коэффициента объемного заполнения композита от линейных плотностей углеродных армирующих нитей с целью обеспечения максимального значения коэффициента объемного заполнения.

Влияние коэффициента объемного заполнения композита армирующими нитями на его прочность известно [1] и является прямопропорциональным. Такой же вывод

можно сделать, и анализируя аналитическую зависимость напряжения от объемного заполнения композита армирующими нитями и связующим [2...7], используемую при гомогенизации свойств композита:

$$\sigma = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m, \quad (1)$$

где σ – напряжение в композиционном материале; σ_f – напряжение в материале армирующих нитей; σ_m – напряжение в материале связующего; V_f – объем армирующих нитей в композиционном материале; V_m – объем связующего в композиционном материале.

Для решения поставленной задачи построения модели объемного заполнения 3D-ткани применим воксельный подход к описанию геометрической структуры 3D-ткани, описанной в [8], [9]. Тогда задача сводится к определению объема армирующих нитей, расположенных в пространстве по всем координатным осям в одном вокселе. В качестве упрощающего допущения примем три перекрещивающиеся группы

армирующих нитей с постоянными размерами поперечного сечения в форме круга. Постановка задачи графически представлена на рис. 1 (геометрическая модель вокселя с тремя армирующими нитями для процесса 3D-ткачества).

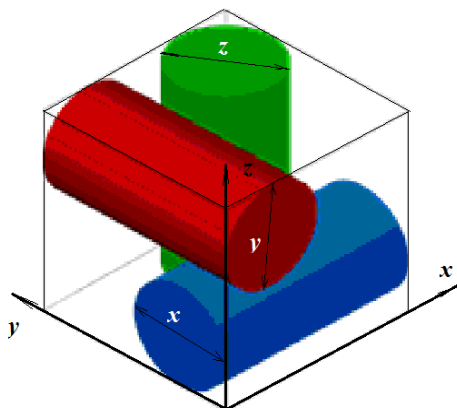


Рис. 1

Обозначим диаметры нитей x , y , z . Из рис. 1 следует, что длина нити диаметром x и, одновременно, размер вокселя по оси x , составляют $y + z$. Длина нити диаметром y и размер вокселя по оси y составляют $x + z$, а длина нити диаметром z и размер вокселя по оси z составляют $x + y$.

Тогда полный объем вокселя определится так:

$$V = (x + y)(y + z)(x + z), \quad (2)$$

Найдем производную данной функции

$$f'(x,y) = \frac{2[x + y + x^2 \cdot (y + 1) + y^2 \cdot (x + 1)]}{(x + 1) \cdot (y + 1) \cdot (x + y)^3} + \frac{x + y + x^2 \cdot (y + 1) + y^2 \cdot (x + 1)}{(x + 1) \cdot (y + 1)^2 \cdot (x + y)^2} +$$

$$\frac{x + y + x^2 \cdot (y + 1) + y^2 \cdot (x + 1)}{(x + 1)^2 \cdot (y + 1) \cdot (x + y)^2} + \frac{x + y + x^2 \cdot (y + 1) + y^2 \cdot (x + 1)}{(x + 1)^2 \cdot (y + 1)^2 \cdot (x + y)}$$

$$\frac{2 \cdot y \cdot (x + 1) + x^2 + 1}{(x + 1) \cdot (y + 1) \cdot (x + y)^2} - \frac{2 \cdot y \cdot (x + 1) + x^2 + 1}{(x + 1)^2 \cdot (y + 1) \cdot (x + y)}$$

$$\frac{2 \cdot x \cdot (y + 1) + y^2 + 1}{(x + 1) \cdot (y + 1) \cdot (x + y)^2} - \frac{2 \cdot x \cdot (y + 1) + y^2 + 1}{(x + 1) \cdot (y + 1)^2 \cdot (x + y)}$$

$$\frac{2 \cdot x + 2 \cdot y}{(x + 1) \cdot (y + 1) \cdot (x + y)}. \quad (6)$$

а суммарный объем нитей:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} [(y + z)x^2 + (x + z)y^2 + (x + y)z^2]. \quad (3)$$

Для коэффициента заполнения получается следующее выражение:

$$K = V_1/V = \frac{\pi [(y + z)x^2 + (x + z)y^2 + (x + y)z^2]}{4(x + y)(y + z)(x + z)}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем функцию трех переменных x , y и z , для которой необходимо найти максимум. Чтобы несколько упростить решение, примем диаметр одной из нитей за константу, положив его равным единице. При этом x и y можно рассматривать как безразмерный диаметр, то есть отношение диаметров каждой из двух нитей к диаметру третьей. Можно также опустить множитель $\pi/4$, так как он влияет только на значение функции в точке максимума, но не влияет на его координаты x и y . Тогда соответствующая целевая функция примет вид:

$$f(x,y) = \frac{(y + 1)x^2 + (x + 1)y^2 + (x + y)}{(x + y)(y + 1)(x + 1)}. \quad (5)$$

по x и y в среде MathCAD:

Для нахождения экстремума функции (5) выражение (6) нужно приравнять к нулю и найти корни соответствующего уравнения. Однако MathCAD не может найти корни данного уравнения. Можно также воспользоваться функциями Maximize и Minimize, находящими точки максимума и минимума функции. Применяя их непосредственно к функции (5), получаем, что максимальное значение коэффициента заполнения вокселя нитью имеет место, если x и y равны нулю.

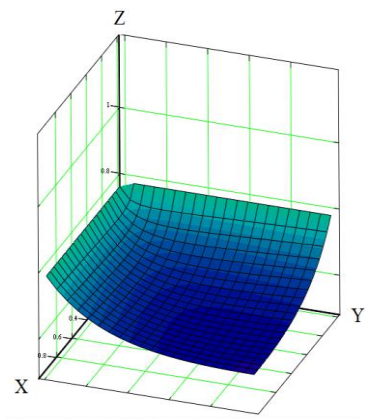


Рис. 2

Таким образом, для достижения максимального заполнения вокселя нитью необходимо, чтобы диаметры двух из трех нитей системы равнялись нулю, то есть были несоизмеримо меньше третьей нити, что на практике недостижимо и бессмысленно. Напротив, как показывает расчет в MathCAD, наименьший коэффициент заполнения получается при равенстве диаметров всех нитей системы.

Непосредственное наблюдение поверхности функции (4) (рис. 2 – поверхность функции коэффициента заполнения) подтверждает данный вывод. Однако в целом для данной модели вокселя область значений коэффициента заполнения составляет $[0,589; 0,785]$, то есть минимальный коэффициент заполнения, имеющий место при одинаковом диаметре всех нитей, составляет 75% от максимального. Если же две нити имеют одинаковый диаметр, то влияние диаметра третьей нити системы изменяет коэффициент заполнения в том же диапазоне (рис. 3 – изменение коэффици-

ента заполнения вокселя в зависимости от диаметра третьей нити при единичном диаметре двух других).

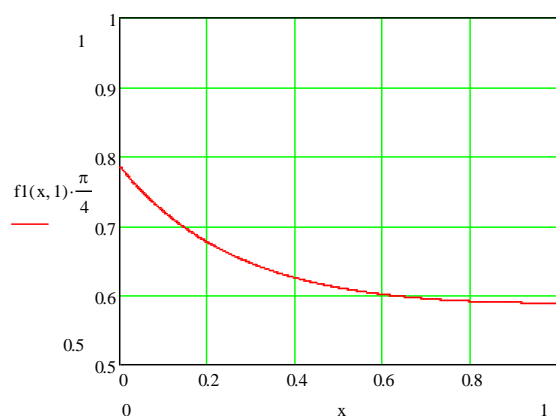


Рис. 3

Выполненные исследования целевой функции объемного заполнения вокселя тремя системами нитей, характерных для значения процесса 3D-ткачества, позволяют выбрать их линейных плотностей для обеспечения максимального значения в вокселе, а значит и во всей армирующей структуре композиционного материала или изделия.

ВЫВОДЫ

Разработана и исследована математическая модель коэффициента заполнения вокселя армирующими нитями для 3D-ткачества, позволяющая выбрать оптимальные значения их линейных плотностей для обеспечения максимальной прочности композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hull D., Clyne T.W. An introduction to composite materials. – Cambridge, 1981.
2. Daniel Isaac M., Ishai Ori. Engineering mechanics of composite materials. – New York, Oxford university press, 2006.
3. Guenther Lutz. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] – 2014. // Access mode - <https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guideline-pdf>. Access date 21.05.2021.
4. Topal S., Ogin S., Crocombe A. Finite element modelling of a non-crimp 3-dorthogonal woven compo-

site // 11th world congress on computational mechanics (WCCM XI). – July 20 - 25, 2014.

5. *Behera B.K., Mishra R.* 3-dimensional weaving // Indian journal of fibre & textile research. – №33, 2008. P. 274...287.

6. *Fredrik S.* 3D-woven reinforcement in composites // KTH school of engineering sciences. – Stockholm, 2012.

7. *McHugh C.* Improving output rates of constant cross section carbon fiber woven 3D profiles. – 2011.

8. *Киселев А.М.* Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения: Дис. ... докт. техн. наук. – Казань, 2019.

9. *Балашов А.Б.* Методология расчета свойств композиционных материалов на основе 3D-тканых структур с использованием воксельного подхода // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, №4. С. 195...203.

REFERENCES

1. Hull D., Clyne T.W. An introduction to composite materials. – Cambridge, 1981.

2. Daniel Isaac M., Ishai Ori. Engineering mechanics of composite materials. – New York, Oxford university press, 2006.

3. Guenther Lutz. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] – 2014. // Access mode -

<https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guide-line-pdf>. Access date 05/21/2021.

4. Topal S., Ogin S., Crocombe A. Finite element modeling of a non-crimp 3-dorthogonal woven composite // 11th world congress on computational mechanics (WCCM XI). – July 20 - 25, 2014.

5. *Behera V.K., Mishra R.* 3-dimensional weaving // Indian journal of fiber & textile research. - No. 33, 2008. P. 274 ... 287.

6. *Fredrik S.* 3D-woven reinforcement in composites // KTH school of engineering sciences. – Stockholm, 2012.

7. *McHugh C.* Improving output rates of constant cross section carbon fiber woven 3D profiles. – 2011.

8. *Kiselev A.M.* Development of a methodology for designing geometric structures and predicting the properties of textile materials of a three-dimensional structure: Dis. ... doc. tech. Sciences. – Kazan, 2019.

9. *Balashov A.B.* Methodology for calculating the properties of composite materials based on 3D-woven structures using the voxel approach. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2021, No. 4. pp. 195...203.

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО НПО "ПК". Поступила 29.12.21.

УДК 69.059

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_242

**УСИЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**TEXTILE INDUSTRY BUILDING STRENGTHENING
WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS**

В.И. РИМШИН, В.Л. КУРБАТОВ, Е.С. КЕЦКО, П.С. ТРУНТОВ

V.I. RIMSHIN, V.L. KURBATOV, E.S. KETSKO, P.S. TRUNTOV

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
Северо-Кавказский филиал Белгородского государственного
технологического университета им. В.Г. Шухова)

(National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Scientific-Research Institute of Building Physics
of the Russian Academy Architecture and Construction Sciences,
North Caucasus branch of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov")

E-mail: v.rimshin@niisf.ru; kurbatov_bgtu@list.ru; kkuzzina@mail.ru; pavel_truntov@mail.ru

В статье рассмотрен один из самых эффективных и инновационных способов проектирования усиления железобетонных ребристых плит покрытия производственных зданий предприятий текстильной промышленности. Рассмотренный способ заключается в выполнении внешнего армирования ребер плит перекрытия с использованием композитных материалов на основе углеродных волокон. Рассмотрено промышленное здание, представляющее собой одноэтажный каркас с железобетонными колоннами и металлическими фермами. Сборные железобетонные ребристые плиты опираются на металлические фермы с шагом 6 м и имеют габариты 2,98x0,3x5,97 м. Необходимость усиления вызвана пониженной фактической прочностью бетона. Представлены физико-механические характеристики используемых материалов усиления. Произведен поверочный расчет с учетом фактической средней прочности бетона. Расчет производился по деформационной модели с учетом физической нелинейности бетона, а также с учетом напряженно-деформированного состояния конструкции до усиления. По результатам расчета усиления с применением композитных материалов на основе углеродных волокон было установлено необходимое количество применяемого для усиления материала, а также сделаны обобщающие выводы.

The article is devoted to one of the most effective and innovative ways of designing the reinforced concrete ribbed slabs strengthening of textile industry buildings. The considered method consists in external reinforcement of floor slabs ribs using composite materials based on carbon fibers. The industrial building is considered. It is a one-story frame building with reinforced concrete columns and metal trusses. Prefabricated reinforced concrete ribbed slabs are based on metal trusses with a pitch of 6 m and have dimensions 2.98x0.3x5.97 m. This strengthening method is caused by the reduced actual concrete strength. The reinforcement materials physical and mechanical characteristics are presented. A verification calculation was carried out, the actual average concrete strength being taken into account. The calculation was done according to the deformation model, also the physical nonlinearity, as well as the stress-strain state of the structure before strengthening were considered. Based on the calculating results of strengthening using composite materials with carbon fibers base, the required amount of material used for reinforcement was determined, and general conclusions were drawn.

Ключевые слова: композитные материалы, углеродное волокно, усиление конструкций, обследование производственных зданий, текстильная промышленность.

Keywords: composite materials, carbon fiber, structural reinforcement, industrial buildings surveying, textile industry.

Введение

Здания предприятий текстильной промышленности имеют ряд особенностей эксплуатации – повышенные требования к температурно-влажностному режиму и чистоте воздуха производственных помещений, размещение цехов с определенными технологическими процессами, большие пространства внутри зданий, обеспечение непрерывного и безопасного процесса производства. В связи с этим одним из самых эффективных, современных и удовлетворяющих всем требованиям к зданиям предприятий текстильной промышленности способом восстановления эксплуатационных параметров железобетонных строительных конструкций является усиление углеволокном, применение композитных углепластиковых материалов. Необходимость восстановления или усиления строительных конструкций определяется путем проведения технического обследования здания [1...5].

В данной статье рассмотрен вариант проектирования усиления железобетонной ребристой плиты покрытия здания с применением композитных материалов на основе

углеродного волокна в виде внешнего армирования.

Учитывая особенности эксплуатации зданий предприятий текстильной промышленности, наиболее распространенными дефектами и повреждениями железобетонных ребристых плит покрытия являются нормальные и наклонные трещины, появляющиеся из-за снижения прочности бетона, коррозия арматуры в результате нарушения защитного слоя бетона и воздействия агрессивных сред. Также одними из характерных повреждений являются сколы бетона с оголением арматуры, возникающие из-за механических повреждений при эксплуатации здания. Вследствие воздействия агрессивных сред, попеременного увлажнения и высыхания возникают шелушения поверхностей и отслоение лещадок бетона.

Конструктивная схема рассматриваемого здания представляет собой одноэтажный каркас с железобетонными колоннами и металлическими фермами. Пространственная жесткость здания в поперечном направлении обеспечивается рамами, а в продольном направлении диском покрытия и вертикальными связями между колоннами.

В большепролетном здании сборные железобетонные ребристые плиты опираются на металлические фермы с шагом 6 метров. Фермы опираются на железобетонные колонны.

В ходе проведения технического обследования здания была выявлена необходимость усиления ребер плит покрытия. Выявленная необходимость усиления была вызвана пониженной фактической прочностью бетона плиты покрытия [6...8].

В качестве исходных данных для проектирования были использованы:

- проектная и исполнительная документация на исследуемое здание;
- материалы заключений о фактической прочности бетона.

Материалы и методы

Усиление ребер плиты покрытия предусматривается путем наклеивания внешнего армирования из высокопрочных композитных материалов на основе углеродных волокон [9...10].

Углеродное покрытие в виде ткани характеризуется повышенным модулем упругости и значительной прочностью на разрыв. Оно не подвержено коррозии и позволяет увеличивать несущую способность конструкций без увеличения размеров сечений элементов. Физико-механические свойства по данным производителя представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Свойство	Значение
Прочность на разрыв, МПа	>4800
Модуль упругости Ю МПа	230000
Относительная деформация при разрыве, %	2,1
Адгезия к бетону, МПа	>3
Плотность, г/м ²	300
Толщина сухого покрытия, мм	0,167
Площадь сопротивления на единицу ширины в 1 м, мм ²	167,6

Углеродное покрытие устанавливается "сухим" способом, с применением следующих составов:

- эпоксидный грунт для подготовки основания;
- шпаклевка для выравнивания поверхности и заделки отверстий;
- пропитка для укладки покрытия "сухим" способом;
- жидкий эпоксидный двухкомпонентный состав, не содержащий растворителей;
- гиксотропная двухкомпонентная шпаклевка на эпоксидной основе из мелкофракционных наполнителей и специальных добавок;
- полимерный эпоксидный состав средней вязкости, не содержащий растворителей, для пропитки покрытия и укладки покрытия "сухим" способом [11...15].

Метод усиления плиты покрытия с применением композитных материалов на основе углеродных тканей применен в виде внешнего армирования.

Данная методика усиления повышает трещиностойкость изгибаемых элементов и уменьшает прогибы за счет совместной работы растянутого бетона и внешней арматуры, распределенной по поверхности бетона [16...18].

Для определения площади поперечного сечения внешнего армирования из композитных материалов был проведен поверочный расчет участка покрытия с учетом фактической средней прочности бетона, полученной по данным технического обследования рассматриваемых конструкций. Расчет проводился по деформационной модели с учетом физической нелинейности бетона и учетом напряженно-деформированного состояния конструкции, полученной до усиления [19], [20].

Результаты и обсуждения

Предварительный расчет ребристой плиты шириной 2,98 м, высотой 0,3 м, длиной 5,97 м:

$$b'_f = 2,98 - 2 \times 0,015 = 2,95 \text{ м,}$$

$$h_0 = 270 \text{ мм} = 0,27 \text{ м,}$$

$$b = 0,075 \times 2 = 0,15 \text{ м,}$$

Постоянная нагрузка на плиту покрытия приведена в табл. 2 (сбор нагрузок на плиту покрытия).

$$\begin{aligned} & \text{- вес плиты на } 1 \text{ м}^2 \text{ площади } g_{пл} = \\ & = 1,5 \dots 2,0 \text{ кН/м}^2 \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 2

№	Вид нагрузки	Нормированная нагрузка, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка, кН/м ²
1	Рулонный материал, 10 рулонов	0,50	1,2	0,60
2	Цементная стяжка, h=0,046 м	0,828	1,3	1,08
3	Утеплитель, h=0,046 м	1,80	1,2	1,96
4	Железобетонная плита	2,00	1,1	2,20
5	Итого постоянная нагрузка	4,13	-	4,84
6	Снег	1,29	1,4	1,80
7	Всего	5,42	-	6,64

Класс бетона В22,5, R_b = 13,2 МПа.

Расчетный пролет b₀ = 6,0 – 0,1 = 5,9 м.

Определение площади и класса рабочей арматуры:

$$M = \frac{q \ell_0^2}{8} = \frac{2,95 \cdot 6,64 \cdot 5,90^2}{8} = 85,3 \text{ кН} \cdot \text{м;}$$

$$A = \frac{M}{R_b h_0^2 b'_f} = \frac{85,3}{13200 \cdot 2,95 \cdot 0,27^2} = 0,030;$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2A} = 1 - \sqrt{1 - 0,060} = 0,031,$$

Нейтральная ось проходит в полке:

$$\eta = 1 - 0,5\xi = 1 - 0,5 \cdot 0,031 = 0,985.$$

При арматуре класса А400:

$$A_s = \frac{M}{R_s h_0 \eta} = \frac{85,3}{360000 \cdot 0,27 \cdot 0,985} = 0,000891 \text{ м}^2,$$

2Ø25 мм.

При арматуре класса А500:

$$A_s = \frac{85,3}{500000 \cdot 0,27 \cdot 0,985} = 0,000641 \text{ м}^2,$$

2Ø20 мм

$$A_s = 0,000628 \text{ м}^2.$$

Определение фактической несущей способности плиты:

$$\begin{aligned} M^f &= R_s^f A_s^f h_0 \eta = 454600 \cdot 0,000534 \cdot 0,27 \times 0,986 = \\ &= 64,6 \text{ кН} \cdot \text{м} < M^p = 85,3 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Несущая способность уменьшена на 25...30%.

Расчет усиления с применением композитных материалов на основе углеродных волокон

Толщина применяемой углеволоконной ткани – 0,167 мм, ширина – 300 мм.

$E_i = 230$ ГПа; $R_i = 4800$ МПа, $\varepsilon_i = 1,6\%$.

Рассматриваемым материалом планируется выполнить усиление сборных железобетонных ребристых плит шириной 2980 мм, высотой 300 мм и длиной 5970 мм.

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta \ell}{5950} = \frac{0,016 \cdot 5950}{5950} = 16 \times 10^{-3};$$

$$R_{ft} = \frac{C_E R_F}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 4800}{1,1} = 3927 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{ft} = \frac{C_E \varepsilon_f}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 0,016}{1,1} = 0,0131;$$

$$E_{ft} = E'_f = \frac{R_f}{\varepsilon_f} = \frac{4800}{0,016} = 300000 \text{ МПа} = 300 \text{ ГПа};$$

$$R_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{ft}} \left(1 - \frac{n E_{ft} t_f}{360000} \right) = \frac{1}{60 \cdot 0,0131} \left(1 - \frac{3 \cdot 300000 \cdot 0,167}{360000} \right) = 0,76 < 0,9;$$

$$\varepsilon_{fu} = K_m \varepsilon_{ft} = 0,76 \cdot 0,0131 = 8,384 \cdot 10^{-3};$$

$$\sigma_{fu} = E'_f \varepsilon_{fu} = 300000 \cdot 8,384 \times 10^{-3} = 2515,2 \text{ МПа} = R_{fu}.$$

Высота сжатой зоны элемента с усилением:

$$x = \frac{R_{fu} A_f + R_s^f A_s^f}{R_b^f \times h_f'};$$

$$M_{ubt} = A_f R_{fu} (h - 0,5x) + A_s^f R_s^f (h_0 - 0,5x) = A_f R_{fu} h + A_s^f R_s^f h_0 - 0,5(A_f \times R_{fu} + A_s^f R_s^f);$$

$$x = \frac{A_f R_{fu} h + A_s^f R_s^f h_0 - M_{ubt}}{0,5 \times (A_f R_{fu} + A_s^f R_s^f)};$$

$$\frac{25152 A_f + 4546 \cdot 5,34}{107 \cdot 295} = \frac{A_f \cdot 25152 \cdot 30 + 4546 \cdot 5,34 \cdot 27 - 853000}{0,5 \cdot (25152 A_f + 4546 \cdot 5,34)};$$

$$0,80 A_f + 0,77 = \frac{62,17 A_f - 16,28}{1,04 A_f + 1};$$

$$(0,80 A_f + 0,77)(1,04 A_f + 1) = 62,17 A_f - 16,28;$$

$$0,832 \times A_f^2 + 0,80 A_f + 0,80 A_f + 0,77 = 62,17 A_f - 16,28;$$

$$0,832 A_f^2 - 60,57 A_f + 17,05 = 0;$$

$$A_f = \frac{60,57 - \sqrt{60,57^2 + 4 \cdot 0,832 \cdot 17,05}}{2 \cdot 0,832} = 0,28 \text{ см}^2;$$

$$\delta = \frac{A_f}{\ell} = \frac{0,28}{7,5} = 0,04 \text{ см} = 0,4 \text{ мм}.$$

По результатам расчета усиления ребристой плиты необходимо принять 3 слоя

ткани толщиной 0,167 мм с характеристиками, приведенными в табл. 1. Излишние

усиления конструкций могут привести к неожиданным схемам разрушения. Поэтому необходимо придерживаться рациональной степени усиления в диапазоне 10...60% от начальной несущей способности усиливаемой конструкции. Схема усиления ребристой плиты перекрытия с использованием композитных материалов на основе углеродного волокна представлена на рис. 1.

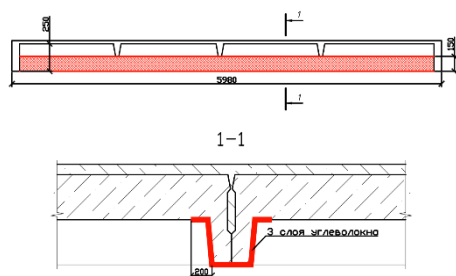


Рис. 1

ВЫВОДЫ

В результате усиления обеспечиваются нормативные требования по деформативности и несущей способности конструкций покрытия при фактической пониженной прочности бетона.

Для выполнения усиления в зданиях предприятий текстильной промышленности необходимо выполнить очистку поверхности железобетонных плит, устранить имеющиеся дефекты и повреждения (при наличии). Затем поверхность обрабатывается праймером, состоящим из 2-компонентной грунтовки на эпоксидной основе. Применение данной грунтовки обеспечивает пломбирование пористости и возможные воздушные пустоты, а также гарантирует хорошее сцепление слоев материала усиления к поверхности усиливаемой конструкции.

Вследствие высокой эффективности усиления с применением композитных материалов на основе углеволокна при проектировании необходимо учитывать индивидуальный подход к каждой усиливаемой плите.

Проектирование усиления плит необходимо начинать с минимально тонкой ткани, постепенно увеличивая ее толщину и коли-

чество слоев. Не рекомендуется проектировать усиления конструкций на величину, превышающую 60% ее несущей способности. При увеличении этого порога необходимо проверять несущую способность конструкции на совместное действие момента и поперечной силы в опасных сечениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rumyantseva V.E, Konovalova V.S. Composite reinforcement as a way to increase the durability of building structures // Key Engineering Materials. – 2020, №869, P. 336...341.
2. Erofeev V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments // Procedia Engineering. – № 165, 2016. P. 1444...1447.
3. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S, Goglev I.N. The influence of structure formation conditions of the composite on the mass transfer processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". – 2020, P. 042047.
4. Жуков Е.М., Кропотов Ю.И., Лугинин И.А., Полошков С.И., Легаева Л.А. Коррозия железобетонных конструкций и причины ее возникновения // Молодой ученый. – 2016, №7, С.78...80.
5. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., Narmaniya B. E. Joint work of cement concrete and composite reinforcement with periodic profile winding // Materials Science Forum. – 2020, № 974. P.119...124.
6. Кузьменко В.А., Одинцова О.И., Русанова А.И. Свойства синтетических полиэлектролитов и перспективы их применения для отделки текстильных материалов // Журнал прикладной химии. – 2014. Т.87, № 9. С. 1193...1203.
7. Римшин В.И., Варламов А.А. Трехмерная модель упругого поведения композита // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 3. С. 63...68.
8. Varlamov A.A., Tverskoi S.Y., Gavrilov V.B. Charting standard concrete based on the theory of degradation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. P. 022030.
9. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of Concrete Beams with the Use of Carbon Fiber // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019, № 983. P.911...919.
10. Овчинников И.И., Мигунов В.Н. Долговечность железобетонной балки в условиях хлоридной агрессии // Строительные материалы. – 2012, № 8. С.76...84.
11. Римшин В.И., Пудова А.А., Шубин Л.И. Оценка эффективности использования фотоэлектрических систем при эксплуатации жилого дома // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 3. С. 287...293.
12. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспе-

чения долговечности железобетонных конструкций // Академия. Архитектура и строительство. – 2015, №1. С.93...102.

13. Rimshin V., Truntov P. Calculation and Strengthening of Reinforced Concrete Floor Slab by Composite Materials // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020, № 1116. P. 438...445.

14. Одинцова О.И., Румянцев Е.В., Смирнова А.С., Петрова Л.С., Румянцева В.Е. Микрокапсулирование биологически активных веществ с использованием биосовместимых полиэлектролитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 60...65.

15. Telichenko V., Rimshin V., Kuzina E. Methods for calculating the reinforcement of concrete slabs with carbon composite materials based on the finite element model // MATEC Web of Conferences. – 2018, №251. P. 04061.

16. Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 1. С. 206...212.

17. Rimshin V., Truntov P. An integrated approach to the use of composite materials for the restoration of reinforced concrete structures // E3S Web of Conferences. – 2019, № 135. P. 03068.

18. Roshchina S., Ezzi H., Shishov I., Lukin M., Sergeev M. Evaluation of the deflected mode of the monolithic span pieces and preassembled slabs combined action // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017, P. 012075.

19. Бережнов К.П., Суплецов В.С. Прогнозирование долговечности конструкций фабрик алмазодобывающей промышленности // Промышленное и гражданское строительство. – 2012, №4. С. 13...15

20. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // Magazine of Civil Engineering. – 2018, №7(83) P. 198...207.

REFERENCES

1. Rummyantseva V.E, Konovalova V.S. Composite reinforcement as a way to increase the durability of building structures // Key Engineering Materials. – 2020, №869, P. 336...341.

2. Erofeev V. Frame Construction Composites for Buildings and Structures in Aggressive Environments // Procedia Engineering. – № 165, 2016. P. 1444...1447.

3. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Goglev I.N. The influence of structure formation conditions of the composite on the mass transfer processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". – 2020, P. 042047.

4. Zhukov E.M., Kropotov Yu.I., Luginin I.A., Poloshkov S.I., Legaeva L.A. Corrosion of reinforced

concrete structures and the causes of its occurrence // Young scientist. - 2016, No. 7, P. 78 ... 80.

5. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Narmaniya B. E. Joint work of cement concrete and composite reinforcement with periodic profile winding // Materials Science Forum. – 2020, № 974. P.119...124.

6. Kuzmenko V.A., Odintsova O.I., Rusanova A.I. Properties of synthetic polyelectrolytes and prospects for their use for finishing textile materials // Journal of Applied Chemistry. – 2014. V.87, No. 9. S. 1193...1203.

7. Rimshin V.I., Varlamov A.A. Three-dimensional model of the elastic behavior of the composite // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2018, No. 3. S. 63 ... 68.

8. Varlamov A.A., Tverskoi S.Y., Gavrilov V.B. Charting standard concrete based on the theory of degradation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. P. 022030.

9. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of Concrete Beams with the Use of Carbon Fiber // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019, № 983. P. 911...919.

10. Ovchinnikov I.I., Migunov V.N. Durability of a reinforced concrete beam under conditions of chloride aggression. Stroitel'nye materialy. – 2012, No. 8. P.76...84.

11. Rimshin V.I., Pudova A.A., Shubin L.I. Evaluation of the effectiveness of the use of photovoltaic systems in the operation of a residential building. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2018, No. 3. S. 287 ... 293.

12. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures // Academy. Architecture and construction. - 2015, No. 1. P.93...102.

13. Rimshin V., Truntov P. Calculation and Strengthening of Reinforced Concrete Floor Slab by Composite Materials // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020, No. 1116. P. 438...445.

14. Odintsova O.I., Rummyantsev E.V., Smirnova A.S., Petrova L.S., Rummyantseva V.E. Microencapsulation of biologically active substances using biocompatible polyelectrolytes // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2021, No. 1. S. 60 ... 65.

15. Telichenko V., Rimshin V., Kuzina E. Methods for calculating the reinforcement of concrete slabs with carbon composite materials based on the finite element model // MATEC Web of Conferences. - 2018, No. 251. P. 04061.

16. Chesnokova T.V., Rummyantseva V.E., Loginova S.A. Modeling of the process of concrete biodegradation at the enterprises of the textile industry // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2020, No. 1. S. 206 ... 212.

17. Rimshin V., Truntov P. An integrated approach to the use of composite materials for the restoration of reinforced concrete structures // E3S Web of Conferences.- 2019, No. 135. P. 03068.

18. Roshchina S., Ezzi H., Shishov I., Lukin M., Sergeev M. Evaluation of the deflected mode of the monolithic span pieces and preassembled slabs combined action // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017, P. 012075.

19. Berezhnov K.P., Supletsov V.S. Forecasting the durability of structures of diamond mining factories. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. - 2012, No. 4. S. 13...15/

20. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // Magazine of Civil Engineering. – 2018, №7(83) P. 198...207.

Рекомендована секцией "Строительная теплофизика и энергосбережение" Научно-технического Совета НИИСФ РААСН. Поступила 25.10.21.

УДК 624.072.2

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_250

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОСТАВНЫХ БАЛОК ПЕРЕКРЫТИЙ
ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**CALCULATION FEATURES OF COMPOSITE FLOOR BEAMS
OF TEXTILE FACTORIES**

Е.В. ПОПОВ, О.А. ВЛАДИМИРОВА, В.В. СОПИЛОВ, Б.В. ЛАБУДИН, В.Е. РУМЯНЦЕВА

E.V. POPOV, O.A. VLADIMIROVA, V.V. SOPILOV, B.V. LABUDIN, V.E. RUMYANTSEVA

(Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Ивановская государственная химико-технологическая академия,
Ивановский государственный политехнический университет)

(Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosova,
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: EPV1989@yandex.ru

Рассматриваются двухслойные составные деревокомпозитные балки на податливых связях, которые часто применялись и применяются в объектах текстильной промышленности. Характерной особенностью составных конструкций является нелинейность деформирования связей от сдвигающих усилий. На основании решения дифференциального уравнения для двухслойного составного стержня (А.Р. Ржаницын) представлена математическая модель, позволяющая производить нелинейный расчет шаговым методом с учетом меняющегося коэффициента жесткости дискретных связей, который является функцией от сдвигающего усилия. Представлен пример расчета двухслойного составного элемента на податливых связях, приведены результаты сравнения линейного и нелинейного расчетов.

Two-layer composite beams of semi-rigid ties with non-linearly behavior of the deformation under the shear forces are considered. Based on the solution of the differential equation for a two-layer composite rod of A.R. Rzhanitsyn, a mathematical model is presented. The model obtained allows to do non-linear calculation using step method and taking into account the variability of the stiffness coefficient of discrete ties, being the function of the shear forces. The results of linear and non-linear calculations were compared.

Ключевые слова: составные стержни, нелинейность, жесткость, податливость, сдвиг.

Keywords: composite rods, non-linear behavior, stiffness, semi-rigidity, shear force.

Введение

Текстильная промышленность занимает одно из важнейших мест среди не только легкой, но и мировой промышленности в целом. Для многих стран текстильная и легкая промышленность является одной из основных отраслей экономики, формируя бюджеты от 6 до 20% общего объема производства промышленной продукции. В России за последние десятилетия доля отрасли текстильной промышленности снизилась с 12 до 2% в натуральном выражении, а производственный персонал – в три раза [1], [2]. Тем не менее, предприятия и цеха, работающие в отрасли, часто перепрофилируются, обновляется станочный парк, что приводит к необходимости проведения реконструкции, обусловленной перепланировкой, увеличением нагрузок [3]. Здесь рассмотрены некоторые варианты повышения несущей способности балочных конструкций путем усиления балок перекрытий и/или включением в работу балочных конструкций плит и настилов перекрытий с различными типами податливых связей. Такие композитные конструкции могут иметь в своем составе современные деревоклееные, стальные, железобетонные элементы конструкций, объединенные, как правило, стальными податливыми связями и/или нагельными группами. Широко распространены в строительстве балочные элементы композитного сечения на основе древесины [4...10]; деревобетонные перекрытия [11], [12]; сталежелезобетонные перекрытия [13], [14], в том числе с профилированным стальным настилом, а также комбинации элементов из ДДК, LVL, CLT и других материалов [15].

$$\gamma = 1/E_1F_1 + 1/E_2F_2 + c^2 / \Sigma EI; \Delta(t) = -N_1^0 / E_1A_1 + N_2^0 / E_2A_2 - M_0(t) \cdot \Sigma EI, \quad (2)$$

где E_1, E_2, F_1, F_2 – модули упругости и площади поперечного сечения ветвей составного стержня; c – расстояние между центрами тяжести ветвей; ΣEI – сумма жесткостей: $\Sigma EI = E_1I_1 + E_2I_2$; N_01, N_02 – продольные силы, приложенные к ветвям; $M_0(t)$ – функция распределения изгибающего момента в пределах рассматриваемого участка.

Методика расчета таких конструкций, как правило, базируется на теории составных стержней А.Р. Ржаницына [16], в основе которой положена идеально упругая работа связей сдвига, равномерно распределенных по длине шва сплачивания элементов составного стержня. В действительности, в большинстве случаев работа связей сдвига будет нелинейной, что обусловлено нелинейностью диаграмм деформирования материалов. В связи с этим целесообразным является уточнение классической методики расчета таких конструкций, что предоставило бы возможность учета нелинейной работы различных видов составных композитных конструкций.

Методика

Алгоритм решения рассмотрим на примере двухслойного составного элемента. В пределах выделенного участка условно предположим непрерывное распределение связей по длине контактного шва, что позволит для определения сдвигающих усилий использовать решение дифференциального уравнения составного элемента, представленное в [16]:

$$T'' / \xi = \gamma T + \Delta, \quad (1)$$

где T – функция распределения суммарных сдвигающих усилий в шве, накапливаемых по длине элемента от его начала до рассматриваемого сечения; ξ – коэффициент жесткости связей сдвига; γ, Δ – коэффициент и свободный член дифференциального уравнения, определяемые по формулам:

В составных элементах усилия между связями распределяются неравномерно. Таким образом, в случае нелинейной зависимости $\xi(T)$ (T – усилие сдвига, приходящееся на связь) необходимо учитывать изменение жесткости шва составной конструкции по длине, следовательно, в уравнении (1) нельзя положить, что $\xi = \text{const}$. Для учета

данного обстоятельства разбиваем составную конструкцию по длине на n участков, длиной l_j , где j – номер участка (рис. 1-а). Границы участков определяются расстояниями между дискретными связями с номерами $i=1, 2, \dots, n, n+1$, то есть номер участка совпадает с номером левой связи.

Величина Σl_j обозначает расчетную длину элемента:

$$\Sigma l = \sum_{j=1}^n l_j.$$

Коэффициент жесткости связей сдвига в пределах участков принимается равномерно-распределенным, равным $\xi_j(T_i=j)=C(T)/l_j$, где $C(T)$ – коэффициент жесткости дискретной связи, определяющий величину продольного ее смещения при заданной нагрузке.

На рис. 1 показано: – к расчету составной балки: а – схема разбивки составного элемента на участки; б – условная и фактическая эпюры суммарных сдвигающих усилий.

Решение дифференциального уравнения (1) при подстановке в него (2) будет иметь вид:

$$\bar{T}(x) = A \operatorname{sh} \lambda x + B \operatorname{ch} \lambda x + \frac{\xi}{\lambda} \int_0^x \Delta(t) \operatorname{sh}(\lambda(x-t)) dt, \quad (3)$$

$$T_1(l_1) = T_2(0), \quad T_2(l_2) = T_3(0), \quad T_{n-1}(l_{n-1}) = T_n(0), \quad (4)$$

а также равенство на границах участков сосредоточенных сдвигов Γ вдоль разделяющей плоскости шва, которые представляют из себя разности смещения нижнего волокна вышележащего стержня u_n и верхних волокон нижележащего стержня u_b , то есть:

$$\Gamma = \frac{\bar{T}_j'(x_j)}{\xi_j} = \frac{A_j \lambda_j \operatorname{ch}(\lambda_j x_j) + B_j \lambda_j \operatorname{sh}(\lambda_j x_j) + \Phi_j'(x_j)}{\xi_j}. \quad (5)$$

$$A_1 \operatorname{sh}(\lambda_1 l_1) + \bar{T}_{11}(0) \operatorname{ch}(\lambda_1 l_1) + \Phi_1(l_1) = \bar{T}_{11}(l_1) = \bar{T}_{12}(0),$$

$$A_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 l_2) + \bar{T}_{12}(0) \operatorname{ch}(\lambda_2 l_2) + \Phi_2(l_2) = \bar{T}_{12}(l_2) = \bar{T}_{13}(0),$$

$$\dots$$

$$A_n \operatorname{sh}(\lambda_n l_n) + \bar{T}_{n-1}(l_{n-1}) \operatorname{ch}(\lambda_n l_n) + \Phi_n(l_n) = \bar{T}_n(l_n),$$

$$\frac{A_1 \lambda_1 \operatorname{ch}(\lambda_1 l_1) + \bar{T}_{11}(0) \lambda_1 \operatorname{sh}(\lambda_1 l_1) + \Phi_1'(l_1)}{\xi_1} = \frac{A_2 \lambda_2}{\xi_2}, \quad (6)$$

где A, B – произвольные постоянные; t – координата, по которой производится интегрирование; λ – характеристическое число; ξ – коэффициент жесткости соединения, приведенный к погонному.

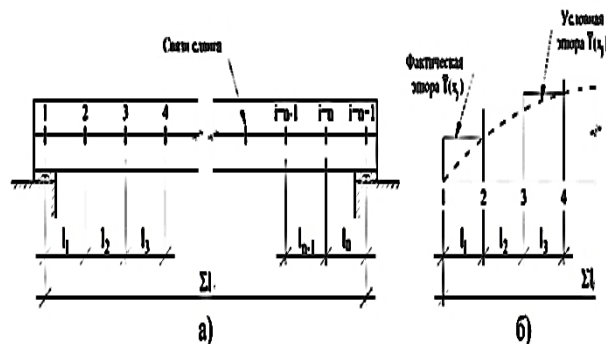


Рис. 1

Обозначим правую часть выражения (3) как функцию $\Phi_j(x_j)$, где j – номер соответствующего участка; x_j – координата, отсчитываемая от его начала, слева-направо, таким образом $x_j=0$ в начале участка и $x_j=l_j$ – в конце. В качестве граничных условий, связывающих уравнения между собой, можно положить равенство сдвигающих сил на границах участков:

С учетом (3), (4) и (5), а также с учетом равенств $\operatorname{sh}(0)=0$; $\operatorname{ch}(0)=1$; $\Phi_j(0)=0$, можно составить систему уравнений для определения сдвигающих усилий $\bar{T}_{ij}(x_j)$ по длине стержня и произвольных постоянных A_i :

$$\frac{A_2 \lambda_2 \operatorname{ch}(\lambda_2 \ell_2) + \bar{T}_{12}(0) \lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 \ell_2) + \Phi_2'(\ell_2)}{\xi_2} = \frac{A_3 \lambda_3}{\xi_3},$$

...

$$\frac{A_2 \lambda_2 \operatorname{ch}(\lambda_2 \ell_2) + \bar{T}_{12}(0) \lambda_2 \operatorname{sh}(\lambda_2 \ell_2) + \Phi_2'(\ell_2)}{\xi_2} = \frac{A_3 \lambda_3}{\xi_3}.$$

Решая систему (6), получаем значения функции распределения сдвигающих усилий $\bar{T}_{ij}(x_j)$ на границах участков. Цифра индекса " ij " указывает номер участка. Сос-

редоточенные сдвигающие усилия в дискретных связях определяются из выражений:

$$T_1 = \bar{T}_1(\ell_1); \quad T_2 = \bar{T}_2(\ell_2) - \bar{T}_1(\ell_1); \quad \dots \quad T_n = \bar{T}_n(\ell_n) - \bar{T}_{n-1}(\ell_{n-1}). \quad (7)$$

Эпюра сдвигающих нагрузок в действительности будет иметь скачки. Характер условной и фактической эпюры распределения сдвигающих усилий \bar{T} представлен на рис. 1-б.

Для решения системы уравнений (6) необходимо задать граничные условия на концах, например, для шарнирноопертой балки без препятствий сдвигу на торцах можно положить равным $\bar{T}_1(0) = \bar{T}_n(\ell_n) = 0$.

После вычисления усилий в связях определение усилий и напряжений в элементах составного стержня, а также вертикальных перемещений, производится по общим правилам строительной механики. Для симметричной схемы достаточно рассмотреть только половину пролета, длину последнего участка в таком случае следует принимать равной расстоянию от крайней в пределах полупролета связи до середины пролета элемента.

Для учета нелинейной работы связей расчет может производиться шаговым методом. Нагрузка в общем случае прикладывается ступенями ΔN , на каждом этапе расчета по значениям усилий в связях уточняется коэффициент жесткости соединений $\xi = \xi(T)$ для следующего этапа нагружения. С использованием принципа суперпозиции усилия и напряжения в связях и ветвях составного элемента суммируются на каждом этапе расчета для получения полных результирующих значений.

На рис. 2 показано: – к расчету составной балки на податливых связях: а – схема

балки; б – диаграмма "нагрузка–деформация" ($P-\delta$) для одиночной связи при действии продольного сдвига.

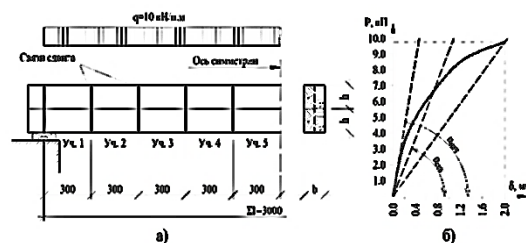


Рис. 2

Пример расчета. Рассмотрим составную деревянную балку (рис. 2-а) из древесины сосны класса прочности С22 [17], слои которой соединены между собой стальными цилиндрическими нагелями, деформация связей происходит по нелинейному закону, то есть $\xi = \xi(T)$ (рис. 2-б). Работа материала предполагается линейноупругой. В качестве исходных данных принимаются следующие параметры: расчетный пролет: $\Sigma \ell = 3$ м, размеры поперечного сечения ветвей 150×150 мм, шаг расстановки связей сдвига 0,3 м. Балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой $q = 7,5$ кН/п.м, величина ступени нагружения $\Delta q = 0,75$ кН/п.м. Требуется определить максимальные крайевые напряжения в ветвях составной балки.

Полупролет балки разбивается на 10 участков длиной ℓ_j . Полученная система содержит 10 уравнений и 10 неизвестных. Изгибающий момент в середине пролета с

учетом работы связей сдвига, приходящийся на одну ветвь, определяется по формуле:

$$M_B = E^I I \frac{M_0 - c \sum_{i=1}^5 T_i}{\sum E^I I}, \quad (8)$$

где I – момент инерции рассматриваемой ветви; M_0 – изгибающий момент в середине пролета составной балки от действия только внешней нагрузки (без учета усилий в связях сдвига).

Краевые нормальные напряжения σ_x в верхней и нижней зоне верхней ветви, а также верхней и нижней зоне нижней ветви определяются по формулам:

$$\sigma_{x,1} = \frac{-\sum_{i=1}^5 T_i}{F_1} \pm \frac{M_B h_B}{2I_1}; \quad (9)$$

$$\sigma_{x,2} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i}{F_2} \pm \frac{M_B h_B}{2I_2}.$$

Для сопоставления результатов произведен расчет в линейной постановке при двух значениях жесткости связей сдвига, которые принимаются постоянными. В первом случае линейного расчета жесткость связей принимается равной тангенсу угла наклона касательной к графику $\delta=f(P)$ рис. 2-б, проведенной через начальную точку. Во втором случае – тангенсу угла наклона секущей, проведенной через начальную и конечную точку кривой, соответствующую предельной деформации нагельных соединений [18]. На рис. 3-а представлены графики увеличения сдвигающих усилий в связях на каждом этапе нагружения, на рис. 3-б – нормальных напряжений в краевых волокнах верхней ветви составной балки.

На рис. 3 представлено: – графики зависимости: а – усилий в связях T_i на каждой ступени нагружения (нелинейный расчет); б – нормальных напряжений σ_x в краевых волокнах верхней ветви.

Максимальное усилие сдвига в связях T_1 составляет 9 кН при нелинейном рас-

чете и 11,22 кН – при линейном, с использованием "начального" коэффициента жесткости (расхождение 25%). Это значение превышает предельнодопустимую нагрузку на 1 связь согласно рис. 2-б.

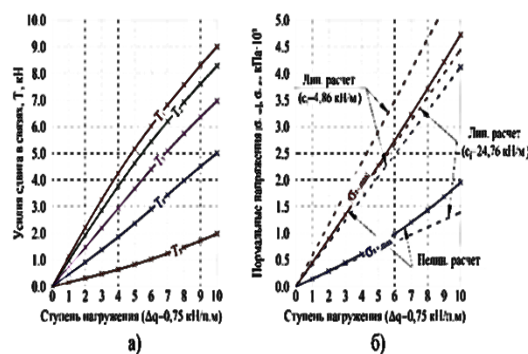


Рис. 3

Таким образом при линейном расчете балки может быть принято ошибочное решение о необходимости увеличения количества связей вблизи опор, или уменьшения их шага расстановки, хотя в действительности такой необходимости не возникает. При учете "секущего" коэффициента жесткости связей усилия в них не превышают 62% от предельнодопустимого значения, однако в таком случае получаются завышенные значения нормальных напряжений в ветвях составного элемента. В случае использования в расчете "начального" значения жесткости связей напряжения получились заниженными на 6% для сжатой зоны, на 29% – для растянутой. Расчет с использованием "секущего" коэффициента жесткости дает превышение значений нормальных напряжений на 23% и 111% для сжатой и растянутой зон ветви соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель, позволяющая производить расчет двухслойных составных стержней с учетом нелинейной работы связей сдвига расширяющей возможности применения теории А.Р. Ржаницына для расчета составных стержней с нелинейно-деформируемыми связями.

2. Использование в расчетах постоянных значений коэффициента жесткости

шва не позволят получить достоверные значения краевых напряжений для оценки прочности материала ветвей составного элемента. Использование линейных диаграмм деформирования связей сдвига, дает значительную погрешность (до 111%) и не дает реального представления о прочности конструкции. Особенно существенное различие возникает у волокон, примыкающих к плоскости разделяющего шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жариков В.В., Белова С.Е., Туркин В.Г., Попова Е.Б. Теория и методология эффективного развития промышленных предприятий в конкурентных условиях. – М.: Изд-во Машиностроение–1, 2002.

2. Живетин В.В. Состояние и перспективы развития текстильной и легкой промышленности // Промышленность России. – 2000, №6. С. 28...36.

3. Орлова М.А. Ремонт и восстановление строительных конструкций текстильных предприятий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 1. С. 227...231.

4. Роцина С.И., Лисятников М.С., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Лукин М.В. Применение высоких дёревоклееных балок в покрытии зданий текстильных цехов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 5. С. 267...271.

5. Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В. Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе // Лесной журнал. – Архангельск, 2016, №4. С. 123...134.

6. Попов Е.В., Тропина П.М., Шиловская Н.А., Русланова А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Трехслойная ребристая панель на податливых связях // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017, № 4. С. 33...42.

7. Marci C., Lukasz P. Theoretical, experimental and numerical study of aluminium-timber composite beams with screwed connections. *Construction and Building Materials*. – Vol. 226, 2019. P. 317...330. DOI/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.101.

8. Saha S., Dasab P. Experimental and numerical studies on vibration of laminated composite beam with transverse multiple cracks. *Mechanical Systems and Signal Processing*. – Vol. 135 (106398), 2020. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106398.

9. Siham M., Mittelstedt C. Mixed-mode buckling of shear-deformable composite laminated I-beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. – Volume 169 (105332), 2020. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105332.

10. Tohid G., Thomas R., Hamid R. Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials. *Composite Structures*. – Vol.233 (111579), 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111579.

11. Gutkowskia R., Browna K., Shigidib J. Laboratory tests of composite wood–concrete beams. *Construction and Building Materials*. – Vol. 22(6), 2008. P. 1059...1066. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.013.

12. Абдрахманов И.С. Выносливость деревожелезобетонных изгибаемых элементов без учета податливости соединения Федеральное Агентство по образованию // Изв. Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008, №2 (10). С. 37...40.

13. Замалиев Ф. С. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых конструкций гражданских зданий при различных видах загрузки: Дис. ... докт. техн. наук. – Казань, 2013.

14. Hao D., Xiamin H., Yanfei M., Guohui H., Kaikai G. Study on composite beams with prefabricated steel bar truss concrete slabs and demountable shear connectors // *Engineering Structures*. – Vol.210 (110419), 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110419.

15. Roche S., Robeller C., Humbert L., Weinand Y. On the semi-rigidity of dovetail joint for the joinery of LVL panels // *European Journal of Wood and Wood Products*. – Vol. 73, Iss. 5, 2015. P. 667...675.

16. Ржаницын А.П. Составные стержни и пластинки. – М.: Стройиздат, 1986.

17. Стандарт Российской Федерации ГОСТ 33080–2014. Конструкции деревянные. Классы прочности конструкционных пиломатериалов и методы их определения (Переиздание).

18. Стандарт Российской Федерации СП 64.13330.2017. Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II–25–80 (с Изменением №1).

REFERENCES

1. Zharikov V. V. Theory and methodology of effective development of industrial enterprises in competitive conditions / Zharikov V. V., Belova S. E, Turkin V. G., Popova E. B. - M.: Publishing house of Mechanical Engineering – 1. – 2002. – 96 p.

2. Zhivetin V.V. State and prospects of development of textile and light industry / V.V. Zhivetin // *Industry of Russia*. – 2000. – No. 6. – Pp. 28–36.

3. Orlova M.A. Repair and recovery of building constructions of the textile entities. *Proceedings of higher educational institutions. Textile industry technology*. – 2020. – No. 1 (385). – Pp. 227–231.

4. Application of high glued wooden beams in the ceiling of buildings textile plants. Roshina S.I., Lisyatnikov M.S., Melekhov V.I., Labudin B.V., Lukin M.V. *Proceedings of higher educational institutions. Textile industry technology*. – 2016. – No. 5 (365). – Pp. 267–271.

5. The influence of the stiffness of shear bonds in the calculation of ribbed panels on a wooden frame / Popov E.V., Filippov V.V., Melekhov V.I., Labudin B.V., Tyurikova T.V. // *Forest Journal – Arkhangelsk*, 2016 – No. 4. – Pp. 123–134.

6. Three-layer ribbed panel on pliable bonds / Popov E.V., Trochina P.M., Shilovskaya N.A., Ruslanova

A.V., Labudin B.V., Melekhov V.I.// Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2017.– No. 4. – Pp. 33–42.

7. Marcin, C., Lukasz, P. Theoretical, experimental and numerical study of aluminium-timber composite beams with screwed connections. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. Pp. 317–330. DOI/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.101.

8. Saha, S., Dasab, P. Experimental and numerical studies on vibration of laminated composite beam with transverse multiple cracks. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 135 (106398). DOI: 10.1016/j.ymsp. 2019.106398.

9. Siham, M., Mittelstedt, C. Mixed-mode buckling of shear-deformable composite laminated I-beams. International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Volume 169 (105332). DOI: 10.1016/j.ijmecsci. 2019.105332.

10. Tohid, G., Thomas, R., Hamid, R. Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials. Composite Structures. 2020. Vol.233 (111579). DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111579.

11. Gutkowskia, R., Browna, K., Shigidib, J. Laboratory tests of composite wood–concrete beams. Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22(6). Pp. 1059–1066. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2007.03.013.

12. Abdrakhmanov I.S. Endurance of wood-reinforced concrete bending elements without taking into account the flexibility of the joint Federal Agency for

Education, «Tidings of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering» No. 2 (10) 2008. Pp. 37–40.

13. Zamaliev F. S. Strength and deformability of steel-reinforced concrete bent structures of civil buildings with different types of loading: dis. ... Dr. Tech. sciences. Kazan, 2013. – 379 p.

14. Hao, D., Xiamin, H., Yanfei, M., Guohui, H., Kaikai, G. Study on composite beams with prefabricated steel bar truss concrete slabs and demountable shear connectors. Engineering Structures. 2020. Vol. 210(110419), DOI: 10.1016/j.engstruct. 2020.110419.

15. Roche S., Robeller C., Humbert L., Weinand Y. On the semi-rigidity of dovetail joint for the joinery of LVL panels // European Journal of Wood and Wood Products. 2015. Vol. 73. Iss. 5. Pp. 667–675.

16. Rzhantsyn A.R. Composite rods and plates [Text]: scientific edition / A. R. Rzhantsyn. – Moscow: Stroyizdat, 1986.

17. Standard of Russian Federation GOST 33080–2014. Wooden structures. Strength classes of structural sawn timber and methods for their determination (Reissue).

18. Standard of Russian Federation SP 64.13330.2017. Set of rules. Wooden structures. Updated edition of SNiP II – 25–80 (with Amendment No. 1).

Рекомендована кафедрой инженерных конструкций, архитектуры и графики СФУ им. М.В. Ломоносова. Поступила 18.06.21.

УДК 620.22-419

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_256

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО КОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО МЕРИДИОНАЛЬНОЙ НАМОТКОЙ ВОЛОКОН

DESIGN OF THE TOROIDAL COMPOSITE PRESSURE VESSEL MADE BY MERIDIONAL WINDING OF FIBERS

Б.С. САРБАЕВ, В.В. МУРАВЬЕВ, С. ЧЖАН

B.S. SARBAYEV, V.V. MURAVYEV, X. ZHANG

(Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана)

(Bauman Moscow Technical University)

E-mail: bssarbayev@mail.ru; vasilij.muravyev@gmail.com; zxbmstu@qq.com

Предложен способ проектного расчета композитного баллона высокого давления тороидальной формы при действии внутреннего давления. Рассматривается конструкция, изготавливаемая методом непрерывной намотки волокон вдоль меридиана баллона. При расчете геометрических характеристик и массы предполагается, что баллон является безмоментной

и равнопрочной оболочкой. Для волокнистого композиционного материала (КМ) применяется нитяная модель. Показано, что образующая баллона является плоской замкнутой линией, состоящей из двух гладких кривых, пересекающихся под острым углом. Соответствующая поверхность вращения является нерегулярной. С целью уменьшения изгибных напряжений в области нерегулярности предлагается устанавливать круговой шпангоут, изготавливаемый окружной намоткой волокон. Представлен численный пример, в котором рассчитываются геометрические и массовые характеристики баллона. Методом конечных элементов (МКЭ) выполнен поверочный расчет спроектированного композитного баллона. Показано, что установка кругового шпангоута позволяет существенно уменьшить величины изгибных напряжений в баллоне.

A method for design calculation of the toroidal composite pressure vessel subjected to internal pressure is proposed. A structure reinforced along the meridians by using meridional continuous winding of fibers is discussed. The vessel is considered as a non-moment and isotensoid shell when analyzing its geometric and mass characteristics. The monotropic material model is used for fibrous composite material (FCM). It is shown that the shell meridian is a plane closed line consisting of two smooth curves and intersecting at an acute angle. The corresponding surface of the revolution is irregular. The installation of a circular frame made by circumferential winding of fibers allows one to reduce the bending stresses in the area of irregularity. A numerical example is presented in which the geometric and mass characteristics of the pressure vessel are calculated. A verification calculation of the designed composite pressure vessel is performed by employing the finite element method (FEM). The obtained results show that the installation of a circular frame can significantly reduce the values of bending stresses in the pressure vessel.

Ключевые слова: тороидальный композитный баллон, равнопрочность, образующая, шпангоут, меридиональная намотка, метод конечных элементов.

Keywords: toroidal composite pressure vessel, isotension, shell meridian, frame, meridional winding, finite element method.

Введение

Баллоны высокого давления тороидальной формы востребованы в ракетно-космической технике, в конструкциях гражданского назначения, например, для хранения рабочего тела на борту космического аппарата, в дыхательных аппаратах для спасательных служб. При этом применение волокнистых КМ и технологии непрерывной намотки позволяет получить конструкции меньшей массы по сравнению с металлическими аналогами [1]. В силу особенностей геометрической формы тороидального баллона можно достичь рациональной компоновки разрабатываемого изделия.

Теоретические основы расчета и проектирования композитных баллонов изло-

жены в работах [2...4]. В них предполагается, что баллон является равнопрочной безмоментной оболочкой вращения, нагруженной внутренним давлением; для волокнистого КМ применяется нитяная модель. Рассматриваются баллоны различной формы. В работах [1], [4...6] получены расчетные формулы для тороидальных баллонов. В [7], [8] для проверки расчетных соотношений применяется МКЭ. Как правило, основное внимание уделяется расчету конструкций из многослойных КМ, содержащих слои с симметричным перекрестным армированием и кольцевые слои.

Следует отметить, что в отличие от баллонов давления с цилиндрической частью изготовление баллонов тороидальной

формы с симметричным перекрестным армированием достаточно трудоемкий процесс, требующий применения специализированного намоточного оборудования [1]. Однако процесс изготовления можно существенно упростить, воспользовавшись намоткой волокон вдоль меридиана баллона. Такая технология во много аналогична технологии, применяемой в электротехнике для изготовления катушек с тороидальным сердечником [9].

Целью настоящей статьи является разработка способа проектного расчета геометрических и массовых параметров равнопрочного композитного баллона тороидальной формы, изготавливаемого меридиональной намоткой волокон. Отметим, что весьма близкое по смыслу решение задачи для сферической оболочки, образованной нерастяжимыми и уложенными вдоль меридиана нитями, было предложено в [10].

Метод решения

Для определения формы образующей баллона воспользуемся соотношениями безмоментной теории оболочек вращения при осесимметричном нагружении. Расчетной нагрузкой является внутреннее давление p . Основные геометрические параметры показаны на рис. 1-а. Меридиональная погонная сила T_1 находится из условия равновесия элемента баллона MN (рис. 1-б). На рис. 1 показана форма образующей тороидального баллона при меридиональной намотке (а); к определению меридиональной погонной силы (б).

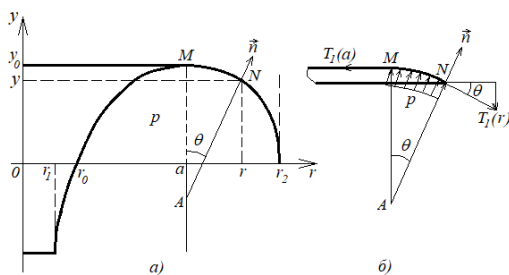


Рис. 1

В результате получаем

$$T_1 = \frac{p(r^2 - a^2)R_2}{2r^2}. \quad (1)$$

Для окружной погонной силы в силу известного равенства

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = p$$

будем иметь

$$T_2 = T_1 \left(\frac{2r^2}{r^2 - a^2} - \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) R_1, R_2 – радиусы кривизны меридиана и параллели баллона соответственно; a – абсцисса вершины образующей y_0 (рис. 2-а); r – радиус кругового сечения.

В предлагаемом способе расчета несущей способностью связующего будем пренебрегать, то есть волокна, образующие баллон, не связаны между собой в окружном направлении. Тогда, используя условие равнопрочности баллона, можно записать, что

$$T_1(r) = F_{+1}h(r), \quad (3)$$

где F_{+1} – предел прочности однонаправленного волокнистого КМ при растяжении вдоль волокон, $h(r)$ – толщина баллона в рассматриваемом сечении. Для окружной погонной силы принимаем:

$$T_2(r) = 0. \quad (4)$$

В случае непрерывной меридиональной намотки волокон справедливы следующие равенства:

$$rh(r) = r_1h_{01} = r_2h_{02}. \quad (5)$$

Здесь h_{01} и h_{02} – толщина баллона при $r = r_1$ и $r = r_2$ соответственно. Тогда из соотношения (1) и условия равнопрочности получим

$$h_{01} = \frac{p(a^2 - r_1^2)}{2F_{+1}r_1}, \quad h_{02} = \frac{p(r_2^2 - a^2)}{2F_{+1}r_2}. \quad (6)$$

Из равенств (5) и (6) следует зависимость:

$$a^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2}. \quad (7)$$

Радиусы R_1 и R_2 в системе координат, показанной на рис. 1-а, выражаются через уравнение образующей $y=y(r)$ следующим образом [4]:

$$\frac{1}{R_1} = -\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}, \quad \frac{1}{R_2} = -\frac{y'}{r\sqrt{1+y'^2}}. \quad (8)$$

Используя зависимости (8), а также равенства (2), (4), получим следующее дифференциальное уравнение относительно функции $y=y(r)$:

$$\frac{y''}{y'(1+y'^2)^2} = \frac{2r}{r^2 - a^2}.$$

Решив это уравнение относительно производной y' и учитывая, что при $r = r_2$ $y' \rightarrow -\infty$, после преобразований с учетом (7) будем иметь:

$$y' = -\frac{r^2 - a^2}{\sqrt{(r_2^2 - r^2)(r^2 - r_1^2)}}. \quad (9)$$

Отсюда видно, что при $r = a$ функция достигает экстремального значения y_0 , а при $r = r_1$ и $r = r_2$ имеют место вертикальные асимптоты (рис. 1-а).

Из уравнения (9) можно получить зависимость для определения угла θ между нормалью \vec{n} и осью вращения баллона OY . После преобразований получим:

$$\sin\theta = \frac{r^2 - a^2}{r_2^2 - a^2}. \quad (10)$$

Как видно, должно быть $|\theta| \leq \pi/2$.

Уравнение (9) можно решить численно, воспользовавшись, например, системой MathCad. Его решение можно записать

также с помощью эллиптических интегралов I и II рода $E(\varphi, k)$ и $F(\varphi, k)$. Оно имеет следующий вид:

$$y(r) = r_2 \left[E(\varphi, k) - \frac{a^2}{r_2^2} F(\varphi, k) \right]. \quad (11)$$

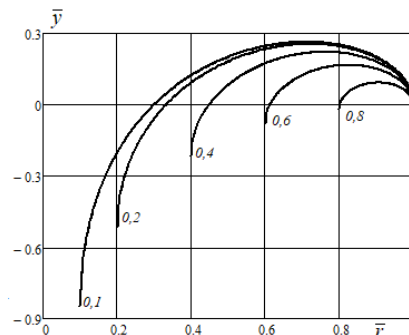


Рис. 2

Здесь

$$E(\varphi, k) = \int_0^\varphi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 t} dt, \quad F(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{dt}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}}.$$

В равенстве (11) использованы следующие обозначения:

$$\varphi(r) = \arcsin \left(\sqrt{\frac{r_2^2 - r^2}{r_2^2 - r_1^2}} \right), \quad k = \frac{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}}{r_2}.$$

Как видно, при $r = r_1$ получаем $\varphi = \pi/2$; при $r = r_2$ $\varphi = 0$. В формуле (11) учтено, что $y(r_2) = 0$. На рис. 2 в безразмерных координатах $\bar{r} = r/r_2$ и $\bar{y} = y/r_2$ изображены образующие тороидального баллона для разных значений параметра $c = r_1/r_2$.

При проектировании баллона интерес представляют геометрические параметры r_0 и r_2 – радиусы малого и большого экваторов, y_0 – высота баллона, V – объем внутренней полости, а также M_{KM} – масса используемого КМ. Радиус r_0 можно определить, решив нелинейное алгебраическое уравнение $y(r_0)=0$. Высота y_0 определяется из равенства $y_0=y(a)$. Для определения объема внутренней полости используем выражение

$$V = \pi \int_{r_0}^{r_2} r^2 y'(r) dr.$$

$$V = \frac{\pi}{3} r_2 \left[a^2 E(\varphi_0, k) - r_1^2 F(\varphi_0, k) \right] + \frac{\pi}{3} r_0 \sqrt{(r_2^2 - r_0^2)(r_0^2 - r_1^2)}, \quad (12)$$

где $\varphi_0 = \varphi(r_0)$. Здесь и далее в силу симметрии величины y_0, V определены для половины баллона при $y(r) > 0$ (рис. 3-а).

На рис. 3 показаны: – сечение равнопрочного тороидального композитного баллона (а): 1 – образующая, 2 – шпангоут; к уравнению равновесия шпангоута (б).

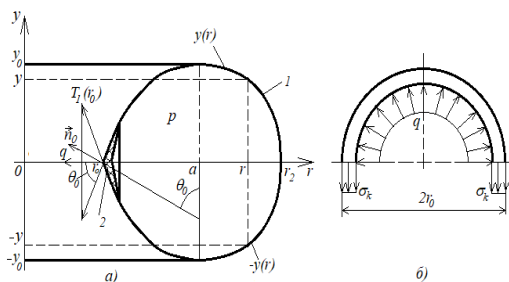


Рис. 3

Анализ уравнения (11) показывает, что образующая баллона представляет собой замкнутую плоскую негладкую линию. Она состоит из двух гладких кривых $y(r)$ и $-y(r)$, пересекающихся под острым углом при $r = r_0$. (рис. 3-а). Поэтому в этой области баллона при нагружении внутренним давлением следует ожидать значительных изгибных напряжений. Для их восприятия в конструкцию предлагается ввести кольцевой композитный шпангоут, который может быть изготовлен в процессе окружающей намотки. Такой силовой шпангоут будет воспринимать не только окружные, но меридиональные силы.

Для определения площади поперечного сечения шпангоута воспользуемся соотношениями для безмоментной оболочки вращения. Из рис. 3-а видно, что на шпангоут в его плоскости будет действовать растягивающая погонная нагрузка, определяемая по формуле $q = 2T_1(r_0) \cos \theta_0$.

Величина меридиональной погонной силы $T_1(r_0)$ и угол θ_0 рассчитываются по формулам (1) и (10) при $r=r_0$. При этом учи-

тывается, что $R_2 = r/\sin \theta$. В итоге получим:

$$q = \frac{p(a^2 - r_0^2)}{r_0} \operatorname{ctg} \theta_0.$$

Из условия равновесия шпангоута и рис. 3-б следует, что

$$\sigma_k = p \frac{a^2 - r_0^2}{F_{\text{ш}}} \operatorname{ctg} \theta_0,$$

где σ_k – кольцевое растягивающее напряжение в шпангоуте, $F_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения шпангоута. При расчетном давлении должно быть $\sigma_k = F_{+1}$. Тогда принимая во внимание равенство (10), получим искомую зависимость

$$F_{\text{ш}} = \frac{P}{F_{+1}} \sqrt{(r_2^2 - r_0^2)(r_0^2 - r_1^2)}. \quad (13)$$

Отметим, что с помощью формулы (13) можно определить ориентировочное значение площади поперечного сечения шпангоута. Его действительная геометрическая форма определяется из условия максимальной прочности и требуемого значения массы баллона.

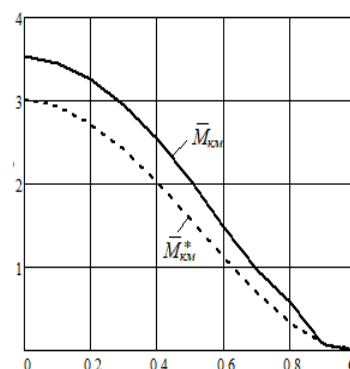


Рис. 4

Определим суммарную массу баллона $M_{\text{км}}$. Понятно, что $M_{\text{км}} = M_{\text{км}}^* + M_{\text{ш}}$, где $M_{\text{км}}^*$ – масса баллона без шпангоута, $M_{\text{ш}}$ –

$$M_{\text{км}}^* = 2\pi\rho_{\text{км}} \int_{r_0}^{r_2} rh(r)\sqrt{1+y'^2} dr, \quad M_{\text{ш}} = 2\pi r_0 \frac{\rho\rho_{\text{км}}}{F_{+1}} \sqrt{(r_2^2 - r_0^2)(r_0^2 - r_1^2)},$$

где $\rho_{\text{км}}$ – плотность применяемого КМ.

масса композитного шпангоута. Указанные величины вычисляются по формулам

Отсюда с учетом (9) получаем:

$$M_{\text{км}} = 2\pi r_0 \frac{\rho\rho_{\text{км}}}{F_{+1}} \left[\sqrt{(r_2^2 - r_0^2)(r_0^2 - r_1^2)} + \frac{(r_2^2 - r_1^2)^2}{4r_0 r_2} F(\varphi_0, k) \right]. \quad (14)$$

На рис. 4 показаны графики зависимости суммарной массы баллона $M_{\text{км}}$ и массы баллона без шпангоута $M_{\text{км}}^*$ от параметра s . При этом введены безразмерные величины:

$$\bar{M}_{\text{км}} = M_{\text{км}}/\kappa, \quad \bar{M}_{\text{км}}^* = M_{\text{км}}^*/\kappa,$$

где $\kappa = \rho\rho_{\text{км}} r_2^3 / F_{+1}$.

Численный пример и обсуждение

В качестве примера выполним расчет геометрических параметров и массы углепластикового баллона. Для радиуса большого экватора примем $r_2 = 0,5$ м, при этом пусть $s = r_1/r_2 = 0,3$, расчетное давление $p = 75$ МПа. Из (11) и (12) получаем $r_0 \approx 0,191$ м, $y_0 \approx 0,12$ м, $V \approx 0,061$ м³. Для углепластика принимаем $F_{+1} = 1500$ МПа, $\rho_{\text{км}} = 1500$ кг/м³. Тогда получим, что $\kappa \approx 9,5$ кг. Из графика на рис. 4 следует, что $M_{\text{км}} \approx 9,5 \cdot 2,93 \approx 27,8$ кг, при этом для шпангоута имеем $M_{\text{ш}} \approx (2,93 - 2,4) \cdot 9,5 = 5,0$ кг, что составляет $\approx 18\%$ от массы баллона в целом.

Поверочный расчет спроектированного тороидального баллона выполнен с помощью МКЭ, реализованного в программном комплексе Siemens Femap / NX Nastran. Были использованы осесимметричные кольцевые оболочечные элементы с тремя степенями свободы в узловой окружности. Для проверки результатов применялись также осесимметричные, трехмерные, че-

тырехугольные элементы с шестью степенями свободы в узле. Задача была решена в линейной постановке.

Для однонаправленного углепластика были заданы следующие характеристики упругости: модуль упругости при растяжении вдоль и поперек волокон соответственно $E_1 = 140$ ГПа, $E_2 = 8$ ГПа; модуль сдвига в плоскости армирования $G_{12} = 0,6$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{12} = 0,3$.

На рис. 5 представлена образующая баллона: 1 – недеформированное состояние; 2 – деформированное состояние без шпангоута; 3 – деформированное состояние со шпангоутом; 4 – форма поперечного сечения шпангоута.

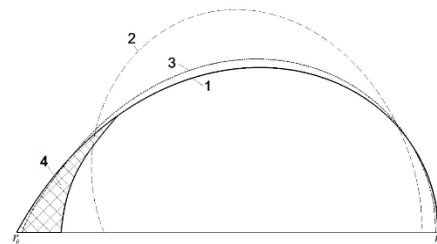


Рис. 5

На рис. 6 (меридиональные напряжения в баллоне: 1, 2 – на внешней и внутренней поверхностях соответственно со шпангоутом; 3, 4 – на внешней и внутренней поверхностях соответственно без него) в масштабе показана образующая баллона в исходном и деформированном состояниях. Максимальный прогиб для баллона без шпангоута имеет место при $r_m \approx 330$ мм и ра-

вен $w_{\max} \approx 5,1h(r_m)$. Для баллона со шпангоутом было получено $w_{\max} \approx 0,73h(r_{sh})$, где $r_{sh} \approx 344$ мм. Наличие шпангоута существенно влияет на деформированное состояние баллона.

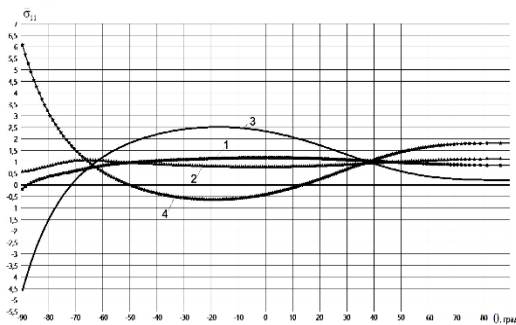


Рис. 6

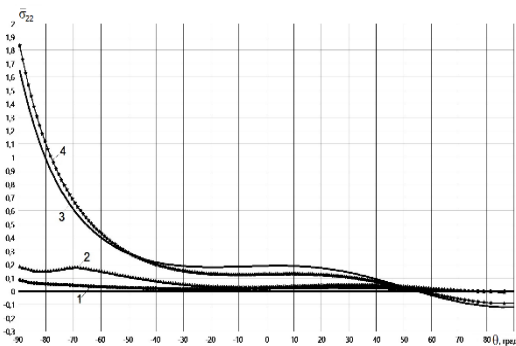


Рис. 7

Расчеты показали, что представленная на рис. 7 (окружные напряжения в баллоне: 1, 2 – на внешней и внутренней поверхностях соответственно со шпангоутом; 3, 4 – на внешней и внутренней поверхностях соответственно без шпангоута) конструкция шпангоута обеспечивает существенное снижение изгибных напряжений в области малого экватора баллона. При этом площадь поперечного сечения шпангоута соответствовала значению, полученному по формуле (14). Для среднего растягивающего напряжения в шпангоуте было получено значение $\approx 0,8F_{+1}$. На рис. 6 и 7 приведены эпюры меридиональных σ_{11} и окружных σ_{22} напряжений для баллона со шпангоутом и без него. По оси ординат отмечены величины $\bar{\sigma}_{11} = \sigma_{11}/F_{+1}$ и $\bar{\sigma}_{22} = \sigma_{22}/F_{+1}$.

Как и следовало ожидать, установка шпангоута обеспечивает уменьшение изгибных напряжений в баллоне со шпангоутом по сравнению с баллоном без шпангоута. При этом в баллоне со шпангоутом напряженное состояние становится близким к безмоментному. Основную нагрузку воспринимают волокна, работающие на растяжение в направлении армирования. На большей части баллона получили напряжения, примерно равные F_{+1} . В направлении поперек волокон напряжения практически отсутствуют. Такое напряженное состояние однонаправленного КМ соответствует гипотезам, которые выражаются формулами (3) и (4).

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена конструкция баллона давления тороидальной формы, изготавливаемого меридиональной намоткой. Показано, что образующей такого баллона является плоская замкнутая негладкая линия. Для увеличения его прочностных характеристик в области нерегулярности предлагается устанавливать кольцевой шпангоут, изготовленный методом окружной намотки.

2. На основе гипотезы равнопрочности предложен вариант расчетных формул для определения образующей тороидального баллона высокого давления, армированного волокнами в меридиональном направлении. Расчеты могут быть выполнены как с применением современных программных средств, так и с помощью аналитических зависимостей, записанных с помощью эллиптических интегралов.

3. Предложенные расчетные соотношения апробированы на примере проектирования баллона с заданными параметрами. Проверочный расчет, выполненный с помощью МКЭ в линейной постановке, показал, что установка композитного шпангоута в области малого экватора существенно влияет на напряженно-деформированное состояние баллона. Перемещения в баллоне уменьшаются, а напряженное состояние

становится близким к безмоментному. Основную нагрузку воспринимают волокна, работающие на растяжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения. – М.: Машиностроение, 1977.
3. Васильев В.В., Мороз Н.Г. Композитные баллоны давления: проектирование, расчет, изготовление и испытания. – М.: Машиностроение. 2015.
4. Vasiliev V.V. Composite pressure vessels. Analysis, design, manufacturing. – Blacksburg. Bull Ridge Publishing, 2009.
5. Mitkevich A.B., Kul'kov A.A. Design optimization and forming methods for toroidal composite shells. Mechanics of Composite Materials. – V.4, №2, 2006. P.95...108.
6. Lei Zub, Sotiris Koussios, Adriaan Beukers, Dinghua Zhang. Development of Filament Wound Composite Isotensoidal Pressure Vessels//Polymers & Polymer Composites. – V. 22, №.3, 2014. P. 227...232.
7. Haixiao Hu, Shuxin Li, Jihui Wang, Lei Zu. Structural design and experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels//Composite Structures. – 2015, March. V.121. P.114...120.
8. Matthew J. Vick, Kurt Gramoll. Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell//Journal of Pressure Vessel Technology. – Vol. 134, 2012. October. P. 051201-1 - 051201-7.
9. Ларин В.П. Технология намотки в приборо- и электроаппаратостроении. – СПб.: Изд-во СПбГУАП. 2003.
10. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М.: Наука, Физматлит, 1996.

REFERENCES

1. Komkov M.A., Tarasov V.A. Winding technology for composite structures of missiles and weapons. - M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2011.
2. Obratsov I.F., Vasiliev V.V., Bunakov V.A. Optimal reinforcement of shells of revolution. - M.: Mashinostroenie, 1977.
3. Vasiliev V.V., Moroz N.G. Composite pressure cylinders: design, calculation, manufacture and testing. – M.: Mashinostroenie. 2015.
4. Vasiliev V.V. Composite pressure vessels. Analysis, design, manufacturing. - Blacksburg. Bull Ridge Publishing. 2009.
5. Mitkevich A.B., Kul'kov A.A. Design optimization and forming methods for toroidal composite shells. Mechanics of Composite Materials. – V.4, №2, 2006. P.95...108.
6. Lei Zub, Sotiris Koussios, Adriaan Beukers, Dinghua Zhang. Development of Filament Wound Composite Isotensoidal Pressure Vessels//Polymers & Polymer Composites. – V. 22, No. 3, 2014. P. 227...232.
7. Haixiao Hu, Shuxin Li, Jihui Wang, Lei Zu. Structural design and experimental investigation on filament wound toroidal pressure vessels//Composite Structures. – 2015, March. V.121. P.114...120.
8. Matthew J. Vick, Kurt Gramoll. Finite Element Study on the Optimization of an Orthotropic Composite Toroidal Shell//Journal of Pressure Vessel Technology. – Vol. 134, 2012. October. P. 051201-1 - 051201-7.
9. Larin V.P. Winding technology in instrumentation and electrical apparatus engineering. - SPb.: Publishing house of SPbGUAP. 2003.
10. Feodosiev V.I. Selected tasks and questions on the strength of materials. – М.: Наука, Физматлит, 1996.

Рекомендована кафедрой химически аппаратов и ракетоносителей. Поступила 24.09.21.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ПРОСТЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ,
НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ ЖЕСТКОСТИ***

**DETERMINATION OF COMPOSITE MATERIAL EFFECTIVE
ELASTIC PROPERTIES IN SIMPLE STRESS STATES, BASED
ON THE CONCEPT OF STIFFNESS**

Д.А. ПИРОГОВ, Л.Б. МАСЛОВ, П.В. КОРОЛЕВ, К.В. КЛОПОВА

D.A. PIROGOV, L.B. MASLOV, P.V. KOROLEV, K.V. KLOPOVA

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)**

E-mail: pirogov81@mail.ru

Изложен метод расчета эффективных упругих модулей композиционных материалов, используя понятие механической жесткости. Рассмотрена геометрическая модель композиционного материала на основе объемной тканой структуры с учетом геометрических характеристик нитей утка и нитей основы, и приведен пример определения модуля Юнга в одном из направлений ячейки периодичности композиционного материала. Определены численные значения модулей упругости на растяжение-сжатие и сдвиг на различных гранях ячейки периодичности. При решении поставленной задачи использовались методы прикладной механики и механики композитов.

A method for calculation of composite materials effective elastic moduli is presented, using the concept of mechanical stiffness. A geometrical model of composite material based on bulk woven structure with consideration for geometrical characteristics of weft and warp yarns is considered and an example of determining the Young modulus in one of the cell directions of composite material periodicity is given. Numerical values of tensile-compression and shear moduli on different faces of the periodicity cell are determined. The methods of applied mechanics and composite mechanics were used to solve the problem.

Ключевые слова: композиционный материал, объемная тканая структура, ячейка периодичности, эффективные упругие характеристики, прикладная механика.

Keywords: composite material, bulk woven structure, periodicity cell, effective elastic characteristics, applied mechanics.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

Введение

Композиционные материалы (КМ) активно используются в мировой промышленности, начиная с середины двадцатого века. Преимущество использования композитов [1] вместо металлических конструкций заключается в том, что они имеют малый вес, обладают большой прочностью и не подвержены коррозии.

В настоящее время перспективным направлением при разработке композитных материалов является использование в качестве основы объемного материала или преформы детали из различного вида технических нитей: углеродных, кремнеземных, кварцевых, стеклянных, синтетических, металлических, магнитных и др. [2]

Применение трехмерных тканых композитов в промышленности стремительно растет, например, в автомобилестроении [3], [4]; в строительстве [5]; авиастроении [6], органозамещающей медицине [7] и др.

Экономика России в настоящее время, как никогда, заинтересована в создании новых материалов (сырья и изделий) на основе химических материалов. Одним из сегментов рынка, где химическая и текстильная промышленности могут выгодно сотрудничать – это КМ. Это взаимодействие позволяет создавать новые материалы для многих отраслей промышленности РФ, сочетающие в себе свойства текстильных полотен и химических технологий [8].

Цель и задачи исследования

Учитывая, что большинство новых конструкционных материалов представляют собой композиты, основной задачей является исследование влияния армирования на конечные их физико-механические свойства.

В применяемых на сегодняшний день методах расчетов на прочность и жесткость (методы сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и др.) физические константы учитывают второй уровень неоднородности материала, то есть считается, что он состоит из совокупности квазиоднородных элементарных слоев, свойства которых известны [9].

Согласно ГОСТ композит (композиционный материал, композиционный материал) определяется как сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме, и/или фазовому состоянию, и/или химическому составу, и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители [10].

Таким образом, композит – это конструкция, состоящая из двух или более компонентов, состоящих из однородных материалов.

Для проведения различных расчетов деталей и проектирования конструкций из КМ необходимо знать физические константы, характеризующие способность тела сопротивляться деформированию при приложении к нему различных усилий. Этими константами являются эффективные модули упругости на растяжение – сжатие, изгиб и сдвиг описывающих упругие свойства элементарной частицы КМ – ячейки периодичности (ЯП) в различных направлениях.

Существует ряд методов определения этих физических констант, в основе которых лежат различные модели [11] представления структуры и механики КМ: полуэмпирические модели; модели, основанные на подходе эластичности; модели гомогенизации; методы численного FE-моделирования и др. [12].

Таким образом, определение и оценка упругих свойств имеет решающее значение для использования такого типа КМ в передовых отраслях промышленности. А предприятиям, специализирующимся на производстве такого рода изделий, нужна вариативность в расширении ассортимента продукции, чтобы сохранять конкурентоспособность и прибыльность в условиях современной рыночной экономики.

В связи с этим, цель данного научного исследования – применить для определения эффективных модулей упругости ЯП КМ, приближенный метод, основанный на использовании понятия "жесткость" конструкции и конструктивного элемента.

Методика исследования

При деформировании композита происходит формоизменение его внутренней структуры. Это может происходить за счет упругих свойств матрицы, объемной тканой структуры или их совместной деформации. Процесс формоизменения объемной тканой структуры вызывается приращением внешней нагрузки, что характеризует возникновение упругой и/или необратимой деформации ее конструктивных элементов, который можно охарактеризовать коэффициентом жесткости.

Так как композитный материал на основе объемной тканой структуры состоит из нитей, то при моделировании деформации и прочности нити, целесообразно принимать ее в виде стержня. В такой постановке механику деформирования его структуры в зависимости от вида деформации, можно описать механикой деформирования отдельных структурных единиц материала (нитей утка, основы и матрицы) в ячейке периодичности.

В композитах на тканой основе эффективные модули упругости зависят от формы нитей, их материала, расположения и их объемного содержания [9], [13] в структуре ЯП КМ.

Объемные тканые текстильные материалы, применяемые для производства различных изделий, могут испытывать деформации разного вида и интенсивности. По величине коэффициентов жесткости можно судить о прочности и жесткости уже не материала, а элемента или конструкции в целом [14], [15]. При определении коэффициента жесткости объемной тканой структуры необходимо исследование напряжений и деформаций в нитях утка и основы, внутренних сил и моментов.

В работе [14] приводятся определения обобщенной жесткости для элементов и конструкций в целом. Первое значение термина жесткость – это способность тела или конструкции сопротивляться изменению формы или размеров, то есть сопротивление образованию деформации.

Из прикладной механики известны следующие выражения [14], [16]:

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на растяжение-сжатие имеет вид:

$$c^p = \frac{EF}{L}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости первого рода материала стержня (модуль Юнга); F – площадь поперечного сечения стержня; L – длина стержня;

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на кручение имеет вид:

$$c^k = \frac{GJ_p}{L}, \quad (2)$$

где G – модуль упругости второго рода материала стержня (модуль упругости при кручении); J_p – полярный момент инерции поперечного сечения тела;

- жесткость (коэффициент жесткости) стержня на изгиб имеет вид:

$$c^и = \frac{EJ}{L}, \quad (3)$$

где J – момент инерции поперечного сечения тела.

Второе значение этого термина определяет жесткость как характеристику сечения элемента деформируемого тела, это общепринятые выражения EF , GJ_p , EJ , в (1), (2), (3).

Компонент ЯП объемной тканой структуры – нити, которые моделируются в нашем случае в виде упругих стержней. Стержень – это тело объемное, и длина L вместе с геометрическими характеристиками его поперечного сечения F , J_p , J в формулах (1), (2), (3) это показывают.

Если композитный материал – это конструкция, состоящая из нескольких элементов, соединенных параллельно [10], то

$$c^p = \sum_i c^p_i; c^k = \sum_i c^k_i; c^и = \sum_i c^и_i. \quad (4)$$

Если элементы соединены последовательно [10], то

$$c^p = \sum_i \frac{1}{c^p_i}; c^k = \sum_i \frac{1}{c^k_i}; c^и = \sum_i \frac{1}{c^и_i}, \quad (5)$$

где i – количество элементов составляющих композитную конструкцию.

Обратная величина к коэффициенту жесткости называется механической податливостью. Для случая упругих деформаций в записи закона Гука рассматривается как физико-геометрическая характеристика сечения элемента конструкции и равна произведению модуля упругости материала и соответствующей геометрической характеристики сечения [15].

Модули упругости и коэффициенты жесткости связывают соотношения (1), (2), (3). Таким образом, зная коэффициенты жесткости ЯП и упругие характеристики матрицы в интересующем направлении, можно определить, из соотношений (6), (8), (10), интересующие модули упругости на растяжение-сжатие, изгиб и кручение (сдвиг) для ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на растяжение-сжатие:

$$E^p_{\text{яп}} = E^p_{\text{арм. яп}} + E^p_{\text{матр. яп}}, \quad (6)$$

$$E^p_{\text{арм. яп}} = c^p_{\text{арм. яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{F_{\text{яп}}}, \quad c \quad (7)$$

где $E^p_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на растяжение-сжатие; $E^p_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на растяжение-сжатие; $c^p_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования на растяжение-сжатие ЯП; $L_{\text{яп}}$ – длина ЯП КМ; $F_{\text{яп}}$ – площадь поперечного сечения ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на кручение(сдвиг):

$$G_{\text{яп}} = G^k_{\text{арм. яп}} + G^k_{\text{матр. яп}}, \quad (8)$$

$$G^k_{\text{арм. яп}} = c^k_{\text{арм.яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{J_{p_{\text{яп}}}}, \quad (9)$$

где $G^k_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на кручение(сдвиг); $G^k_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на растяжение-сжатие; $c^k_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования на кручение ЯП; $J_{p_{\text{яп}}}$ – полярный момент инерции поперечного сечения ЯП КМ.

Модуль упругости ЯП КМ на изгиб:

$$E^i_{\text{яп}} = E^i_{\text{арм. яп}} + E^i_{\text{матр. яп}}, \quad (10)$$

$$E^i_{\text{арм. яп}} = c^i_{\text{арм. яп}} \frac{L_{\text{яп}}}{J_{\text{яп}}}, \quad (11)$$

где $E^i_{\text{арм. яп}}$ – модуль упругости армирования ЯП на изгиб; $E^i_{\text{матр. яп}}$ – модуль упругости матрицы ЯП на изгиб; $c^i_{\text{арм. яп}}$ – коэффициент жесткости армирования ЯП на изгиб; $J_{\text{яп}}$ – момент инерции поперечного сечения ЯП КМ.

В формулах (7), (9), (11), умножая полученный коэффициент жесткости для армирования ЯП на отношение длины $L_{\text{яп}}$ к характеристике поперечного сечения ЯП композита F, J_p или J , мы освобождаемся от влияния размеров и формы ячейки периодичности композита и будем иметь только ее упругие характеристики, что и требуется определить.

Коэффициенты жесткости стержней можно определить экспериментально, если позволяют размеры, форма образцов и оборудование, или теоретически, например, методами сопротивления материалов.

$$c^p = \frac{\Delta P}{\Delta L}, \quad (12)$$

$$c^k = \frac{\Delta T}{\Delta \varphi}, \quad (13)$$

$$c^i = \frac{\Delta M}{\Delta \chi}, \quad (14)$$

где $\Delta P, \Delta T, \Delta M$ – приращения соответствующих силовых факторов, растягивающего усилия, крутящего и изгибающего моментов, вызывающих деформации растяжения-сжатия, кручения и изгиба стержня, соответственно; $\Delta L, \Delta \varphi, \Delta \chi$ – приращения удлинения, угла закручивания, кривизны стержня, соответственно.

Возникает вопрос, как выбрать размер ЯП композита? Так как композит – это конструкция, и в то же время материал, где множество раз повторяются и соединены между собой конструктивные элементы, то ячейка периодичности должна включать все повторяющиеся компоненты.

В качестве примера применения изложенного выше метода, некоторые моменты которого отражены также в [17], определим

модуль упругости E_{xx} , ЯП КМ на основе тканой структуры (рис. 1:– а) – геометрическая модель объемной тканой структуры; б) – трехмерная модель объемной тканой структуры; в) – геометрическая модель элемента утка в среднем слое: d_y – диаметр нити утка; d_o – диаметр нити основы; H – высота волны осевой линии нити утка; l_n – геометрическая плотность по основе в одном слое; L_n – расстояние между центрами основных нитей в крайних точках высот волн изгиба нитей утка; S – ширина ячейки объемной тканой структуры вдоль утка; D – ширина объемной тканой структуры; L – длина объемной тканой структуры; k – толщина объемной тканой структуры) из [2].

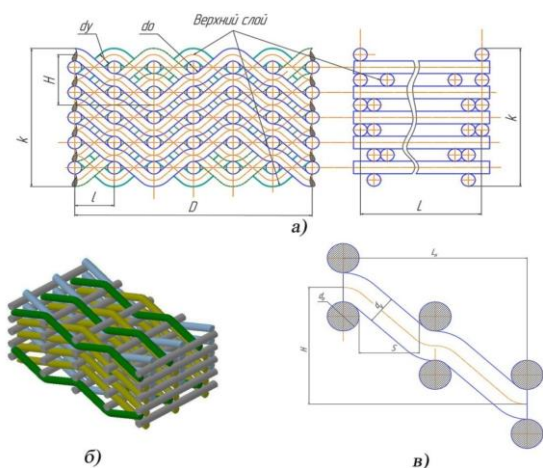


Рис. 1

Чтобы приступить к определению эффективных упругих характеристик ЯП КМ, необходимо указать некоторые основные положения и допущения, касающиеся объемной тканой структуры и матрицы:

- при получении результатов будем базироваться на механике жестких нитей, опирающуюся на основные гипотезы и допущения теории деформации стержней [18];

- вне зоны контакта с уточинами нити основы прямолинейны, смятие и взаимное перемещение нитей в зоне контакта несущественно, нити линейно упругие и абсолютно жесткие;

- элемент утка и основы – заземленная балка, в концевых сечениях;

- однородность деформации, то есть деформации структурных элементов (нитей

основы и утка) пропорциональны деформации всей ЯП КМ;

- при моделировании деформирования элемента трехмерной тканой структуры усилия приложены к области, которая существенно больше ее структурного элемента – ЯП;

- в исследовании рассматриваются только упругие деформации армирования и матрицы, вязкоупругие и пластические деформации во внимание не принимаются.

Вырежем элементарную ячейку периодичности (рис. 2 – структурная схема ячейки периодичности композиционного материала и его упругие характеристики) из середины КМ (не будем учитывать верхний или нижний слой, имеющий в структуре особенности нити утка), разработанного на основе объемной тканой структуры [2].

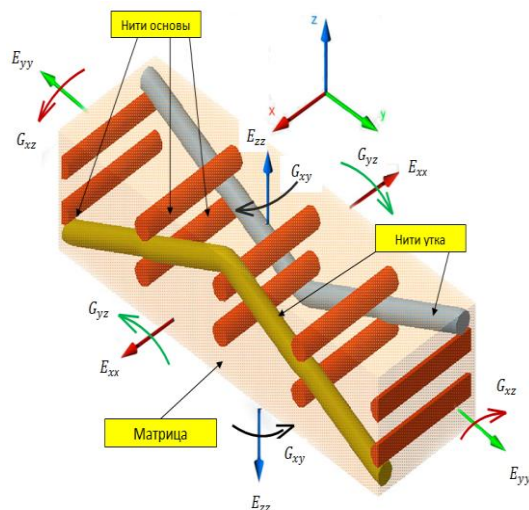


Рис. 2

Для определения E_{xx} необходимо знать модули упругости на растяжение-сжатие для армирования $E_{арм. яп}^p$ и матрицы $E_{матр. яп}^p$. Модули упругости для материала матрицы и нитей – это справочные величины, которые заранее известны. Для определения $E_{арм. яп}^p$ необходимо определить жесткость $s_{арм. яп}^p$ в направлении нитей основы. Очевидно, что в этом направлении жесткость ЯП при деформации растяжения-сжатия будут определять элементы нитей основы и их жесткость. Эту величину определяет зависимость (15):

$$c_{\text{арм. яп}}^p = \sum_i c_i^p, \quad (15)$$

где c_i^p – жесткость одного элемента нити основы на растяжение-сжатие; i – количество нитей основы в структуре ЯП.

Жесткость одиночного элемента нити основы (стержня) при деформации растяжения-сжатия определяется формулами (1 или (12). Используя полученный результат, из (7) определяется $E_{\text{арм. яп}}^p$ – модуль упругости армирования ЯП на растяжение-сжатие. Затем, используя $E_{\text{арм. яп}}^p$ и $E_{\text{матр. яп}}^p$, по (6) определим искомый модуль упругости ЯП представленного КМ $E_{xx} = E_{\text{яп}}^p$.

По вышеизложенной методике могут быть определены: эффективные модули упругости на сдвиг G_{yz} , G_{xy} , G_{xz} эффективные модули упругости на растяжение-сжатие E_{xx} , E_{zz} , E_{yy} .

В соответствии с исходными данными (табл. 1 – геометрические, качественные и количественные характеристики ячейки периодичности композита) определены эффективные модули упругости для ЯП КМ в различных направлениях (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Геометрические и качественные характеристики ячейки периодичности композита						
$L_{\text{яп}}$, мм	$b_{\text{яп}}$, мм	$h_{\text{яп}}$, мм	d_o , мм	d_y , мм	материал нитей	материал матрицы
43,8	12,77	10	2	2	СТ-3	эпоксидная смола
Физико-механические характеристики материалов композита						
Материал	E, ГПа		G, ГПа		μ	
Ст3	200		74		0,3	
Эпоксидная смола	3		1,3		0,4	

Т а б л и ц а 2

Упругие характеристики композита					
E_{xx} , ГПа	E_{yy} , ГПа	E_{zz} , ГПа	G_{yz} , Па	G_{xy} , Па	G_{xz} , Па
17,06	10,41	8,60	$2,2 \cdot 10^5$	$5,15 \cdot 10^4$	$2,85 \cdot 10^4$

Обсуждение результатов

В результате определены упругие характеристики периодической ячейки композита. Как и следовало ожидать, наибольшее значение модуля упругости на растяжение-сжатие в направлении нитей основы E_{xx} , так как в этом направлении присутствует группа нитей основы, которые и определяют упругость в этом направлении. Модуль E_{yy} в направлении оси "у" определяют 2 нити и матрица, но ее вклад в упругость в этом направлении наравне с нитями утка. В трансверсальном направлении упругость E_{zz} определяется нитями утка, которые связывают между собой нити основы двух слоев и матрицей, объем которой в этом направлении максимален. В формировании упругости в направлениях осей "у" и "z" существенную роль играют нити основы, добавляющие жесткости ячейке в данных направлениях. В формировании мо-

дулей упругости на кручение (сдвиг) основную роль играет матрица композита, так как нитей, сопротивляющихся кручению, мало и они очень малы (в направлении оси "х") либо они отсутствуют.

Коэффициент Пуассона – μ , в направлении оси "х" во многом будет определяться свойствами материала матрицы, то есть $\mu_{\text{эя}} = \mu_{\text{матр}}$. В направлении оси "у" он будет несколько ниже, так как усиленное армирование в направлении оси "х" будет препятствовать поперечной деформации ЯП. Также это армирование будет препятствовать сжатию ЯП вдоль оси "z", и поэтому коэффициент Пуассона здесь тоже будет несколько ниже.

В Ы В О Д Ы

1. Рассмотрена геометрическая модель ЯП КМ на основе многослойной тканой

структуры с учетом геометрических характеристик нитей утка и нитей основы.

2. Применен приближенный метод определения эффективных упругих характеристик КМ, в основе которого лежит понятие механической жесткости конструкции и конструктивного элемента.

3. Определены эффективные модули упругости ЯП КМ.

4. Основную роль в таком виде КМ играют его структура, форма и материал нитей.

5. При решении поставленной задачи использовались методы прикладной механики и механики композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *El-Dessouky H.M., Snape A.E., Turner J.L., Saleh M.N., Tew H., Scaife R.J.* 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017.

2. *Пирогов Д.А., Евграфова К.И.* Математическое моделирование квазистатического процесса деформирования нити утка при формировании многослойной тканой структуры // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности – 2019, №3. С.87...92.

3. *Bayraktar H., Ehrlich D., Goering J., Mcclain M., Composites A.E., Hampshire N., et al.* 3D Woven Composites for Energy Absorbing. 20th Int. Conf. Compos. Mater., – Copenhagen, 2015. P. 19...24.

4. *EL-Dessouky H., Snape A., Tew H., Scaife R., Modi D.K., Kendall K. et al.* Design, weaving and manufacture of a large 3d composite structure for automotive applications. 7th World Conf. 3D Fabr. their Appl. 3D Fabr. their Appl; 2016.

5. *Redman C., Bayraktar H., Mcclain M.* Curved Beam Test Behavior of 3D Woven Composites. SAMPE Conf; 2014.

6. *Jewell J., Kennedy R., Menard A.* Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011.

7. *Chan K. S., Liang W., Francis W. L., Nicoletta D. P.* A multiscale modeling approach to scaffold design and property prediction // J. Mech. Behav. Biomed. Materials. – Vol. 3, № 8, 2010. P. 584...593.

8. *Барабанищикова И.С., Смирнова Т.В., Карева Т.Ю.* Композиционные материалы на тканой основе // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2019, № 1-1. С. 28...30.

9. *Скворцов Ю.В.* Механика композиционных материалов. – Самара, 2013.

10. ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Термины и определения. – М., 2015.

11. *Younes R., Hallal A., Fardoun F., Chehade F.H.* Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials // Composite Materials Book 1 Chapter August. – 2012. DOI: 10.5772/50362 <http://dx.doi.org/10.5772/50362>.

12. *Муйземнек А.Ю., Иванова Т.Н., Карташова Е.Д.* Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств полимерных слоистых композитов из угле- и стеклотканей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021, №2. С. 88...105. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.09

13. *Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В.* Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (ОБЗОР) // Авиационные материалы и технологии. – 2019, №4 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemno-armiruyuschie-tselnotkanye-preformy-dlya-izgotovleniya-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (дата обращения: 24.09.2021)

14. *Чаюн И.М.* Жесткость конструкций и их элементов // Труды Одесского политехнического университета. – 2010, № 1-2. С. 11...16.

15. Информационный электронный ресурс "Станки и инструменты". [Электронный ресурс]. – Электрон.текстовые, граф., зв. дан.; URL: <https://instanko.ru/drugoe/modul-uprugosti-stali.html> (дата обращения: 27.09.2021).

16. *Вульфсон И.И.* Краткий курс теории механических колебаний. – Библиотека ВНТР. – М.: ВНТР, 2017.

17. *Тимошенко С.П. Гере Дж.* Механика материалов. – М.: Мир, 1976.

18. *Беляев Н.М.* Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1976.

REFERENCES

1. *El-Dessouky HM, Snape AE, Turner JL, Saleh MN, Tew H, Scaife RJ.* 3D weaving for advanced composite manufacturing: From research to reality. SAMPE Conf; 2017;

2. *Pirogov, D.A., Evgrafova, K.I.* Mathematical modeling of quasi-static process of weft yarn deformation during formation of multilayer woven structure / D.A. Pirogov, K.I. Evgrafova // *Izvestiya vuzov. Technology of textile industry* - 2019, № 3(381). С.87-92.

3. *Bayraktar H, Ehrlich D, Goering J, Mcclain M, Composites AE, Hampshire N, et al.* 3D Woven Composites for Energy Absorbing. 20th Int. Conf. Compos. Mater., Copenhagen; 2015. pp. 19-24;

4. *EL-Dessouky H, Snape A, Tew H, Scaife R, Modi DK, Kendall K, et al.* Design, weaving and fabrication of a large 3d composite structure for automotive applications. 7th World Conf. 3D Fabr. their Appl. 3D Fabr. their Appl; 2016;

5. *Redman C, Bayraktar H, Mcclain M.* Curved Beam Test Behavior of 3D Woven Composites. SAMPE Conf; 2014;

6. Jewell J, Kennedy R, Menard A. Full-scale LEAP Fan Blade-Out Rig Test Yields Outstanding Results; Advanced LEAP Fan Endurance Test Complete. CFM Power Flight; 2011;
7. Chan K. S., Liang W., Francis W. L., Nicoletta D. P. A multiscale modeling approach to scaffold design and property prediction // J. Mech. Behav. Biomed. Materials. - 2010. - Vol. 3. - No. 8. - P. 584-593.]
8. Barabanshchikova I. S. Composite materials on a woven base / I. S. Barabanshchikova, T. V. Smirnova, T. Yu. Kareva // Young Scientists - development of the National Technological Initiative (POISK). - 2019. - № 1-1. - С. 28-30.
9. Skvortsov Y.V. Mechanics of composite materials: tutorial-methodical complex of the discipline / Y.V. Skvortsov - Samara. 2013. 94 с.
10. GOST 32794-2014 Polymer composites. Terms and definitions: M., 2015. 98 с.
11. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials / R. Younes, A. Hallal, F. Fardoun, F.H. Chehade // Composite Materials Book 1 Chapter August. - 2012. DOI: 10.5772/50362 <http://dx.doi.org/10.5772/50362>.
12. Muizemnek A., Ivanova T.N., Kartashova E.D. Comparison of the results of experimental and calculated determination of the effective characteristics of elastic properties of polymer layered composites of carbon and glass fabrics // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. - 2021. - № 2. С. 88-105. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.09
13. Belinis P.G., Donetsk K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu, Bystrikova D.V. Volumetric reinforcing all-woven preforms for the manufacture of polymer composites (OBSERVER) // Aviation Materials and Technology. 2019. №4 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemno-armiruyuschie-tselnotkanye-preformy-dlya-izgotovleniya-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor> (date of reference: 24.09.2021)
14. Chayun I. M. Stiffness of structures and their elements // Proceedings of Odessa Polytechnic University. - 2010. - № 1-2. - С. 11-16.
15. Informational electronic resource "Machines and tools". [Electronic resource].- Electron.text, graph, link data; URL: <https://instanko.ru/drugoe/modul-uprugosti-stali.html> (date of reference: 27.09.2021).
16. Wolfson I. I. A brief course in the theory of mechanical vibrations / I. I. Wolfson - VNTR Library. - M.: ENTR, 2017. - 241 с.
17. Timoshenko, S.P. Mechanics of materials / S.P. Timoshenko, J. Gere. - Moscow: Mir, 1976. - 670с.
- Belyaev, N.M. Resistance of Materials [Text]/N.M. Belyaev.-M.: Nauka, 1976.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 20.12.21.

УДК 677.024.1
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_271

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНОЙ НИТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ОРИЕНТАЦИИ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A CARBON FILAMENT DEPENDING ON ITS ORIENTATION IN A COMPOSITE MATERIAL

М.В. КИСЕЛЕВ, А.Б. БАЛАШОВ, С.Е. ГОЛУБЕВ

M.V. KISELEV, A.B. BALASHOV, S.E. GOLUBEV

(ООО НПО "Программируемые Композиты", Россия)

(OOO NPO "Programmable Composites" LLC, Kostroma, Russia)

E-mail: kisselev50@mail.ru; balashovandrej@yandex.ru; golubev007@mail.ru

Статья посвящена экспериментальному исследованию механических характеристик углеродных нитей в композиционных материалах в зависимости от угла ее ориентации в композите по отношению к направлению вектора действующей силы при трех напряженно-деформируемых состояниях

– растяжения, сжатия и сдвига. Полученные механические характеристики углеродной нити необходимы для формирования исходных данных для CAE расчетов при выборе модели поведения композиционного материала как ортотропного тела. Определены критерии прочности для углеродной нити в композите в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы, согласно феноменологической теории прочности. Разработана методика определения механических свойств одиночной нити в композиционном материале на основе теории совместной деформации. Обосновано применение безутковых препрегов для решения поставленной задачи. Выполнены серии экспериментальных испытаний конкретного углеродного препрега при деформациях сжатия, растяжения и сдвига. Выполнена статистическая обработка полученных результатов, получена высокая достоверная вероятность данных. Получены аппроксимирующие зависимости механических характеристик углеродной нити от угла между осью нити и вектором действия внешней силы.

The article is devoted to the experimental study of the mechanical characteristics of carbon filaments in composite materials depending on its orientation angle in the composite with respect to the direction of the acting force vector under three stress-strain states – stretching, compression and shear. The obtained mechanical characteristics of the carbon filament are necessary for the formation of initial data for CAE calculations when choosing a model of a composite material behavior as an orthotropic body. The strength criteria for a carbon filament in a composite are determined depending on the angle between the axis of the filament and the vector of an external force action, according to the phenomenological theory of strength. A technique for determining the mechanical properties of a single thread in a composite material based on the theory of joint deformation has been developed. The use of non-track prepregs to solve the problem is justified. A series of experimental tests of a specific carbon prepreg under compression, tension and shear deformations have been performed. Statistical processing of the obtained results was performed, a high confidence probability of the data was obtained. Approximating dependences of the mechanical characteristics of the carbon filament on the angle between the axis of the filament and the vector of an external force action are obtained.

Ключевые слова: свойства композиционных материалов, 3D-ткачество, углеродная нить, критерии прочности.

Keywords: properties of composite materials, 3D weaving, carbon thread, strength criteria.

Актуальность проектирования композиционных материалов (КМ) с заданными Заказчиком эксплуатационными свойствами сегодня не вызывает сомнений. Наиболее перспективным решением данной задачи является современное направление построения цифровых двойников изделий и выполнение их виртуальных испытаний с целью минимизации затрат и сокращения сроков на разработку новых КМ. Одним из самых сложных этапов построения цифро-

вого двойника изделия является выполнение CAE расчетов КМ и прогнозирование их свойств [1]. В свою очередь, выполнение CAE расчетов невозможно без знания физико-механических свойств всех материалов, входящих в состав композита. Для полимерных КМ свойства связующего не представляют существенных сложностей, поскольку его поведение, как правило, описывается как поведение изотропного мате-

риала с известными свойствами от производителя. Сложность в определении свойств КМ представляет углеродная нить, которая в пропитанном виде в КМ имеет совершенно другие свойства, чем в исходном сухом состоянии. Кроме того, известна существенная зависимость механических свойств углеродной нити от угла между осью нити и вектором действия внешней силы [2]. Это говорит о том, что свойства КМ будут не только анизотропны по всем координатным осям, но и существенно различны по областям материала в зависимости от ориентации нити в пространстве композита. Игнорирование факта существенной зависимости свойств композита от ориентации нити в композите приведет к значительным погрешностям при определении несущей способности композитной детали. Особенно это актуально для композитов на основе технологии 3D-ткачества [3], [4], поскольку в них углеродная нить наиболее сложно ориентирована по всему объему композита. Изучение поведения углеродной нити в КМ позволит в перспективе целенаправленно формировать текстильную структуру преформы для повышения механических свойств готового изделия.

Данная статья посвящена исследованию зависимости механических характеристик углеродной нити в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы. Модель поведения углеродной нити в композите выбрана как модель ортотропного тела. В связи с этим все испытания углеродной нити выполнены для деформаций растяжения, сжатия и сдвига. Для определения критериев прочности углеродной нити в композите использована феноменологическая теория прочности. Более подробный анализ критериев разрушения дан в источниках [5...9].

Для получения КМ и выполнения исследований выбран безутковый препрег углеродный 230 0/NF E320 39% от фирмы SGL Carbon SE. Технические характеристики представлены в [10]. Выбор данного материала обоснован машинным способом получения образцов и гарантированной 100%-ной пропиткой связующим, что обеспечивает достоверность получаемых ре-

зультатов. Для отверждения препрегов и создания давления при застывании полимерной смолы использовался прибор VU220DGT. Данное устройство имеет плоский столик, возможность прессования образца и регулируемый нагрев до 180°C.

Для расчета механических характеристик углеродной нити в КМ разработана методика, основанная на теории совместной деформации при испытаниях плоских образцов КМ. Испытания КМ выполнялись по ГОСТ Р 56785-2015 "Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов", ГОСТ Р 568122015 "Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке", ГОСТ Р 572072016 "Композиты полимерные. Определение характеристик при сдвиге методом перекашивания образцов с V-образным вырезом". Графическое представление исходных данных для расчета свойств углеродной нити в композиционном материале, в зависимости от схемы нагружения образца, представлено на рис. 1.

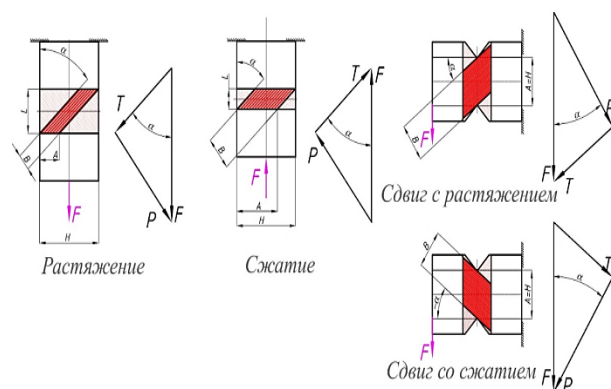


Рис. 1

Расчет напряжений для образцов из препрегов. Обозначения и размерности: F – нагрузка образец, Н; T – нагрузка вдоль волокон образца, Н; P – нагрузка поперек волокон образца, Н; α – угол наклона волокон в образце, град.; H – ширина образца, мм; A – ширина рабочей зоны образца, мм; L – длина рабочей зоны образца, мм; B – ширина полоски волокон в рабочей зоне образца, мм; δ – толщина образца, мм; k – коэффициент заполнения образца волокном

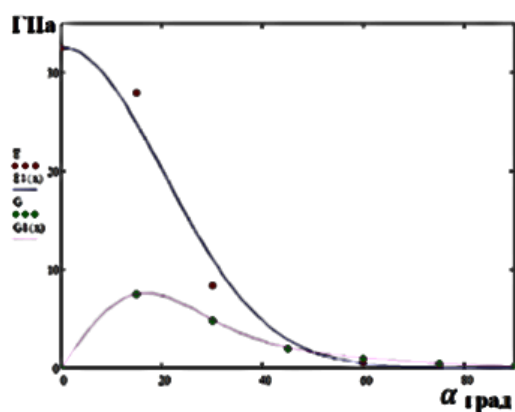
($k=0,84$); Δ – абсолютная деформация образца (в направлении силы F), мм; ε – относительная деформация образца (в направлении силы F), %; σ – нормальное (по отношению к нитям) напряжение, МПа; τ – касательное (по отношению к нитям) напряжение, МПа; E – модуль упругости нитей 1-го

рода; G – модуль упругости нитей 2-го рода.

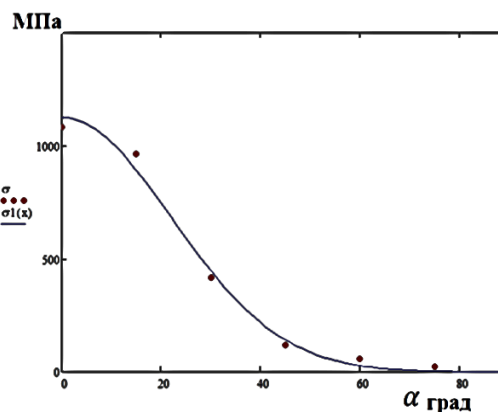
Расчетные зависимости, использованные для определения механических свойств углеродной нити в композиционном материале, представлены в табл. 1.

Таблица 1

	Для растяжения и сжатия	Для сдвига
Связующее	$\sigma_{90} = \frac{F_{90}}{H\delta}$	$\tau_{90} = \frac{F_{90}}{H\delta} = \frac{F_{90}}{A\delta}$
	$\varepsilon_{90} = \frac{\Delta_{90}}{L}$	$\varepsilon_{90} = \frac{\Delta_{90}}{H} = \frac{\Delta_{90}}{A}$
	$E_{90} = \frac{\sigma_{90}}{\varepsilon_{90}} = \frac{LF_{90}}{H\delta\Delta_{90}}$	$G_{90} = \frac{\tau_{90}}{\varepsilon_{90}} = \frac{F_{90}}{\delta\Delta_{90}}$
В направлениях нагрузений	$T = F \cos \alpha$	$T = F \sin \alpha$
	$P = F \sin \alpha$	$P = F \cos \alpha$
	$A = H - L \operatorname{tg} \alpha$	$A = H$
	$B = A \cos \alpha$	
	$\sigma_{\alpha} = \frac{T}{B\delta k}$	
	$\tau_{\alpha} = \frac{P}{B\delta k}$	
	$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$	$\varepsilon = \frac{\Delta}{A} = \frac{\Delta}{H}$
$E_{\alpha} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\varepsilon} = \frac{T}{\varepsilon B\delta k}$		
$G_{\alpha} = \frac{\tau_{\alpha}}{\varepsilon} = \frac{P}{\varepsilon B\delta k}$		
По волокнам	$F = \varepsilon\delta \left[\frac{EAk}{\cos \alpha} + E_{90}(H - Ak) \right]$	$F = \varepsilon\delta A \left[\frac{Gk}{\cos \alpha} + G_{90}(1 - k) \right]$
	$E = \frac{F}{\varepsilon\delta} - E_{90}(H - Ak) \cos \alpha$	$G = \frac{F}{\varepsilon\delta A} - G_{90}(1 - k) \cos \alpha $
	$\sigma = \frac{E\varepsilon}{\cos \alpha}$	$\tau = \frac{G\varepsilon}{\cos \alpha}$
	$\tau = \sigma \operatorname{tg} \alpha$	$\sigma = \tau \operatorname{tg} \alpha$



а)



б)

Рис. 2

Индекс при параметрах соответствует углу наклона волокон по отношению к силе F . Соответственно параметры с индексом 90 характеризуют связующее. Результаты механических характеристик углеродной нити от ее угла наклона в композите при деформации сжатия, растяжения и сдвига представлены на рис. 2 (результаты аппроксимации экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при сжатии от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при сжатии от угла наклона в композите), рис. 3 (результаты аппроксимации

экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при растяжении от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при растяжении от угла наклона в композите) и рис. 4 (результаты аппроксимации экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при сдвиге от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при сдвиге от угла наклона в композите) соответственно. На них же представлены результаты аппроксимации полученных экспериментальных данных различными уравнениями регрессии.

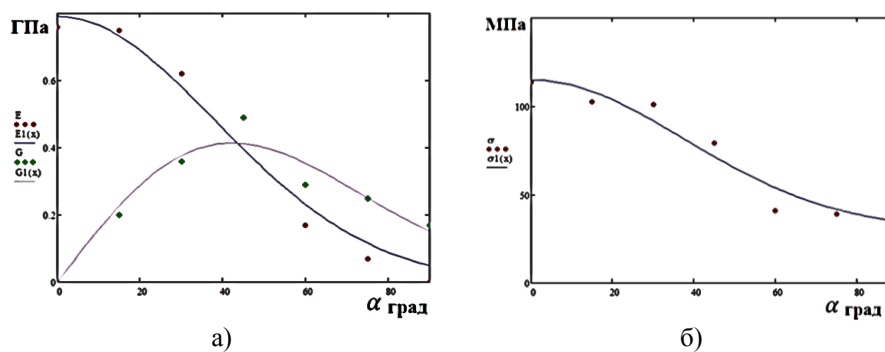


Рис. 3

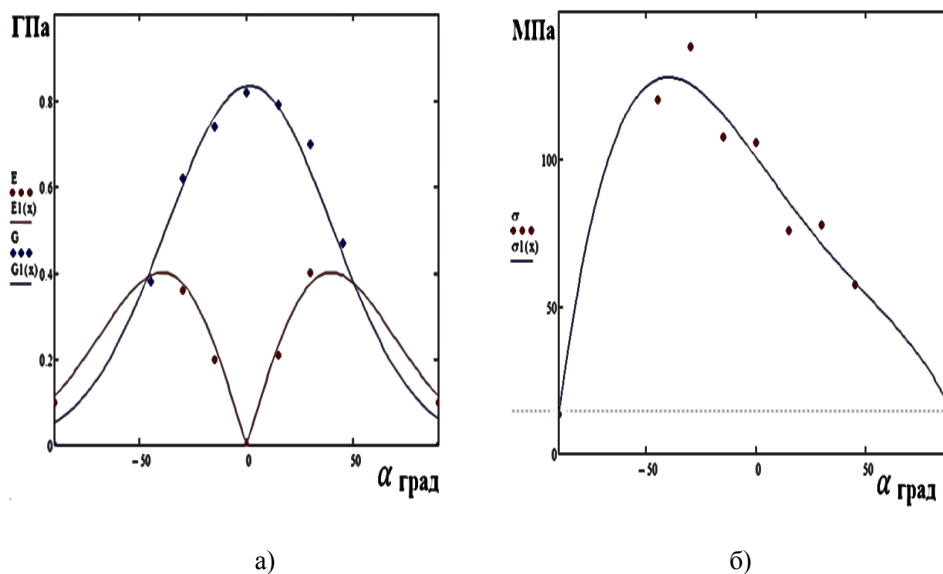


Рис. 4

Для аппроксимации модуля упругости 1-го рода и предела прочности при растяжении и сжатии, а также модуля упругости 2-го рода при сдвиге выбрано показательное уравнение:

$$y = a \left(\frac{b}{c} \right)^{-x^2} \quad (1)$$

Аппроксимация модуля упругости 2-го рода при растяжении и сжатии, а также для

модуля упругости 1-го рода при сдвиге выполнена первой производной показательного уравнения с приведением уравнения к знаку абсолютной величины:

$$y = \frac{a|x| \ln(b)}{b^{x^2}}. \quad (2)$$

Аппроксимация предела прочности при сдвиге выполнена с использованием полинома 4 степени:

$$y = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5. \quad (3)$$

В результате оценки достоверности результатов испытаний доверительная погрешность для процесса растяжения 4,48%, для сжатия 9,06%, для сдвига 20,96%. Наибольший коэффициент вариации данных получен при сдвиге, который оче-

видно, объясняется более сложными схемами описания поведения композиционного материала при сложных видах деформации, связанных с нелинейным поведением материала, и описание его с помощью линейных зависимостей схематизации диаграмм деформирования дает существенные погрешности.

Обработка результатов с использованием многофакторного корреляционно-регрессионного анализа позволила определить тесноту связей исследуемых величин при различных видах деформации. Для анализа использовалась модель с числом факторов 7 при растяжении и числом факторов 6 при сжатии и сдвиге. Для этого исследовалось влияние каждого из них в отдельности, а также совокупное их воздействие на моделируемый показатель Y . Набор исследуемых величин представлен в табл. 2.

Таблица 2

Процесс	Модуль Юнга	Разрывная нагрузка	Абсолютная деформация	Площадь сечения	$\sin(\alpha)$	$\cos(\alpha)$	Относительная деформация	Длина рабочей зоны
	Е, ГПа	F, Н	Δ , мм	S, м ²			ε , %/100	L, мм
Растяжение	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Сжатие	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	-
Сдвиг	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	-

Статистическая значимость общего качества уравнения множественной регрессии проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$ (см. табл. 3), то коэффициент детерминации статистически значим и уравнения регрессии статистически надежны для растяжения, сжатия и сдвига.

Статистическая значимость влияния исследуемых факторов $X_1 \dots X_7$ на моделируемый показатель Y для растяжения, сжатия и сдвига представлена на рис. 5.

В исследуемой факторной модели установлено, что совокупное воздействие ис-

следуемых факторов на моделируемый показатель Y общей вариабельности объясняется изменением факторов X_i для растяжения 99,97%, для сжатия 98,65%, для сдвига 78,03%. Статистической процент качества уравнения регрессии проведенного исследования для растяжения и сжатия подтверждает высокой уровень достоверности полученных результатов, так как значение коэффициента детерминации близко к 1. При проведении исследований на сдвиг качество моделирования показателя Y общей вариабельности снижается до 78,03%.

Таблица 3

Критерий Фишера модели F	4194,709	170,62	178,37
Критерий Фишера табличный	3.14	2.85	3.09

Статистическая значимость влияния исследуемых факторов $X_1 \dots X_7$ на моделируемый показатель Y для растяжения, сжатия и сдвига представлена на рис. 5.

В исследуемой факторной модели установлено, что совокупное воздействие исследуемых факторов на моделируемый показатель Y общей вариабельности объясняется изменением факторов X_i для растяжения 99,97%, для сжатия 98,65%, для сдвига

78,03%. Статистической процент качества уравнения регрессии проведенного исследования для растяжения и сжатия подтверждает высокой уровень достоверности полученных результатов, так как значение коэффициента детерминации близко к 1. При проведении исследований на сдвиг качество моделирования показателя Y общей вариабельности снижается до 78,03%.

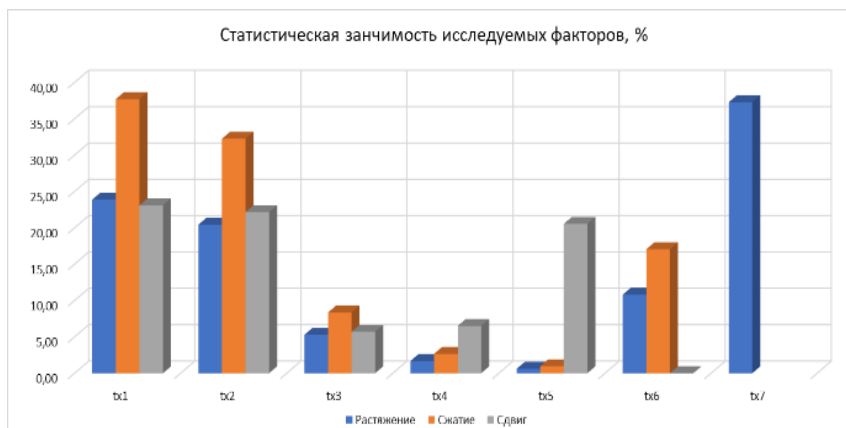


Рис. 5

Сравнение полученных экспериментальных данных с данными зарубежных исследователей [2] показывает хорошее качественное совпадение результатов, однако приведенные в статье результаты включают в себя и исследование деформации сдвига.

Выполненные экспериментальные исследования дают представление о влиянии угла наклона углеродной нити на ее диаграмму деформирования при различных видах напряженно-деформируемого состояния (НДС). Таким образом можно экспериментально определить самую важную характеристику углеродного волокна – предел прочности при различной его ориентации в композиционном материале при различных НДС, что дает возможность выполнять расчеты в САЕ системах заданием соответствующих свойств или прогнозировать свойства композиционных материалов с использованием правила смеси методом гомогенизации.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения свойств углеродной нити от ее положения в композиционном материале.
2. Разработанная методика реализована на конкретном композиционном материале. Получены статистически достоверные регрессионные модели зависимости механических характеристик углеродного волокна в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы.
3. Полученные регрессионные зависимости могут быть использованы для последующего расчета КМ в САЕ системах и целенаправленно формировать текстильную структуру преформы для повышения механических свойств готового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Guenther Lutz*. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] - 2014. // Access mode - <https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guideline-pdf>. Access date 21.05.2021.

2. Daniel I.M. Engineering mechanics of composite materials. – New York, - 2006.

3. Behera B.K., Ishai O., Mishra R. 3-dimensional weaving // Indian journal of fibre & textile research. – №33, 2008. P. 274...287.

4. Tian W., Zhu C., Shanghai S.W. Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Dong Hua University. – P.23...27.

5. Орешико Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В. Обзор критериев прочности материалов [Мультимедиа] // Труды ВИАМ. – М.: ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ, 2019, №9 (81). С. 108...126.

6. Муїземнек А.Ю., Карташова Е.Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017.

7. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Изд-во физ.-матем. лит., 2013.

8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с японск. – М.: Мир, 1982.

9. Скворцов Ю.В. Механика композиционных материалов. – Самара, 2013.

10. Компания ООО "Комфайбер Про": офиц. сайт [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.carbon-info.ru

REFERENCES

1. Guenther Lutz. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] - 2014. // Access mode - <https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guideline-pdf>. Access date 05/21/2021.

2. Daniel I.M. Engineering mechanics of composite materials. – New York, - 2006.

3. Behera V.K., Ishai O., Mishra R. 3-dimensional weaving // Indian journal of fiber & textile research. - No. 33, 2008. P. 274 ... 287.

4. Tian W., Zhu C., Shanghai S.W. Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Donghua University. – P.23...27.

5. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V. Review of criteria for the strength of materials [Multimedia] // Proceedings of VIAM. - M.: FSUE "VIAM" State Scientific Center of the Russian Federation, 2019, No. 9 (81). pp. 108...126.

6. Muizemnek A.Yu., Kartashova E.D. Mechanics of Deformation and Fracture of Polymer Layered Composite Materials. - Penza: Publishing House of PGU, 2017.

7. Grishin V.I., Dzyuba A.S., Dudarkov Yu.I. Strength and stability of elements and joints of aircraft structures made of composites. – М.: Publishing House of Phys.-Math. lit., 2013.

8. Fujii T., Dzako M. Fracture mechanics of composite materials / Per. from Japanese – М.: Mir, 1982.

9. Skvortsov Yu.V. Mechanics of composite materials. – Samara, 2013.

10. LLC "Comfiber Pro": official. site [Electronic resource]. - Access mode: www.carbon-info.ru

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО НПО "ПК". Поступила 28.12.21.

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_279

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТКАНИ
ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫЙ АНАЛОГ
ДЛЯ РАСЧЕТА ЕЕ ПАРАМЕТРОВ***

**MATHEMATICAL MODEL OF A TECHNICAL FABRIC STRUCTURE
FOR REINFORCEMENT OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS
AND FINITE-DIFFERENCE ANALOGUE
FOR CALCULATION OF ITS PARAMETERS**

*С.Г. СТЕПАНОВ, Л.Б. МАСЛОВ, В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Г.Ф. САГИТОВА,
Д.А. ЖУНИСБЕКОВА, А.Ж. СУЙГЕНБАЕВА*

*S.G. STEPANOV, L. B. MASLOV, V.M. JANPAIZOVA, G.F. SAGITOVA,
D.A. ZHUNISBEKOVA, A.ZH. SUIGENBAEVA*

*(Ивановский государственный политехнический университет, Россия,
Ивановский государственный энергетический университет, Россия,
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)*

*(Ivanovo State Polytechnic University, Russia,
Ivanovo State Power Engineering University, Russia,
M. Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazakhstan)*

E-mail: step-sg@mail.ru

Проанализированы достоинства и недостатки полимерных композиционных материалов, армированных тканями. Исследована структура технической ткани полотняного переплетения, применяемой для армирования полимерных композиционных материалов, получены расчетная, математическая модели ее строения и конечно-разностный аналог для расчета параметров ткани.

The advantages and disadvantages of polymer composite materials reinforced with fabrics are analyzed. The structure of a technical fabric of a plain weave used for reinforcing polymer composite materials has been investigated, a computational, mathematical model of its structure and a finite-difference analogue for calculating the parameters of the fabric have been obtained.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

Ключевые слова: классификация по материалу нитей и видам главных переплетений тканых армирующих материалов, техническая ткань, сверхвысокомодульные нити, армирование полимерных композиционных материалов, расчетная и математическая модели строения ткани, конечно-разностный аналог, численный расчет параметров строения ткани.

Keywords: classification by thread material and types of main weaves of woven reinforcing materials, technical fabric, super-high modulus threads, reinforcement of polymer composite materials, computational and mathematical models of the fabric structure, finite-difference analogue, numerical calculation of the parameters of the fabric structure.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в настоящее время относятся к наиболее востребованному и быстро развивающемуся виду композитов. При этом особое место занимают ПКМ с наполнителями в виде тканей из волокон различной природы [1...15]. Тканые материалы из высокопрочных и высококомодульных волокон для производства ПКМ могут быть классифицированы по материалу нитей и видам главных переплетений [16].

Изделия из ПКМ, полученные на основе однослойных тканых армирующих материалов, по сравнению с полимерными композитами, сформированными из лент из однонаправленных волокон, имеют ряд преимуществ, а именно: 1) воспринимают нагрузку в ткани волокна и основы и утка со связующими, и как, следствие этого, – высокая прочность в слое композита в 2-х направлениях проложенных волокон; 2) хорошая связность армирующего слоя из-за переплетения волокон; 3) лучшее смачивание волокна матрицей в процессе пропитки из-за наличия зазоров между волокнами, обусловленных их переплетением; 4) лучше адгезия связующего с изогнутыми и переплетенными волокнами.

Однако ПКМ на основе тканых армирующих материалов имеют недостатки: 1) меньше плотность укладки одной системы волокон из-за переплетения с другой системой волокон; 2) меньшая жесткость композита из-за искривления волокон в ткани; 3) падение прочности волокон из-за повреждения при переработке в ткань.

Отмеченные недостатки не перевешивают в большинстве случаев положительные стороны использования тканых арми-

рующих материалов при производстве ПКМ, поэтому последние являются востребованными и распространенными.

В связи с вышеизложенным актуальной становится проблема исследования структуры, моделирования, разработки методики расчета и проектирования технических тканей для армирования ПКМ.

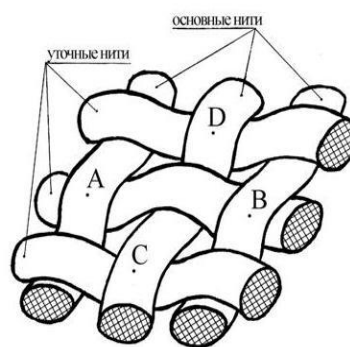


Рис. 1

Основные нити

Рассмотрим структуру тканей полотняного переплетения (рис. 1 – взаимодействие нитей основы и утка в ткани полотняного переплетения). Для армирования ПКМ такую ткань изготавливают из высокопрочных и высококомодульных нитей, например, из сверхвысокомодульных (СВМ) термостойких нитей. Точки А, В, С, D на рис.1 принадлежат центрам пятен контакта между нитями основы и утка в ткани. Анализируя взаимодействия нитей в переплетении, приходим к выводу, что контактное взаимодействие основы и утка в точках А и С (а также в точках В и D) ткани полностью идентично. Следовательно, в этих точках должны быть равны силы, действующие со

стороны утка на основу и со стороны основы на уток.

На основании вышеизложенного приходим к следующей расчетной модели ткани полотняного переплетения (рис. 2 – расчетные модели отрезков основной и уточной нитей и действующие на них внешние и внутренние силы).

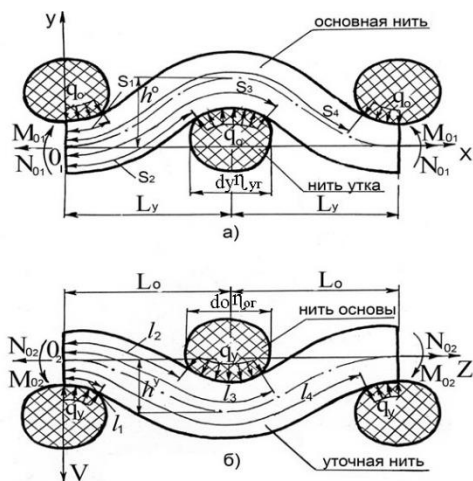


Рис. 2

Уточные нити

Отрезок основы АВ (рис. 1) соответствует отрезку основной нити (рис. 2-а), а отрезок утка CD отрезку уточной нити (рис. 2-б). Эти отрезки утка и основы представляют собой элемент ткани. Они взаимно переплетены и взаимодействуют друг с другом. Считаем, что в зонах контакта нитей действуют распределенные нагрузки интенсивностью и Q_y , которые принимаем

$$A_o \left[\frac{d^3 \phi}{dx^3} \cos^2 \phi - 2 \frac{d^2 \phi}{dx^2} \frac{d\phi}{dx} \sin 2\phi - \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^3 (1,5 \cos^2 \phi - 1) \right] -$$

$$- \left[0,5 A_o \left(\frac{d\phi}{dx} \right)_{x=0}^2 + N_{01} \right] \frac{d\phi}{dx} + \frac{1}{\cos \phi} T_0(x) = 0,$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \phi, \quad (2)$$

$$A_y \left[\frac{d^3 \alpha}{dZ^3} \cos^2 \alpha - 2 \frac{d^2 \alpha}{dZ^2} \frac{d\alpha}{dZ} \sin 2\alpha - \left(\frac{d\alpha}{dZ} \right)^3 (1,5 \cos^2 \alpha - 1) \right] -$$

$$- \left[0,5 A_y \left(\frac{d\alpha}{dZ} \right)_{Z=0}^2 + N_{02} \right] \frac{d\alpha}{dZ} + \frac{1}{\cos \alpha} T_y(Z) = 0, \quad (3)$$

направленными по нормальям к осям нитей и равномерно распределенными. В крайевых сечениях нитей будут действовать внутренние изгибающие моменты M_{01}, M_{02} и внутренние продольные силы N_{01}, N_{02} .

Введем системы координат YO_1X и VO_2Z , начала которых O_1 и O_2 совпадают с точками пересечения осевых линий нитей с плоскостями, проходящими через центры сечений соответственно крайней левой уточной (рис. 2-а) и крайней левой основной (рис. 2-б) нитей.

Наряду с введенными выше обозначениями на рисунках показаны: $s_1, s_2, s_3, s_4, l_1, l_2, l_3, l_4$ – координаты, определяющие действие распределенных нагрузок на отрезках нитей; L_y, L_o, h^y, h^o – геометрические плотности и высоты волн изгиба уточной и основной нитей.

Поперечные сечения нитей принимались эллиптическими. Размеры поперечных сечений нитей по горизонтали обозначены на рис. 2-а, б как $d_o \eta_{ог}, d_y \eta_{уг}$ ($\eta_{ог}, \eta_{уг}$ – коэффициенты смятия нитей основы и утка по горизонтали).

Вывод математической модели строения ткани полотняного переплетения на основе представленных расчетных моделей ее строения (рис. 2-а, б) и положений нелинейной механики гибких нитей подробно приводится в [17, с. 219...241]. Поэтому приведем данную математическую модель без вывода:

$$\frac{dV}{dZ} = \operatorname{tg}\alpha, \quad (4)$$

$$q_0 d_y = q_y d_o, \quad (5)$$

$$y|_{x=L_y} + V|_{Z=L_0} = d_0 \eta_{об} + d_y \eta_{ув}, \quad (6)$$

где функции внешних нагрузок $T_o(x)$ и $T_y(Z)$ определяются по выражениям:

$$T_o(x) = q_o [1 - H(x - x_1) - H(x - x_2) + H(x - x_3) + H(x - x_4)], \quad (7)$$

$$T_y(Z) = q_y [1 - H(Z - Z_1) - H(Z - Z_2) + H(Z - Z_3) + H(Z - Z_4)], \quad (8)$$

$H(x - x_j), H(Z - Z_j)$ – функции Хевисайда, характеризующие действие распределенных нагрузок на отрезки нитей; $x_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ и $Z_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ координаты по осям x и Z , определяющие действие распределенных нагрузок (рис. 2); $A_o, A_y, d_o, d_y, \eta_{об}, \eta_{ув}$ – соответственно изгибные жесткости, диаметры, коэффициенты вертикального смятия основной и уточной нитей; α, ϕ – текущее значение углов поворота плоскостей сечений уточной и основной нитей; V, Z, y, x – координаты произвольной точки осевой линии уточной и основной нити в осях VO_2Z и yO_1x ; N_{O1}, N_{O2} – натяжения в точках O_1 и O_2 отрезков основной и уточной нитей (для ткани, снятой со станка, $N_{O1} = 0, N_{O2} = 0$); $\cos \phi \neq 0, \cos \alpha \neq 0$.

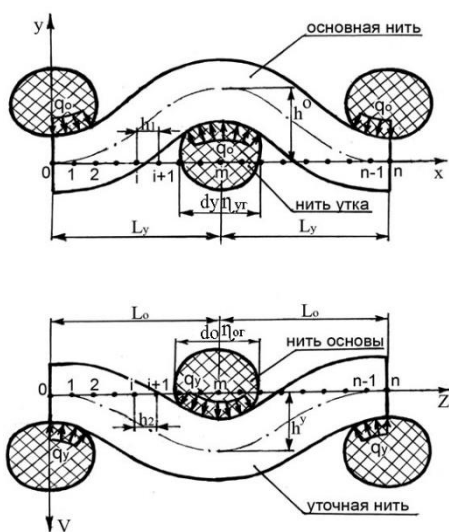


Рис. 3

В системе (1)...(6) первые два уравнения описывают равновесие отрезка основы в элементе ткани под действием внешних и внутренних сил, два следующих – равновесие отрезка уточины, предпоследнее уравнение отражает равенство усилий в зоне контакта со стороны основы на уток и со стороны утка на основу (при его получении принято допущение о том, что длина дуги в зоне контакта между нитями в расчетной модели для отрезка уточной нити равна диаметру нити основы, а длина дуги в зоне контакта между нитями в расчетной модели для отрезка основы равна диаметру уточной нити), последнее уравнение – геометрическое соотношение Н.Г. Новикова для однослойных тканей полотняного переплетения – сумма высот волн изгиба нитей основы и утка равна сумме их диаметров с учетом вертикального смятия нитей.

Система (1)...(6) относительно шести неизвестных $\phi, \alpha, y, V, q_0, q_y$ получена для наиболее общего случая, когда на перемещения точек осевой линии нитей не накладывалось каких-либо ограничений, поэтому она может быть использована для исследования строения любых однослойных тканей полотняного переплетения, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку. Аналитическое решение представленной нелинейной системы уравнений, включающей дифференциальные уравнения и геометрическое соотношение, в общем виде получить практически невозможно. Из-за структуры системы ее решение методами прямого интегрирования затруднено. Наиболее эффективным методом

ее решения, по нашему мнению, является метод конечных разностей. Для получения конечно-разностного аналога системы (1)...(6) введем конечно-разностную сетку на отрезках $2L_y$ и $2L_0$, разделив эти отрезки на n равных частей (рис. 3-а, б).

Аппроксимируя первую, вторую и третью производные системы (10...96) цен-

тральными разностями [18] и выполнив необходимые преобразования (получение конечно-разностного аналога системы (1...6) приводится в [17, С. 241...247], и ввиду ограниченности объема данной статьи не может быть здесь представлено), получим:

$$A_0 \left[\frac{(\phi_{i+2} - 2\phi_{i+1} + 2\phi_{i-1} - \phi_{i-2})}{2h_1^3} \cos^2 \phi_i - \right. \\ \left. - \frac{(\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1})(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})}{h_1^3} \sin 2\phi_i - \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})^3}{8h_1^3} (1,5 \cos^2 \phi_i - 1) \right] - \\ - \left[0,5A_0 \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})^2}{4h_1^2} \Big|_{x=0} + N_{O_1} \right] \frac{(\phi_{i+1} - \phi_{i-1})}{2h_1} + \frac{1}{\cos \phi_i} T_0(x) = 0, \\ \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h_1} = \operatorname{tg} \phi_i, \quad (9)$$

$$A_y \left[\frac{(\alpha_{i+2} - 2\alpha_{i+1} + 2\alpha_{i-1} - \alpha_{i-2})}{2h_2^3} \cos^2 \alpha_i - \right. \\ \left. - \frac{(\alpha_{i+1} - 2\alpha_i + \alpha_{i-1})(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{h_2^3} \sin 2\alpha_i - \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^3}{8h_2^3} (1,5 \cos^2 \alpha_i - 1) \right] - \\ - \left[0,5A_y \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})^2}{4h_2^2} \Big|_{z=0} + N_{O_2} \right] \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1})}{2h_2} + \frac{1}{\cos \alpha_i} T_y(z) = 0, \\ \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2h_2} = \operatorname{tg} \alpha_i, \quad q_0 d_y = q_y d_0,$$

$$2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=m-1} \operatorname{tg} \phi_j + 2h_2 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=m-1} \operatorname{tg} \alpha_j = d_0 \eta_{об} + d_y \eta_{yb},$$

где $h_1 = \frac{2L_y}{n}$ – шаг конечно-разностной сетки для отрезка основы элемента ткани;
 $h_2 = \frac{2L_0}{n}$ – шаг конечно-разностной сетки для отрезка утка элемента ткани.

Для решения системы (9) имеем следующие граничные условия:

- для отрезка основы элемента ткани

$$\phi_0 = 0; \phi_{-1} = -\phi_1; \phi_n = 0; \phi_{n+1} = -\phi_{n-1}; \\ y_0 = x_0 = 0; x_n = 2L_y; y_n = 0; y_{n+1} = y_{n-1};$$

- для отрезка утка элемента ткани

$$\alpha_0 = 0; \alpha_{-1} = -\alpha_1; \alpha_n = 0; \alpha_{n+1} = -\alpha_{n-1}; \\ V_0 = Z_0 = 0; Z_n = 2L_0; V_n = 0; V_{n+1} = V_{n-1}$$

Полученный конечно-разностный аналог (9) математической модели строения ткани (1)...(6) представляет собой систему нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, которые решаются стандартными численными методами с использованием компьютерных технологий. На ее основе могут быть определены такие параметры строения ткани, как длины, высоты волн изгиба нитей основы и утка в элементе ткани и их отношение (порядок фазы строения ткани), формы осевых линий нитей, силы давления между нитями и их смятие, уработки нитей, толщина и наполнение ткани волокнистым материалом и т. д. Исходными данными для их расчета являются технологические плотности ткани по основе и утку, жесткостные характеристики нитей и ряд других показателей.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы достоинства и недостатки полимерных композиционных материалов, армированных тканями.

2. Исследована структура ткани полотняного переплетения, применяемой для армирования полимерных композиционных материалов, получены расчетная, математическая модели ее строения и конечно-разностный аналог для расчета параметров ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г.В. Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: Дис...докт. техн. наук. – М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, – М., 1990.
2. Степанов Г.В., Степанов С.Г. Теория строения ткани. – Иваново: ИГТА, 2004.
3. Чистова И.Н., Степанов Г.В. Техническая ткань для производства композиционных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1996, № 3. С. 108...109.
4. Степанов О.С., Романычев Н.К., Моторин А.В. Ткань из высокомолекулярных технических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 3. С. 41...45.
5. Евсюкова Е.В. Разработка структуры и исследование свойств углеродных тканей для композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 2. С. 74...77.
6. Гречухин А.П. Математическая модель строения ткани из углеродных нитей // Изв. вузов. Техно-

логия текстильной промышленности. – 2015, № 5. С.94...100.

7. Кащеева М.М., Николаев С.Д. Анализ свойств и строения углеродных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 4С. С. 75...77.

8. Николаев С.Д., Евсюкова Е.В. Метод проектирования углеродных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1995, № 3. С.27...30.

9. Юхин С.С., Назарова М.В., Бойко С.Ю., Романов В.Ю. Математическое моделирование процесса получения тканых материалов, используемых для изготовления композитов. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С.136...140.

10. Гречухин А.П., Зайцев Д.В., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н. Методика построения трехмерной модели ткани из углеродных нитей// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С.140...144.

11. Донецкий К.П., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов //Труды ВИАМ. – 2015, № 2. С. 9.

12. Баранов А.В., Ларин И.Ю., Морыганов А.П. Прогнозирование возможности получения армированных композитов на основе элементаризованного льноволокна// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 2. С. 113...117.

13. Карева Т.Ю., Барабанищикова И.С., Смирнова Т.В. Однослойные тканые структуры ортогонального и неортогонального строения для производства композиционных материалов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 5. С. 52...56.

14. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С. 79...83.

15. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Расчет параметров строения технической ткани для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С. 113...118.

16. Композиционные материалы: Справочник / под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990.

17. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис. ... докт. техн. наук. – Иваново, 2007.

18. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973.

REFERENCES

1. Stepanov G.V. Creation and technology for obtaining technical fabrics for the production of composite materials: Dis. ... Doc. tech. Sciences. – M.: MTI im. A.N. Kosygin, - M., 1990.
2. Stepanov G.V., Stepanov S.G. The theory of tissue structure. - Ivanovo: IGTA, 2004.
3. Chistova I.N., Stepanov G.V. Technical fabric for the production of composite materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1996, No. 3. S. 108 ... 109.
4. Stepanov O.S., Romanychev N.K., Motorin A.V. Fabric from high-modulus technical threads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2009, No. 3. S. 41 ... 45.
5. Evsyukova E.V. Development of the structure and study of the properties of carbon fabrics for composites // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2013, No. 2. S. 74 ... 77.
6. Grechukhin A.P. Mathematical model of the structure of a fabric made of carbon filaments // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2015, No.5. P.94...100.
7. Kashcheeva M.M., Nikolaev S.D. Analysis of the properties and structure of carbon tissues // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2009, No. 4C. pp. 75...77.
8. Nikolaev S.D., Evsyukova E.V. Method for designing carbon fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 1995, No. 3. S.27 ... 30.
9. Yukhin S.S., Nazarova M.V., Boyko S.Yu., Romanov V.Yu. Mathematical modeling of the process of obtaining woven materials used for the manufacture of composites. // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2017, No. 3. P. 136 ... 140.
10. Grechukhin A.P., Zaitsev D.V., Ushakov S.N., Rudovsky P.N. A technique for constructing a three-dimensional model of fabric from carbon filaments// *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2017, No. 3. P.140...144.
11. Donetsk K.P., Khrulkov A.V. The use of natural fibers in the manufacture of polymer composite materials // *Proceedings of VIAM.* - 2015, No. 2. P. 9.
12. Baranov A.V., Larin I.Yu., Moryganov A.P. Predicting the Possibility of Obtaining Reinforced Composites Based on Elementarized Flax Fiber // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2018, No. 2. P.113...117.
13. Kareva T.Yu., Barabanshchikova I.S., Smirnova T.V. Single-layer woven structures of orthogonal and non-orthogonal structure for the production of composite materials// *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2020, No. 5. S. 52...56.
14. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrkhalykov Zh.U., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Mathematical model of the structure of technical fabrics for the production of thermoplastic composite materials using reduced technology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2020, No. 4. S. 79 ... 83.
15. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrkhalykov Zh.U., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Calculation of the structure parameters of technical fabric for the production of thermoplastic composite materials using reduced technology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2020, No. 6. P. 113...118.
16. Composite materials: Handbook / ed. V.V. Vasilyev and Yu.M. Tarnopolsky. - M.: Mashinostroenie, 1990.
17. Stepanov S.G. Development of the theory of formation and structure of tissue based on the nonlinear mechanics of flexible threads: Dis. ... doc. tech. Sciences. - Ivanovo, 2007.
18. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Difference schemes. – M.: Nauka, 1973.

Поступила 14.01.21.

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПРОЦЕССЕ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

**APPLICATION OF COMPOSITE POLYMER MATERIALS
IN CHEMICAL-MECHANICAL POLISHING
OF DIELECTRIC LAYERS OF INTEGRATED CIRCUITS**

Е.С. БОКОВА, Д.И. ТЕРАШКЕВИЧ, Г.М. КОВАЛЕНКО, Н.В. ЕВСЮКОВА
E.S. BOKOVA, D.I. TERASHKEVICH, G.M. KOVALENKO, N.V. EVSYUKOVA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: bokova-es@rguk.ru; terahkevih-di@rguk.ru;
kovalenko-gm@rguk.ru; evsyukova-nv@rguk.ru

Предложены технологические решения по изготовлению композиционных полировальных материалов с контролируемой пористостью и размером пор для увеличения площади контакта полировального материала с полируемой пластиной и обеспечения стабильности параметров процесса химико-механической полировки (ХМП). Показано, что материалы, полученные методом фазового разделения в среде не растворителя из растворов полиэфируретанов (ПЭУ), модифицированных глицерином, могут быть использованы для получения полировальных дисков. Преимуществом применения указанной композиции, в совокупности с многовариантными технологическими особенностями процесса фазового разделения, является возможность контролируемого направленного структурообразования с целью получения полировальных материалов с заранее заданной структурой и свойствами для эффективного осуществления финишного процесса ХМП.

Проведена апробация полученных материалов в качестве полировальных дисков процесса ХМП. Исследовано влияние размера пор полировальных материала на скорость съема оксида кремния с поверхности пластины и дефектность пластины. Установлено, что размер пор практически не влияет на дефектность, но оказывает значительное влияние на профиль полировки. Полировальные материалы с небольшими порами приводят к формированию неоднородного профиля полировки.

Technological solutions for the production of composite polishing materials with controlled porosity and pore size to increase the contact area of the polishing material with the polishing plate and ensure the stability of the parameters of the chemical-mechanical polishing process (CMP) are indicated. It is shown that the materials obtained by the phase separation method in a non-solvent medium from polyesterurethane (PEU) solutions modified with glycerin can be used to produce polishing discs. The advantage of using this composition, in combination with the multivariate technological features of the phase separation process, is the possibility of controlled directional structure formation in order to obtain polishing materials with a predetermined structure and properties for the effective implementation of the CMP finishing process.

The obtained materials were tested as polishing discs of the CMP process. The influence of the pore size of the polishing material on the rate of removal of silicon oxide from the plate surface and the plate defectiveness is investigated. It was found that the pore size hardly affects the defect, but it has a significant effect on the polishing profile. Polishing materials with small pores lead to the formation of a non-uniform polishing profile.

Ключевые слова: полировальные композиционные материалы, химико-механическая полировка, фазовое разделение, пористая структура, диоксид кремния.

Keywords: polishing composite materials, chemical-mechanical polishing, phase separation, porous structure, silicon dioxide.

Введение

Одной из перспективных областей применения композиционных полимерных материалов является процесс химико-механической полировки (ХМП) диэлектрических слоев интегральных схем, который находит широкое применение в микроэлектронике. Независимо от способа получения полировального материала, основной вклад в его функциональное назначение вносит характер пористой структуры, пористость, форма и размер пор, твердость полимерного каркаса и вид несущей текстильной матрицы [1...7].

В ранее опубликованных работах [8], [9] проанализирована структура образцов мягких композиционных полировальных материалов ведущих иностранных производителей (Politex (DuPont, США), TWI-817 (Thomas West, США), Fujibo 804 CZM (Fujibo, Япония) др. Показано, что характер пористой структуры и жесткость полировальных материалов имеют важное значение для проведения процесса химико-механической планаризации, в частности, для распределения полирующей абразивной суспензии, периодического кондиционирования поверхности полировального материала, исключения возможности образования дефектов и др. В свою очередь, структура и функциональные показатели пористых материалов зависят от параметров проведения процесса фазового разделения [8], [9].

Экспериментальными исследованиями доказано [9], [10], что однородная микропористая структура покрытий и материалов

формируется осаждением растворов ПЭУ при высоких температурах водными растворами с большим содержанием диметилформамида (ДМФА) - так называемые "мягкие" условия структурообразования. "Жесткие" условия структурообразования - низкая температура и высокая концентрация не растворителя приводят к получению покрытий и материалов с крупными порами.

На рис. 1 приведены поперечные сечения полировальных материалов промышленного производства: Politex 18 (производства DuPont, США) (рис. 1-а) и Fujibo H-804CZM (производства Fujibo, Япония) (рис. 1-б).

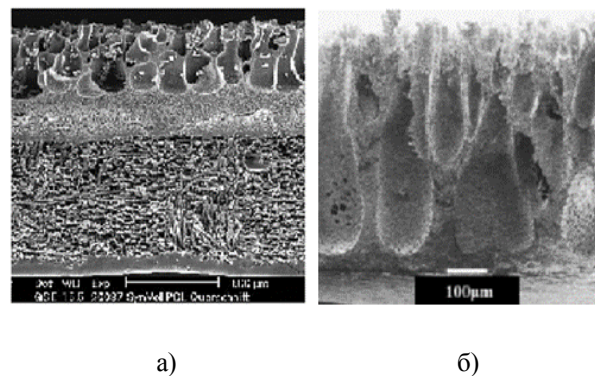


Рис. 1

В целях настоящей работы, возник интерес к использованию материалов с подобной морфологией для финишного полирования полупроводниковых пластин в процессе ХМП и сравнение их с материалами, имеющими принципиально другой характер пористой структуры.

Объекты и методы исследования

В качестве основного пленкообразующего применяли раствор полиэфируретан марки Витур Р 0112 (НПО "Полимерсинтез", г. Владимир, Российская Федерация).

В качестве растворителя использовали N,N-диметилформамид. В качестве модифицирующей добавки применяли глицерин (1,2,3-триоксипропан).

Модифицированные материалы получали в лабораторных условиях согласно ранее запатентованной композиции [4].

Композицию наносили на нетканую основу, пропитанную 15%-ным раствором ПЭУ в ДМФА, с последующей ее обработкой путем фазового разделения в воде при $T=20\pm 5^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. Полученный полуфабрикат после промывки водой от остаточного содержания ДМФА сушили при $T=100^\circ\text{C}$ в течение 10 мин и шлифовали для придания материалу замшевидной поверхности.

В качестве основы для нанесения лицевого покрытия использовали нетканый материал (ОАО "Монтем", г. Москва, Российская Федерация) на основе смеси полиэфирных, толщиной 1,7 дтекс и длиной 38 мм, и полипропиленовых, толщиной 1,3 дтекс и длиной 38 мм, волокон в соотношении 70:30.

Для анализа структуры образцов применяли метод электронной микроскопии с использованием микроскопов – S-800 фирмы Hitachi (Япония) и JOL ISM 35 CF (Япония). Характеристики пористой структуры определяли с помощью метода анализа и цифровой обработки микрофотографий.

Химико-механическую полировку проводили на лабораторной установке с двумя полировальными столами и одной сменной полировальной головой (конструкция полировального модуля установки аналогична установке SpeedFam Auriga). Использовали суспензию силиказоля марки Klebosol 30m50. Скорость потока суспензии составляла 100 мл/мин.

В качестве объекта для полирования использовали пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм с оксидным слоем толщиной 5000Å, изменение толщины пластины измеряли на Filmetrics F20 (KLA-Tencor, Corp., Milpitas, CA).

Скорость съема слоев диоксида кремния определяли, как изменение толщины слоя на единицу времени полировки. Толщину измеряли не менее чем в 50 точках по диаметру пластины с исключением края шириной 3 мм.

Результаты и обсуждения

На рис. 2, 3 приведены микрофотографии поперечного сечения и гистограммы распределения пор по размерам для образцов, полученных из немодифицированных растворов ПЭУ (рис. 2 – микрофотография поперечного сечения (а), гистограммы дифференциального распределения пор по форме (б) и по размерам (в) пористой ПЭУ пленки марки Витур Р-0112. Увеличение 100) и растворов, модифицированных глицерином (рис. 3 – микрофотография поперечного сечения (а), гистограммы дифференциального распределения пор по форме (б) и по размерам (в) пористой ПЭУ пленки марки Витур Р0112, модифицированной глицерином (10 об.%). Увеличение 100).

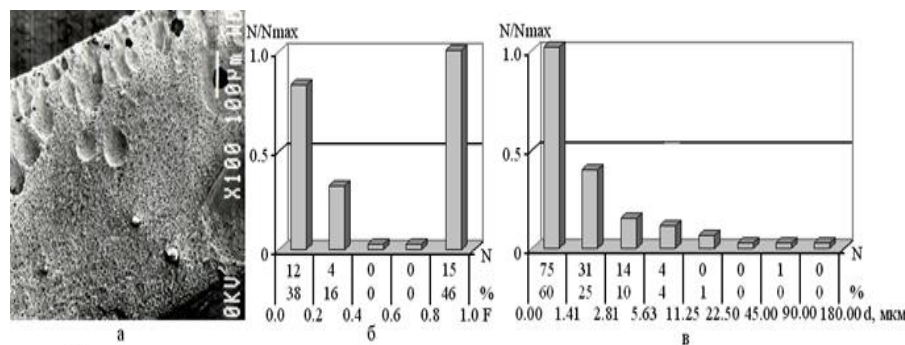


Рис. 2

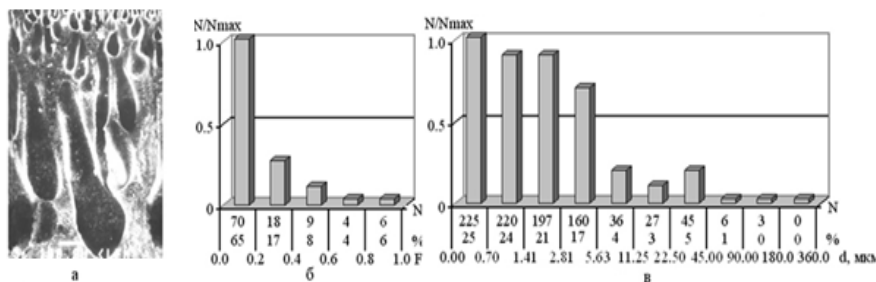


Рис. 3

Видно, что микроструктура пленок, полученных из немодифицированного раствора, в целом характеризуется наличием большого количества мелких пор, на фоне которых имеют место единичные каплевидные поры, пронизывающие 1/3 толщины образцов, которая составляет порядка 500...600 мкм. Средний диаметр крупных пор в основании составляет от 5 до 20 мкм, мелких – от 0,7 до 1,41 мкм. Анализ гистограмм дифференциального распределения пор по размерам показывает, что наибольшее процентное содержание в немодифицированных образцах составляют поры с диаметром от 0,7 до 5,63 мкм. Средний диаметр пор – 2,5 мкм, количество пор округлой формы примерно 50%. Значения относительной пористости – 50%.

Материал, полученный из раствора ПЭУ, модифицированного глицерином, характеризуется наличием в структуре лицевого покрытия однородных каплевидных пор с большой глубиной проникновения. При этом видно наличие в образце, общая толщина которого составляет порядка 500...600 мкм, двух уровней пористости: верхнего, толщиной 50...100 мкм, состоящего из микропор преимущественно цилиндрической формы и основного крупнопористого с каплеобразными порами диаметром 5...200 мкм. Общая пористость таких образцов достигает порядка 50%, средний диаметр пор – порядка 30...40 мкм.

Исходя из того, что размер пор и пористость полировальных материалов оказывают существенное влияние на результаты ХМП, для обеспечения однородности пористой структуры по всей площади полировального материала, на практике осуществляют удаление поверхностного слоя абразивным истиранием или срезанием.

Для использования полученных материалов в качестве полировальных дисков все образцы перед началом использования шлифовали, для того чтобы их структура была условно однородной в течение всего цикла полировки. На все полировальные материалы наносили концентрические канавки со следующими размерами: ширина 508 мкм, шаг канавки 3048 мкм, глубина 318 мкм.

Полученные образцы с одинаковой пористостью порядка 50%, но с разным размером пор 3...5 и 80...100 мкм были апробированы в лабораторных условиях при проведении процесса ХМП.

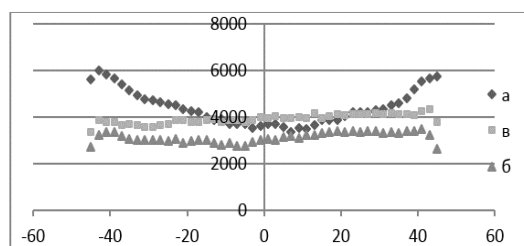


Рис. 4

На рис. 4 (влияние размера пор на профиль слоя диоксида кремния для образцов с одинаковой пористостью; (а) – образец на основе ПЭУ марки Витур Р-0112, размер пор 3...5 мкм; (б) – образец на основе ПЭУ марки Витур Р0112, модифицированного глицерином (10 об.%), размер пор 80...100 мкм; (в) – образец полировального материала промышленного производства. Ось X – толщина слоя на пластине от центра пластины к краю пластины диаметром 100 мм с исключением края 5 мм) показано влияние размера пор на профили слоя диоксида кремния после полировки. Для полировальных материалов с большими размерами пор (100 мкм) профили являются плоскими по

всей пластине, за исключением участка в 1 см от края. Такие же недостатки являются типичными для промышленно производимых полировальных материалов.

При одинаковых условиях полировки полировальные материалы с небольшими размерами пор (3...5 мкм) показывают неоднородный профиль удаления материала. Скорость полировки на краю пластины при применении таких материалов намного выше, чем по центру [11], [12].

Получить плоский профиль при применении полировальных материалов с небольшим размером пор оказалось невозможным даже после изменения параметров процесса, таких как усилие прижима, увеличение обратного давления на пластину, высота удерживающего кольца, установка более агрессивного диска кондиционера, обороты полировального стола. Полученный результат полностью согласуется с результатами, полученными в работе [1] для жестких полировальных материалов с размером пор 20 мкм.

Процесс полировки пластин оксида кремния является химическо-механическим процессом, но вместе с тем его часто рассматривают как чисто механический [1-5], [13], [14], и количество суспензии, в этой связи с этим является существенным фактором для поддержания скорости съема. Исходя из этого, можно предположить, что малый размер пор уменьшает способность полировального материала удерживать суспензию и уменьшает площадь ее контакта с неровностями, приводя к низкой скорости съема. Помимо этого малый размер пор приводит к формированию более гладкой поверхности полировального материала с низкой высотой неровностей. Поэтому в результате алмазного кондиционирования, которое является обязательной операцией процесса ХМП, предназначенной для обновления поверхности полировального материала, из-за малого размера пор, которые в десятки раз меньше зерен алмаза, диску кондиционера трудно обновлять поверхность и вскрывать поры полировального материала. В результате некачественного кондиционирования гладкая поверхность

полировального материала увеличивает силу сцепления с полируемой пластиной.

Поскольку материалы с порами небольшого размера показывают более высокие скорости на краю, предполагается, что они должны иметь более высокое адгезионное трение, а также более высокую скорость потока суспензии на периферийных участках из-за силы всасывания, создаваемой движением полируемой пластины. Однако высокая адгезия на краю пластины также предотвращает поступление свежей суспензии в центр, что вызывает эффект "голодания".

Таким образом, сочетание высокой силы трения сцепления на краю пластины и "голодания" суспензии в центре приводит к неоднородному профилю скорости полирования в полировальных материалах с малым размером пор.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что материалы, полученные методом фазового разделения в среде не растворителя из растворов ПЭУ, модифицированных глицерином, могут быть использованы для получения полировальных дисков. Преимуществом применения указанной композиции является возможность контролируемого направленного структурообразования с целью получения полировальных материалов с заранее заданной структурой и свойствами для эффективного осуществления финишного процесса ХМП.

Установлено, что использование глицерина, в качестве модификатора раствора полиэфируретана, позволяет получать покрытия с направленной каплевидной пористостью, что предпочтительно для получения материалов с замшевидной поверхностью. После шлифования таких покрытий формируется достаточно высокий ворс и при эксплуатации не происходит критического истирания поверхности.

Проведена апробация полученных материалов в качестве полировальных дисков процесса ХМП. Исследовано влияние размера пор полировального материала на ско-

рость съема оксида кремния с поверхности пластины и дефектность пластины. Установлено, что размер пор практически не влияет на дефектность, но оказывает значительное влияние на профиль полировки. Полировальные материалы с небольшими порами приводят к формированию неоднородного профиля полировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prasad A., Fotou G., Li S. The Effect of Polymer Hardness, Pore Size and Porosity on the Performance of Thermoplastic Polyurethane-Based Chemical Mechanical Polishing Pads // *Journal of Materials Research* – № 28 (17), 2013. P.2380...2393.

2. Schlueter J., Kim I. Optimizing Planarity on STI Devices Using Conventional Oxide CMP Processes and Consumables // *Opila R.L., Ali I., Arimoto Y.A. et al Chemical Mechanical Planarization in IC device manufacturing III // The Electrochemical Society Proceeding*. – Vol. 99-37, №3, 2000. P.11...21.

3. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Химико-механическое полирование. Часть 1. Основные закономерности: обзор // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2011, № 3. С.26...42.

4. Bokova E. S., Dobrynina L. E., Andrianova G. P., Galysh T. V., Valeev A. F., Golovicher B. A., Utekhina I. M. Patent RU 2001181 C1, Bul. No. 37-38, 1993.

5. Zantye P.B., Kumar A. and Sikder A.K., Chemical mechanical planarization for microelectronic applications // *Materials Science & Engineering R-Reports* – №45, 2004. P.45...89.

6. Shin M., Hwa Li, Robert M. Miller, Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing // *Semiconductors and Semimetals Vol 63, Academic Press / Lee M. Cook, Consumables 11: Pad* – № 307, 2000. P.155...157.

7. M. R. Oliver, Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor // *Materials, Springer*. – 2004. P.167...169.

8. Бокова Е.С., Андрианова Г.П. Особенности формирования пористых материалов из растворов ПЭУ при их фазовом разделении // *Полиуретановые технологии* – 2009, №1 (20). С.34...37.

9. Bokova E.S., Andrianova G.P. Modification of composites for production of porous polymeric materials and coatings by incorporation of interpolymer complexes // *Fibre Chemistry*. – № 38 (6)? 2006. P.466...470.

10. Bokova E.S., Kovalenko G.M., Lavrentev A.V., Kalinin M.V. Targeted control of the structure formation process in production of new synthetic leathers // *Fibre Chemistry*. – Vol. 46, Is. 4, 2015. P.312...316.

11. Li S. ILD CMP with Silica Abrasive Particles: Effect of Pore Size of CMP Pad on Removal Rate Profiles // *Liz S., Gaudet G., and Nair J., Cabot Microelectronics Corporation, 870 N. Commons Dr. Aurora*. – 2014. 32.

12. Sugimoto F., Arimoto Y., and Ito T. Simultaneous temperature measurement of wafers in chemical mechanical polishing of silicon dioxide layer // *Jpn. J. Appl. Phys.* – №34, 1995. 6314.

13. Li S., Gaudet G., Sun F., and Naman A. ILD CMP with silica abrasive particles: Interfacial removal kinetics and effect of pad surface textures // *J. Electrochem. Soc.* – №157 (11), 2010. P.1061.

14. Taur Y., Mii Y.-J., Frank D.J., Wong H.-S., Buchanan D.A., Wind S.J., Rishton S.A., Sai-Halasz G.A., and Nowak E.J. CMOS scaling into the 21st century: 0.1 μm and beyond. *IBM J. Res. Dev.* – № 39, 1995. P.245.

REFERENCES

1. Prasad A., Fotou G., Li S. The Effect of Polymer Hardness, Pore Size and Porosity on the Performance of Thermoplastic Polyurethane-Based Chemical Mechanical Polishing Pads // *Journal of Materials Research* – 2013, № 28 (17). 2380...2393.

2. Schlueter J., Kim I. Optimizing Planarity on STI Devices Using Conventional Oxide CMP Processes and Consumables // *Opila R.L., Ali I., Arimoto Y.A. et al, Chemical Mechanical Planarization in IC device manufacturing III // The Electrochemical Society Proceeding Volume 99-37*, – 2000, №3. 11...21.

3. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Chemical mechanical polishing. Part 1. The main patterns: overview // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. – 2011, № 3. 26...42.

4. Bokova E. S., Dobrynina L. E., Andrianova G. P., Galysh T. V., Valeev A. F., Golovicher B. A., Utekhina I. M. Patent RU 2001181 C1, Bul. No. 37-38, 1993.

5. Zantye P.B., Kumar A. and Sikder A.K. Chemical mechanical planarization for microelectronic applications // *Materials Science & Engineering R-Reports* – 2004, №45. 45...89.

6. Shin M., Hwa Li, Robert M. Miller Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing // *Semiconductors and Semimetals Vol 63, Academic Press / Lee M. Cook, Consumables 11: Pad* – 2000, № 307. 155...157.

7. M. R. Oliver Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor // *Materials, Springer*, 2004. 167...169.

8. Bokova E.S., Andrianova G.P. Features of the formation of porous materials from PEU solutions during their phase separation // *Polyurethane technologies* – 2009, №1 (20). 34...37.

9. Bokova E.S., Andrianova G.P. Modification of composites for production of porous polymeric materials and coatings by incorporation of interpolymer complexes // *Fibre Chemistry*. – 2006, № 38 (6). 466...470.

10. Bokova E.S., Kovalenko G.M., Lavrentev A.V., Kalinin M.V. Targeted control of the structure formation process in production of new synthetic leathers // *Fibre Chemistry*. – 2015, vol. 46, Issue 4. 312...316.

11. Li S., ILD CMP with Silica Abrasive Particles: Effect of Pore Size of CMP Pad on Removal Rate Pro-

files // Liz S., Gaudet G., and Nair J., Cabot Microelectronics Corporation, 870 N. Commons Dr. Aurora, – 2014. 32.

12. Sugimoto F., Arimoto Y., and Ito T. Simultaneous temperature measurement of wafers in chemical mechanical polishing of silicon dioxide layer // Jpn. J. Appl. Phys. – 1995, №34. 6314.

13. Li S., Gaudet G., Sun F., and Naman A. ILD CMP with silica abrasive particles: Interfacial removal kinetics and effect of pad surface textures // J. Electrochem. Soc. – 2010, №157(11), 1061.

Taur Y., Mii Y.-J., Frank D.J., Wong H.-S., Buchanan D.A., Wind S.J., Rishton S.A., Sai-Halasz G.A., and Nowak E.J. CMOS scaling into the 21st century: 0.1 μm and beyond. IBM J. Res. Dev. – 1995, № 39, 245.

Рекомендована кафедрой химии и технологии полимерных материалов и нанокompозитов. Поступила 27.09.21.

УДК 677.12

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_292

ПРИМЕНЕНИЕ КОНОПЛИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

THE USE OF HEMP IN THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS

A.S. ПАРСАНОВ, M.B. АНТОНОВА, И.В. КРАСИНА

A.S. PARSANOV, M.V. ANTONOVA, I.V. KRASINA

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan State Research Technological University)

E-mail: parsanov1982@yandex.ru

В статье рассмотрена возможность применения костры и волокон конопли в производстве композитных материалов. Представлены результаты исследований в области применения конопляных волокон зарубежными исследователями. Разработан прототип композитного материала на основе эпоксидной смолы с волокнистым наполнителем в виде костры и волокон конопли. Установлено, что применение волокон конопли в объеме 2,5 массовых частей от объема композиционного материала позволяет получить однородный материал. Проведены испытания разработанного композиционного материала на сжатие и устойчивость к повреждениям падающим грузом. Выявлено, что добавление технического глицерина в получаемую композицию позволяет повысить прочность композитного материала на 13% и увеличить сопротивление всего композиционного материала к повреждению падающим грузом.

The article considers` possibility of using hemp hurds and hemp fibers for the production of composite materials. The research results` of using the hemp fibers by foreign researchers are presented. A composite material` prototype based on epoxy resin with a fiberfill in the form of hemp hurds and hemp fibers has been developed. It has been established that the using of hemp fibers in a volume of 2.5 mass parts from the volume of the composite material makes it possible to produce

a uniform material. The developed composite material has been tested for compression and damage resistance by falling cargo. It has been shown that the addition of technical glycerine to the composition makes it possible to increase the composite materials' strength to 13% and resistance to damage by falling cargo.

Ключевые слова: композитный материал, волокна конопли, свойства, костра.

Keywords: composite material, hemp fibers, properties, hemp hurds.

В настоящее время основным направлением развития производственного сектора экономики является разработка и применение композитных материалов. Особое развитие получили разработка, проектирование и дальнейшее применение композитных материалов на основе ресурсов деревообрабатывающей промышленности. Композиционные материалы, кроме высоких физико-механических свойств обладают широким рядом других достоинств: высокая воздухопроницаемость, гигроскопичность, высокая пористость и т.д.

Однако применение ресурсов исключительно деревообрабатывающей промышленности является тупиковой ветвью развития данных разработок в связи с долгой возобновляемостью сырья.

Поэтому актуальной задачей развития технологий получения композитных материалов с прогнозируемыми свойствами является возможность применения продукции растениеводства. Данная отрасль характеризуется получением широкой сырьевой базы за малый промежуток времени. Основными преимуществами является неприхотливость посевных культур и высокий выход волокнистого материала [1].

Перспективным направлением в области получения композитных материалов является применение растительных волокон конопли.

Конопляные волокна широко используются западными учеными для создания биокомпозиционных материалов для различных областей применения.

Разрабатываются биокомпозитные материалы полностью из органических материалов и с включением растительных волокон в качестве наполнителей. Совместное исследование ученых из Канады и Велико-

британии позволило создать новые биокомпозитные материалы из конопляной костры с использованием кремнеземной матрицы. Композиты водостойкие и показали хорошие механические характеристики, что позволило разработать на их основе новые теплоизоляционные строительные материалы. В исследовании композиты на основе конопляной костры были изготовлены с использованием золя кремнезема в качестве связующего, который придал композиту многофункциональность [2].

Словенская фирма Мовихем специализируется на выпуске химических материалов, позволяющих модифицировать костру конопли для последующего применения в качестве наполнителя в производстве строительных плит и прочих материалов, устойчивых к огню и влаге. Один из главных продуктов – Retacell ФЛР - А1 - противопожарный и экологически безопасный полимерный гель [3].

На сегодняшний день, с увеличением производства пластика, увеличивается и количество отходов, загрязняющих окружающую среду, поскольку пластик принадлежит к бионеразлагаемым материалам. Производство экопластиков является актуальной проблемой во всем мире. Если в качестве наполнителя использовать экологические добавки (волокна льна, конопли, костру и т.д.), то можно получить биоразлагаемые пластики с различными свойствами.

Компания NCA Renewable Technologies, производитель композитов из натуральных волокон, разработала биопанели INCA на основе конопли. Несомненное преимущество таких панелей состоит в том, что они позволят сократить выбросы углекислого газа на 76%, производство отходов на 89% и потребление воды на 82% по сравнению с

фанерой из тропических лесов лауана, используемой в настоящее время в автомобилестроении, для отдыха, мебельной и киноиндустрии [4].

Кроме указанных областей применения волокна конопли широко используются в качестве добавок к бетонам, к составам для изоляции зданий и др. [5...7]. Однако, в основном, композиты из натуральных волокон обладают низкой прочностью, способны поглощать большое количество влаги, которая приводит к ослаблению межфазной адгезии и разрушению всего композита [8...10]. Поэтому актуальным направлением является разработка биоразлагаемых композиционных материалов, обладающих высокими прочностными характеристиками.

Одним из способов получения экологического пластика является соединение эпоксидной смолы с биоволокнистым наполнителем до получения композитных материалов. Выбор эпоксидной смолы в качестве связующей матрицы обусловлен тем, что при отверждении эпоксидная смола характеризуется минимальной влагопроницаемостью и способствует получению композиционных материалов с высокими физико-механическими показателями.

Цель работы – создание прототипа биоразлагаемого композиционного материала на основе конопляных волокон и костры, с высокими физико-механическими показателями.

Объектами исследования выбраны эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587–84), отвердитель ПЭПА (ГОСТ 10587–84) фракция костры конопли – 0,5...1 см, волокна ко-

нопли технической, измельченные до размеров костры, производства ООО "Мордовские пенькозаводы", глицерин технический.

Оценка внешнего вида полученных композиционных материалов осуществлялась органолептически. Механические показатели полученного прототипа композиционного материала оценивались при проведении следующих испытаний: испытание на сжатие, испытание на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом.

Испытание на сжатие проводили по стандартным методикам на электромеханической разрывной машине РЭМ -5, производства ООО "Метротест" (ГОСТ 28840 СТО – 75829762–001). Испытание на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом проводили согласно ГОСТ 33496–2015.

На первом этапе работы проводилась разработка рецептуры композитного материала, состоящего из эпоксидной смолы ЭД-20, отвердителя ПЭПА, волокон конопли и костры.

Смешивание составляющих материалов осуществляли вручную, до получения однородной смеси. Масса компонентов рассчитана таким образом, чтобы композит получился однородным по структуре. Волокна конопли и кусочки костры смешивали со связующим, а затем выкладывали в специальную форму, утрамбовывали и оставляли сушиться при комнатной температуре. Затем высушенные образцы извлекались из форм и подвергались кондиционированию при температуре 19°C и относительной влажности 50%. Составы полученных образцов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Образец №	1	2	3	4	5
Эпоксидная смола, масс. частей	50	50	50	50	50
Отвердитель, масс. частей	5	5	5	5	5
Волокна конопли и костры, масс. частей	–	2	2,5	5	7

Органолептическая оценка образцов, изготовленных по рецептуре 1 (табл. 1), показала, что допустимый концентрат находится в образце №3. Уменьшение концентрации наполнителя не приводит к результативной экономической эффективности, а

увеличение концентрации наполнителя не позволяет получить однородный материал. Однако данные эксперимента показали, что полученный образец №3 является хрупким, так как он разрушился на мелкие фракции при испытании на сжатие. Поэтому следу-

ющим этапом работы являлось повышение эластичности полученного материала. Для данной работы в ходе эксперимента в об-

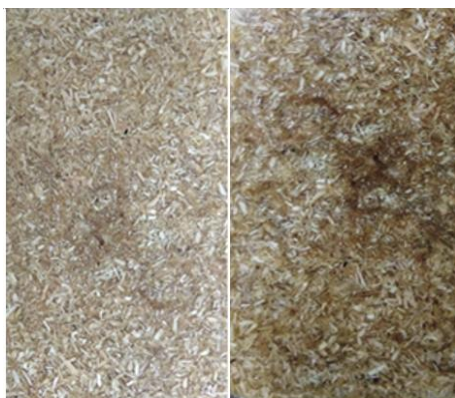
разцы был добавлен глицерин технический в различных соотношениях. Состав данных образцов представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Образец №	1	2	3	4	5
Эпоксидная смола, масс. частей	50	50	50	50	50
Отвердитель, масс. частей	5	5	5	5	5
Глицерин, масс. частей	–	2,5	5	10	15
Волокна конопли и костры, масс. частей	–	2	2,5	5	7

Органолептическая оценка образцов, изготовленных по рецептуре 2 (табл. 2), показала, что более сбалансированным по составу получился образец №3, он получил гибкость и на ощупь не был маслянистым, в то время как образцы №1 и №2 остались без изменения, а образцы №4 и №5 получились сверхмаслянистыми на ощупь.

Фотографии полученных композиционных материалов представлены на рис. 1: (а) состав ЭД -20 /ПЭПА – 50/5 масс.ч, волокна конопли/костра (1:1) 2,5 масс.ч.; б) состав ЭД -20 /ПЭПА – 50/5 масс.ч, волокна конопли/костра (1:1) 2,5 масс.ч., глицерин 5 масс.ч).



а) б)
Рис. 1

Анализируя фотографии, представленные на рис. 1, можно сделать вывод о том, что частицы конопляной костры и волокон хорошо встраиваются в матрицу, благодаря хорошему взаимодействию между конопляной кострой, волокном и связующим.

Для оценки стойкости образцов к приложенным нагрузкам провели испытание на сжатие. Между собой сравнивали образцы композиционных материалов, изготовленных по рецептуре 1 (образец №3) и

рецептуре 2 (образец №3 с добавлением глицерина). По окончании испытания выявлено, что образец композиционного материала, изготовленный по рецептуре 1 выдерживает нагрузку до 3,5 МПа и имеет структурные разрушения в виде глубоких трещин и сколов. Данный эффект, скорее всего, объясняется наличием случайных локальных возмущений напряжений и случайного распределения неоднородностей в материале.

Образец композиционного материала, содержащий в своем составе 5 масс.ч. глицерина, выдерживает нагрузку до 4 МПа, имеет трещины, но при этом не разрушается. Это говорит о том, что межфазная адгезия между конопляным наполнителем и связующей матрицей хорошая, а силы сдвига низкие.

Для оценки сопротивления повреждению при ударе падающим грузом изготавливались композиционные материалы в виде пластин размером 100×150×5 мм. Соотношение компонентов в пластинах: образец №1 – состав ЭД-20 /ПЭПА – 50/5 масс.ч, волокна конопли/костра (1:1) 2,5 масс.ч.; образец №2 – состав ЭД -20 /ПЭПА – 50/5 масс.ч, волокна конопли/костра (1:1) 2,5 масс.ч., глицерин 5 масс.ч. Испытание проводили согласно ГОСТ 33496–2015, по методу А. Энергия удара составляла 33,5 Дж/мм.

Для определения значений параметров, характеризующих сопротивление разрушению композиционного материала при ударе падающим грузом, исследовали глубину отпечатка на пластине, размеры и площадь зоны повреждения. В результате удара были выявлены следующие типовые разрушения, видимые на поверхности пластин:

- образец №1 – вмятина диаметром 7 мм,

глубина отпечатка 1 мм, большие трещины, площадь зоны повреждения 20 мм²;

- образец №2 – вмятина диаметром 8 мм, глубина отпечатка 1,2 мм.

Таким образом, добавление глицерина в состав композита увеличивает сопротивление всего композиционного материала к повреждению падающим грузом, что объясняется снижением локального напряжения в структуре композитного материала.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данном исследовании разработан прототип композиционного материала на основе эпоксидной смолы с волокнистым наполнителем в виде костры и волокон конопли. Выявлено, что добавление в состав композита на основе конопли и эпоксидной смолы технического глицерина способствует повышению его прочности при сжатии до 13% и увеличивает сопротивление всего композиционного материала к повреждению падающим грузом.

Предстоит выполнить еще ряд исследований, чтобы устранить существенные недостатки композитов, такие как высокая хрупкость, низкая огнестойкость. Нивелировать указанные недостатки возможно путем модификации всего композита или отдельно составляющих его частей в газовом разряде. По ранее полученным результатам установлено, что такая обработка может быть применима для улучшения свойств материалов [11...13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Конопля [Электронный ресурс]. Точка доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6883> доступ свободный.

2. Atif Hussain et al, Development of novel building composites based on hemp and multi-functional silica matrix, Composites Part B: Engineering. –Vol. 156, 2019. P.266...273, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.093>

3. Огнестойкая модифицированная конопля [Электронный ресурс]. Точка доступа: <https://www.rosflaxhemp.ru/fakti-i-cifri/o-konople/stroitelnye-materialy-i-tehnologii.html/id/1746>, свободный

4. Биокompозиты на основе конопли INCA Renewtech для радикального сокращения выбросов углекислого газа - JEC Group <https://www.jecgroup.com/news>, свободный.

сурс]. Точка доступа: www.jecgroup.com/news, свободный.

5. Ahmad MR, Bing C, Oderji SY, Mohsan M. Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement; Physical, mechanical, thermal and hygric evaluation. Energy Build 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007>.

6. Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. Construct Build Mater 2008;22:2116–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.

7. Marceau S, Glé P, Guéguen-Minerbe M, Gourlay E, Moscardelli S, Nour I, et al. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. Construct Build Mater 2017; 139:524–30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129>.

8. Kabir M.M., Wang H., Lau K.T., Cardona F., Aravinthan T. Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites Compos B Eng. – 43, 2012. P. 159...169, 10.1016/j.compositesb.2011.06.003

9. Xie Y., Hill C.A.S., Xiao Z., Militz H., Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: a review Composites Part A Appl Sci Manuf. – 41, 2010. P. 806...819, 10.1016/j.compositesa.2010.03.005

10. Pickering K.L., Efendy M.G.A., Le T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance Composites Part A Appl Sci Manuf. – 83, 2016. P. 98...112, 10.1016/j.compositesa.2015.08.038

11. Антонова М.В., Красина И.В., Илюшина С.В. Регулирование гидрофильности смесовых тканей с применением низкотемпературной плазмы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, №3. С. 100...103.

12. Krasina I.V. et al. J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. 1353 012067

13. Antonova M.V. et al. J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. 1588 012003

REFERENCES

1. Hemp [Electronic resource]. Access point: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6883> free access.

2. Atif Hussain et al, Development of novel building composites based on hemp and multi-functional silica matrix, Composites Part B: Engineering. –Vol. 156, 2019. P.266...273, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.093>

3. Fire-resistant modified hemp [Electronic resource]. Access point: <https://www.rosflaxhemp.ru/fakti-i-cifri/o-konople/stroitelnye-materialy-i-tehnologii.html/id/1746>, free

4. Biocomposites based on hemp INCA Renewtech for radical reduction of carbon dioxide emissions - JEC

Grouphttps: [Electronic resource]. Hotspot: www.jec-composites.com/news, free.

5. Ahmad MR, Bing C, Oderji SY, Mohsan M. Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement; Physical, mechanical, thermal and hygric evaluation. *Energy Build* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.007>.

6. Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construct Build Mater* 2008;22:2116–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016>.

7. Marceau S, Glé P, Guéguen-Minerbe M, Gourlay E, Moscardelli S, Nour I, et al. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construct Build Mater* 2017; 139:524-30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129>.

8. Kabir M.M., Wang H., Lau K.T., Cardona F., Aravinthan T. Mechanical properties of chemically-treated hemp fiber reinforced sandwich composites *Compos B Eng.* - 43, 2012. P. 159...169, 10.1016/j.compositesb.2011.06.003

9. Xie Y., Hill C.A.S., Xiao Z., Militz H., Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: a review *Compos Part A Appl Sci Manuf.* - 41, 2010. P. 806...819, 10.1016/j.compositesa.2010.03.005

10. Pickering K.L., Efendy M.G.A., Le T.M. A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance *Compos Part A Appl Sci Manuf.* – 83, 2016. P. 98...112, 10.1016/j.compositesa.2015.08.038

11. Antonova M.V., Krasina I.V., Ilyushina S.V. Regulation of the hydrophilicity of mixed fabrics using low-temperature plasma. *Izv. universities. Technology of the textile industry.* - 2019, No. 3. pp. 100...103.

12. Krasina I.V. et al. *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. 1353 012067

13. Antonova M.V. et al. *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2020. 1588 012003

Рекомендована кафедрой технологии натуральных, химических волокон и изделий. Поступила 22.12.21.

УДК 674.812.2, 678.031:54-112
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_297

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АРАБИНОГАЛАКТАНА*

METHOD FOR OBTAINING COMPOSITE MATERIAL BASED ON WASTE OF THE TEXTILE INDUSTRY AND ARABINOGALACTAN

P.G. САФИН, А.В. САФИНА, К.В. ВАЛЕЕВ, Р.Р. ФАХРУТДИНОВ

R.G. SAFIN, A.V. SAFINA, K.V. VALEEV, R.R. FAKHRUTDINOV

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technological University)

E-mail: safin@kstu.ru, alb_saf@mail.ru, kirval116@mail.ru, ryslanslan22437@gmail.com

Теоретически аргументирован и экспериментально исследован способ получения композиционного материала на основе коротковолокнистых текстильных отходов текстильной промышленности и природного полисахарида арабиногалактана, извлеченного из отходов древесины лиственницы. Основными этапами предлагаемого способа являются экстрагирование арабиногалактана, измельчение коротковолокнистых текстильных отходов, их фракционирование, смешение компонентов и прессование.

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Нанотехнологии и наноматериалы" ФГБОУ ВО КНИТУ.

* The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use "Nanomaterials and Nanotechnology" of the Kazan National Research Technological University.

Установлено, что для обеспечения оптимальных эксплуатационных и прочностных характеристик получаемого композиционного материала эффективное содержание текстильных отходов в композите составляет 55%. Проведенные испытания позволили рекомендовать изготовление данного композиционного материала в 3 слоя. Внешние слои целесообразно изготавливать более плотными, а внутренний слой для снижения энергозатрат – с меньшей плотностью. Представленный биоразлагаемый композиционный материал на основе отходов текстильной промышленности и арабиногалактана может быть использован для производства изделий с коротким сроком эксплуатации (упаковочных и прокладывающих материалов, стелек для обуви и т.п.).

A method for producing a composite material based on short-fiber textile waste from the textile industry and natural polysaccharide arabinogalactan extracted from larch wood waste has been theoretically argued and experimentally investigated. The main stages of the proposed method are the extraction of arabinogalactan, crushing of short-fiber textile waste, their fractionation, mixing of components and pressing. It was found that to ensure the optimal operational and strength characteristics of the resulting composite material, the effective content of textile waste in the composite are 55%. The tests carried out made it possible to recommend the manufacture of this composite material in 3 layers. It is advisable to make the outer layers more dense, and the inner layer with a lower density, to reduce energy consumption. The presented biodegradable composite material based on wastes of the textile industry and arabinogalactan can be used for the production of products with a short service life (packaging and interlining materials, shoe insoles, etc.).

Ключевые слова: композиционный материал, отходы текстильной промышленности, отходы древесины лиственницы, арабиногалактан, извлечение, смешение, прессование.

Keywords: composite material, textile waste, larch wood waste, arabinogalactan, extraction, mixing, pressing.

Введение

В последние годы все большее значение приобретает разработка полимерных композиционных материалов, содержащих полимеры природного происхождения в дополнение к синтетическим полимерам. Это связано с необходимостью постепенного снижения доли полимеров, получаемых из нефти, а также с предполагаемой биоразлагаемостью таких композитов по истечении срока службы [6], [7], [9].

В этом контексте особый интерес представляет природный полисахарид арабиногалактан (АГ), который в основном содержится в древесине лиственницы сибирской и представляет собой сильно разветвленный водорастворимый полимер [1], [2]. Его основная цепь состоит из звеньев галак-

тозы, связанных гликозидными связями, и боковых цепей звеньев арабинозы, галактозы и урановой кислоты. Содержание арабиногалактана в отходах древесины лиственницы достигает 22 %. Вещество устойчивое в кислой среде, имеет термическую и гидролитическую стабильность [3], [4], что обуславливает возможность его использования в качестве технического продукта, а именно связующего в производстве композиционного материала.

Текстильные отходы производства представляют собой отходы, получаемые в процессе производства волокон, нитей, тканей и прочих швейных изделий. Текстильные отходы потребления представляют собой вышедшую из употребления одежду, которая, в конечном результате, оказыва-

ется на полигонах захоронения твердых бытовых отходов и составляет не менее 6% от его общего количества [8], [10], [11].

Наиболее острая проблема стоит в отношении отходов текстильных материалов и искусственного меха, а также коротковолокнистых отходов коврового производства. Переработка данных отходов является достаточно сложной и дорогостоящей ввиду необходимости создания специального оборудования. К данной группе текстильных материалов относятся низкосортные отходы легкой промышленности, в частности, волокна искусственного меха, невозвратные от стабилизации, стрижки и глажения, длиной 0,5...25 мм [5], [12], [13]. Они образуются в основном на подготовительном участке, их объем доходит до 34% от используемого сырья.

В работе рассмотрена возможность применения отходов текстильной промышленности и природного полисахарида арабиногалактана для создания композиционного биоразлагаемого материала и предложен способ его получения.

Методы и материалы

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана технология получения композиционного материала посредством переработки коротковолокнистых текстильных отходов с применением арабиногалактана в качестве связующего компонента.

Изготовление композиционного материала можно разделить на несколько этапов.

Первым этапом процесса служит экстрагирование арабиногалактана из отходов древесины лиственницы путем кипячения в воде.

После завершения процесса экстрагирования арабиногалактана экстракт переливается в испаритель и упаривается до сиропообразного состояния, туда же добавляется 95%-ный этиловый спирт в соотношении 1:35 и отстаивается в течение 2 часов, для выпадения арабиногалактана в осадок. После фильтрации производится отгонка жидкости из осадка под вакуумом, и осадок вы-

сушивается до полного удаления влаги. После полного удаления растворителя образуется арабиногалактан в виде порошка с содержанием до 10 % лиственничной смолы от общей массы сухого остатка.

Второй этап заключается в измельчении коротковолокнистых текстильных отходов в роторно-ножевом измельчителе ДВМ-5. Для предварительного перемешивания компонентов и снижения энергозатрат на резание, в измельчитель загружается ранее извлеченный арабиногалактан. Фракционирование измельченных текстильных отходов производится на вибро-ситовой установке ANALYSETTE 3 PRO.

Третьим и заключительным этапом изготовления композиционного материала является смешение компонентов в вальцовом смесителе и прессование. Для прессования используется пресс марки АПВМ-901. Прессование ведут при температуре 150°C под давлением 0,8 МПа.



Рис. 1

Результаты и обсуждения

Проведенные исследования позволили получить образцы композиционного материала, представленного на рис. 1 (внешний вид арабиногалактана, текстильных отходов и композиционной плиты). В качестве наполнителя использовались текстильные отходы в виде шелковых тканей, волокна из хлопка и льна. В качестве связующего использован арабиногалактан – продукт экстракции древесины лиственницы.

Далее были исследованы эксплуатационные и прочностные характеристики полученных образцов композиционного материала.

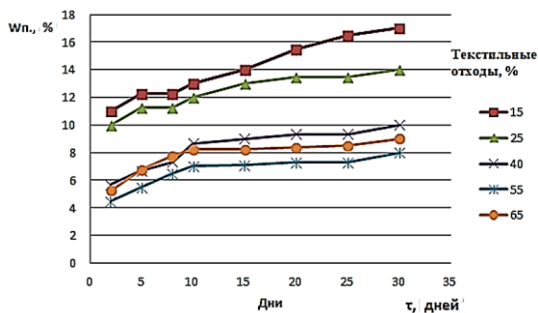


Рис. 2

Одной из важных характеристик композиционных материалов является влагопоглощение, увеличение которого приводит к заметному снижению эксплуатационных свойств. На рис. 2 представлены кинетиче-

ские зависимости влагопоглощения композиционных материалов при различных концентрациях наполнителя.

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении концентрации текстильных отходов в композиционном материале уменьшается его влагопоглощение. Однако с повышением концентрации текстильных отходов больше 55% влагопоглощение увеличивается. В связи с этим оптимальным значением концентрации текстильных отходов в композиционном материале является 55%.

Арабиногалактан в композиционном материале способствует стабилизации водно-жировой эмульсии, улучшает пластичность и обладает антиоксидантными свойствами.

На рис. 3, 4 представлены зависимости предела прочности на сжатие и растяжение от концентрации наполнителя соответственно.

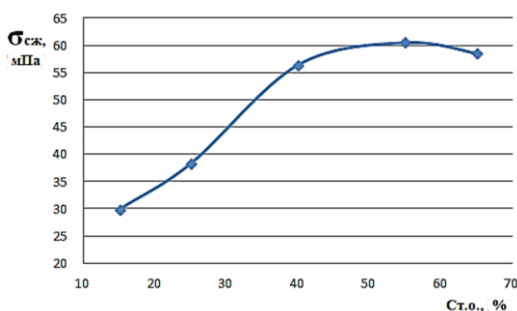


Рис. 3

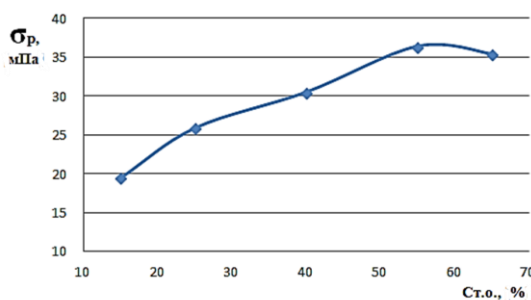


Рис. 4

Представленные графики подтверждают эффективность 55%-процентного содержания текстильных отходов в композиционных образцах, поскольку они имеют наиболее высокие механические и прочностные показатели.

Увеличение концентрации текстильных отходов требует более высоких давлений прессования, соответственно и энергозатрат, при этом увеличивается плотность материала, кг/м³.

На рис. 5 представлены зависимости водопоглощения от плотности композиционного материала.

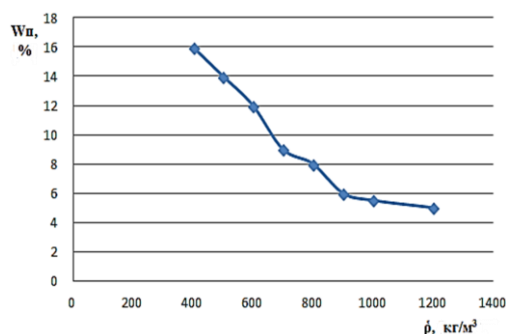


Рис. 5

Эта зависимость показывает, что увеличение плотности материала соответствует меньшему водопоглощению, поскольку

плиты с высокой плотностью не имеют крупных пор, в которые может проникать вода за время пребывания образца в воде. В связи с этим композиционный материал целесообразно изготавливать трехслойным, в котором внешние слои являются более плотными, а внутренний слой для снижения энергозатрат имеет наименьшую плотность.

Разработанная технология позволяет получать биоразлагаемый композиционный материал на основе переработки коротковолокнистых отходов текстильной промышленности и природного полисахарида арабиногалактана. Данный материал целесообразно использовать для производства изделий с коротким сроком эксплуатации: упаковочных и прокладывающих материалов, стелек для обуви и т.п.

ВЫВОДЫ

На сегодняшний день на текстильных предприятиях Российской Федерации остается большое количество отходов, которые не перерабатываются, а переносятся в места захоронений, ухудшая, тем самым, экологию. В то же время на предприятиях деревообрабатывающей промышленности также существует проблема переработки отходов. Древесные отходы имеют большое количество связующих веществ, одним из которых является арабиногалактан.

В статье описан способ получения композиционного материала из отходов текстильной промышленности и связующего арабиногалактана, включающий стадии извлечения АГ, измельчения тканей, смешения и прессования. Анализ полученного композиционного материала позволил установить, что оптимальное значение концентрации текстильных отходов в материале составляет 55%. Данное значение обеспечивает высокие прочностные показатели и эксплуатационные свойства исследуемого материала, что подтверждено исследованиями зависимости пределов прочности на сжатие и растяжение от концентрации наполнителя.

Анализ результатов испытаний полученных образцов позволил рекомендовать

трехслойное строение композиционных материалов из отходов текстильной промышленности и арабиногалактана.

Поскольку арабиногалактан относится к безвредным полисахаридам, то его использование возможно при изготовлении различных упаковочных изделий, стелек и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Абдуллина Д.Р. Современные технологии экстрагирования биологически активных веществ из древесных отходов // Мат. IV Междунар. научн.-практ. конф.: Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса. – 2021. С. 126...128.
2. Валеев К.В., Арсланова Г.Р., Гизатуллина Л.И., Сафин Р.Г. Экстрагирование арабиногалактана из древесины лиственницы // Сб. ст. Всерос. научн.-технич. конф.: Лесозащита и комплексное использование древесины. – Красноярск, 2020. С. 41...45.
3. Валеев К.В., Саттарова З.Г. Переработка древесных отходов и полиэтилена в древесно-композиционный материал // Сб. тр. Всерос. научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Наука и молодежь, проблемы, поиски решения. – Сибирский государственный индустриальный университет. – 2019. С. 367...369.
4. Композиционные материалы на основе отходов – материалы будущего // Высшая школа. – 2016. Т.1, №4. С.101...103.
5. Демесинова А.А., Айдарова А.Б., Молдогазиева Г.М., Досмуратова Э.Е. Энергия из отходов текстильного производства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 1. С. 71...75.
6. Саттарова З.Г., Зиатдинова Д.Ф., Ахметова Д.А., Фахрутдинов Р.Р., Булгар Л.И. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. С.62...72.
7. Саттарова З.Г., Сафин Р.Г., Фахрутдинов Р.Р., Байгильдеева Е.И. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов // Журнал деревообрабатывающая промышленность. – 2020. С.46...54.
8. Миккульский В.Г., Козлов В.В. Модификация строительных материалов полимерами. – М.: МИСИ, 1985.
9. Линьков Н.В. К вопросу о методике определения прочностных характеристик клеевых соединений деревянных конструкций // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 3. С. 153...158.
10. Тамразян А.Г., Минеев М.С. К возникновению трещин в модели толстостенного бетонного цилиндра при коррозии с учетом пористой зоны на

границе раздела арматуры и бетона // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 3. С. 159...165.

11. Zhorina L.A., Kuznetsova O.P., Rogovina S.Z., Vladimirov L.V. and Prut E.V. Preparation and study of the properties of compositions based on crumb rubber and natural polysaccharides // Polym. Sci. – Ser. D 13 (3), 2020. P.16...22.

12. Babkin V.A., Ostroumova L.A., Malkov Yu.A., Ivanova S.Z., Onuchina N.A. and Babkin D.V. Biologically active substances from larch wood, Khim. Interesakh Ustoichivogo Razvit. – 9 (3), 2001. P.363...367.

13. Makhijani K., Kumar R. and Sharma S.K. Biodegradability of blends polymers: A comparison of various properties // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. – 45 (16), 2015. P. 1801...1825.

REFERENCES

1. Arslanova G.R., Valeev K.V., Abdullina D.R. Modern technologies for extracting biologically active substances from wood waste // Mat. IV Intern. scientific-practical Conf.: Actual problems and prospects for the development of the timber industry. – 2021. S. 126...128.

2. Valeev K.V., Arslanova G.R. Gizatullina L.I., Safin R.G. Extraction of arabinogalactan from larch wood // Sat. Art. Vseros. scientific and technical Conf.: Forest exploitation and integrated use of wood. – Krasnoyarsk, 2020. S. 41...45.

3. Valeev K.V., Sattarova Z.G. Processing of wood waste and polyethylene into wood-composite material // Sat. tr. Vseros. scientific conf. students, graduate students and young scientists: Science and youth, problems, search for solutions. – Siberian State Industrial University. – 2019. S. 367...369.

4. Composite materials based on waste - materials of the future // Higher school. - 2016. V.1, No. 4. P.101...103.

5. Demesinova A.A., Aidarova A.B., Moldogazieva G.M., Dosmuratova E.E. Energy from textile waste // Izv. universities. Technology of the textile industry. – 2019, No. 1. S. 71...75.

6. Sattarova Z.G., Ziatdinova D.F., Akhmetova D.A., Fakhruddinov R.R., Bulgar L.I. Modern state of technology for the production of wood-polymer heat-insulating materials // Woodworking industry. – 2020. P.62...72.

7. Sattarova Z.G., Safin R.G., Fakhruddinov R.R., Baigildeeva E.I. The current state of technology for the production of wood-polymer heat-insulating materials // Journal of wood processing industry. – 2020. P.46...54.

8. Mikulsky V.G., Kozlov V.V. Modification of building materials with polymers. – M.: MISI, 1985.

9. Linkov N.V. To the question of the methodology for determining the strength characteristics of adhesive joints of wooden structures. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2021, No. 3. S. 153 ... 158.

10. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. On the occurrence of cracks in the model of a thick-walled concrete cylinder during corrosion, taking into account the porous zone at the interface between reinforcement and concrete. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2021, No. 3. S. 159 ... 165.

11. Zhorina L.A., Kuznetsova O.P., Rogovina S.Z., Vladimirov L.V. and Prut E.V. Preparation and study of the properties of compositions based on crumb rubber and natural polysaccharides // Polym. sci. – Ser. D 13 (3), 2020. P.16...22.

12. Babkin V.A., Ostroumova L.A., Malkov Yu.A., Ivanova S.Z., Onuchina N.A. and Babkin D.V. Biologically active substances from larch wood, Khim. Interesakh Ustoichivogo Razvit. - 9 (3), 2001. P.363...367.

13. Makhijani K., Kumar R. and Sharma S.K. Biodegradability of blends polymers: A comparison of various properties // Crit. Rev. Environ. sci. Technol. - 45 (16), 2015. P. 1801...1825.

Рекомендована кафедрой переработки древесных материалов. Поступила 13.11.21.

УДК 677.011

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_303

**СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН**

**CREATION OF COMPOSITE THERMAL INSULATION MATERIAL
WITH THE USE OF SYNTHETIC TEXTILE FABRICS**

A.A. КУСЕНКОВА, Н.А. ГРУЗИНЦЕВА, М.А. ЛЫСОВА, Б.Н. ГУСЕВ

A.A. KUSENKOVA, N.A. GRUZINTSEVA, M.A. LYSOVA, B.N. GUSEV

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный химико-технологический университет)**

**(Ivanovo State Polytechnic University,
Ivanovo State Chemistry and Technology University)**

E-mail: mtsm@ivgpu.ru; lysova7@yandex.ru

В работе предложена и исследована новая конструкция композитного теплоизоляционного материала с применением тканых и нетканых синтетических полотен, позволяющего осуществлять наружную и внутреннюю теплоизоляцию жилых и административных зданий, имеющих поверхность стен с переменной геометрией.

The paper proposes and investigates a new construction of composite thermal insulation material with the use of woven and non-woven synthetic fabrics, which allows for external and internal thermal insulation of residential and administrative buildings having a wall surface with variable geometry.

Ключевые слова: теплоизоляция стен зданий, композитный материал на основе пенополистирольной плиты, синтетические нетканые и тканые полотна.

Keywords: *thermal insulation of building walls, composite material based on polystyrene foam board, synthetic nonwoven and woven fabrics.*

Для утепления стен жилых и административных зданий используют теплоизоляционные материалы [1], [2], которые способствуют повышению энергоэффективности данных строительных сооружений. Перспективным направлением для решения проблем по эффективной теплоизоля-

ции является использование композитных теплоизоляционных материалов [3].

Для поиска новых технических решений по конструктивному оформлению композитных теплоизоляционных материалов с учетом анализа уже известных решений предварительно рассматривали их класси-

фикацию [4] по соответствующим признакам. При построении классификации композитных теплоизоляционных материалов, как правило, выделяют признаки, отражающие вид армирующего наполнителя (волокнистые, слоистые, порошковые), а также количество используемых однородных материалов в самом композите (двухслойные, трехслойные, многослойные). Кроме этого, выделяют такие признаки классификации, как уровни теплопроводности, жесткости и возгораемости.

В итоге было выявлено, что нерешенной технологической проблемой является утепление теплоизоляционными материалами стен, где их поверхность имеет переменную геометрию.

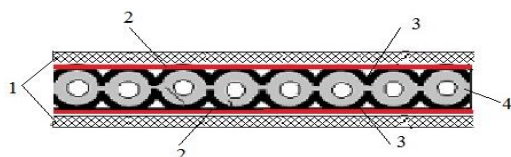


Рис. 1

Для решения данной проблемы был создан новый композитный материал [5], приведенный на рис. 1 (листовой композитный теплоизоляционный материал: 1 – пенополистирол; 2 – тканая синтетическая (стеклянная) сетка; 3 – нетканый синтетический материал; 4 – пенополиэтиленовые цилиндрические прокладки), где в качестве основы (матрицы) использовали листы 1 пенополистирола [2]. В данном композите средний слой выполнен в виде цилиндрических пенополиэтиленовых прокладок 4 [6], контактирующих по внешним цилиндрическим поверхностям с нетканым волокнистым материалом 3, произведенным из полиэфирных волокон. При этом цилиндрические пенополиэтиленовые прокладки 4 и нетканый волокнистый материал 3 заключены в полиэфирные (стеклянные) сетки 2 [7] и соединены с поверхностями пенополистирола 1.

Основные функции составляющих композит материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование материала	Выполняемые материалом функции	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Пенополистирол (ГОСТ 15588-2014. Плиты пенополистирольные теплоизоляционные. Технические условия)	Для сохранения требуемой теплопроводности (теплозащиты) с низкой изгибной жесткостью и как исходный материал, на который в дальнейшем наносят штукатурный раствор	0,064
Тканая сетка (ГОСТ Р55225-2012. Сетки из стекловолокна фасадные армирующие щелочестойкие. Технические условия)	Для создания необходимой механической прочности конструкции композитного теплоизоляционного материала на изгиб и сжатие	-
Нетканый материал (СТО 63165618-002-2010. Полотна нетканые геотекстильных марок "Геоманит" для строительства)	Для сохранения требуемой теплопроводности (теплозащиты), а также для соединения пенополиэтиленовых цилиндрических прокладок	0,051
Пенополиэтиленовые цилиндрические прокладки (ТУ 2291-009-03989419-2006 Материал пенополиэтиленовый "Вилатерм" с отверстием, сплошной)	Упругодеформируемый материал и частично для сохранения теплоизоляционных свойств	0,050

Прежде всего конструктивно предложено использовать два слоя теплоизоляционного нетканого материала, между которыми был размещен средний слой (рис. 1).

Варианты применения нового композитного теплоизоляционного материала для

стен с поверхностью переменной геометрии представлены на рис. 2 (виды поверхностей с использованием композитного теплоизоляционного материала: а – криволинейная поверхность; б, в – локальные перепады по толщине).

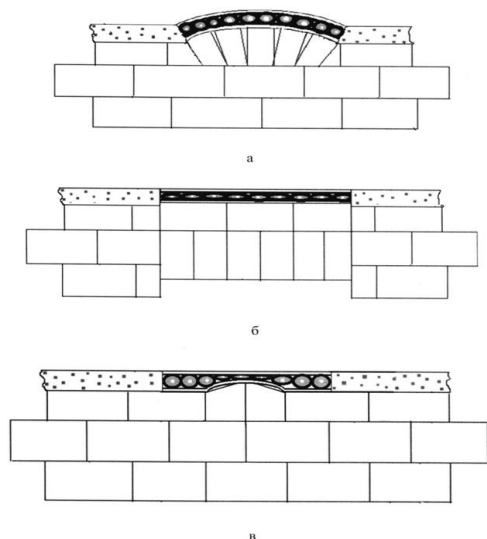


Рис. 2

В табл. 2 приведены результаты испытаний нового композитного теплоизоляционного материала по основным показателям качества.

Из табл. 2 видно, что коэффициент теплопроводности листового композитного теплоизоляционного материала [5] не менее используемого для утепления стен зданий данной толщины пенополистирола. Поэтому применение предлагаемого композита для утепления стен жилых и административных зданий с переменной геометрией наружной (внутренней) поверхности, таких как большая кривизна и отдельные локальные перепады по толщине, наиболее целесообразно.

Т а б л и ц а 2

№	Испытываемый материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Предел прочности при сжатии, МПа, не менее
1	Пенополистирол, толщиной от 100 мм (используемый для утепления стен)	0,038	0,200	0,100
2	Пенополистирол (не более 20 мм)	0,051	0,060	0,040
3	Пенополистирол с наклеенной тканой сеткой	0,050	0,060	0,040
4	Пенополистирол с наклеенной стеклянной сеткой и волокнистым нетканым материалом	0,040	0,200	0,100
5	Предлагаемый композитный теплоизоляционный материал[5].	0,037	0,250	0,120

Несмотря на то, что стоимость представленного композитного теплоизоляционного материала превышает стоимость применяемого пенополистирола, предлагаемое техническое решение [5] сокращает временные затраты на утепление криволинейных поверхностей. Кроме этого, представленный материал отличается повышенной механической прочностью и упругой деформацией. Повышенная прочность достигается с помощью двух армирующих сеток и дополнительно включением цилиндрических вкладышей.

Комплектование предлагаемого композитного теплоизоляционного материала осуществляют в заводских условиях или непосредственно на строительной площадке. В частности, на подготовленные тонкие листы (верхний и нижний) пенополи-

стирола первоначально накладывают синтетические или стеклянные сетки, которые затем пропитывают клеевым раствором марки 88-НП. Затем на поверхность одной из сеток размещают волокнистый нетканый материал. В дальнейшем на поверхность нетканого материала устанавливают параллельно друг другу цилиндрические пенополиэтиленовые прокладки, которые затем накрывают вторым слоем нетканого материала и соединяют их поверхности клеевым раствором. На заключительном этапе формирования композита накрывают всю полученную конструкцию вторым листом пенополистирола, армированного тканой сеткой с клеевым раствором, и выкладывают под пресс на время высыхания клеевых прослоек.

Основным свойством разработанного композитного изделия [4] в соответствии с его назначением является теплопроводность. Данное свойство количественно оценивается коэффициентом теплопроводности (λ , Вт/м·К) и сопротивлением теплопередаче (R , м²К/Вт) [8]. В результате расчетов установлено значение: $\lambda = 0,037$ Вт/м·К; $R = 2,05$ м²К/Вт.

Таким образом, сформированное композитное изделие с применением волокнистых синтетических материалов для утепления различных по конфигурации стен жилых и административных зданий по основному свойству теплопроводности соответствует техническим требованиям пенополистирола толщиной 120 мм. Несмотря на то, что стоимость представленного композитного теплоизоляционного материала превышает стоимость применяемого пенополистирола, предлагаемое техническое решение сокращает временные затраты на утепление стен с переменной геометрией ее поверхности. Кроме этого, разработанный композитный материал отличается повышенной механической прочностью и упругой деформацией. Повышенная прочность достигается с помощью двух армирующих сеток и дополнительными цилиндрическими вкладышами.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы известные конструкции как однородных, так и композитных теплоизоляционных материалов, применяемых для утепления стен жилых и административных зданий.

2. Спроектирована, реализована и исследована конструкция композитного теплоизоляционного материала, содержащего в качестве основы пенополистирольные плиты, а также тканые и нетканые текстильные полотна, предназначенного для утепления стен с переменной геометрией ее поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белова И.Ю., Метелева О.В., Галков А.Е., Шаммут Ю.А. Разработка и исследование композиционных теплоаккумулирующих материалов // Изв.

вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, №6. С. 186...190.

2. ГОСТ 15588–2014 Плиты пенополистирольные теплоизоляционные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015.

3. Кусенкова А.А., Федосов С.В., Малбиев С.А., Ветрова Ю.С., Грузинцева Н.А., Гусев Б.Н. Состояние и перспективы применения полимерных теплоизоляционных материалов в строительстве // Вестник Приволжского государственного политехнического университета. Серия: "Материалы. Конструкции. Технологии". – 2018, № 3 (7). С. 26...43.

4. Жерносек С.В., Ольшанский В.И. Модификация структуры композиционных текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, №6. С. 41...43.

5. Патент на полезную модель № 172004 Российская Федерация, МПК E04B1/88 (2006.01) E04B1/80 (2006.01). Листовой композитный теплоизоляционный материал/ Кусенкова А.А., Грушина Ю.С., Грузинцева Н.А., Зяблов В.А., Гусев Б.Н. – Опубл. 26.06.2017. Бюл. № 18.

6. ТР 116-01. Технические рекомендации по технологии применения комплексной системы материалов, обеспечивающих качественное уплотнение и герметизацию стыков наружных стеновых панелей. Технические указания по герметизации стыков полносборных зданий полимерами. – М.: Изд-во ГОУ ДПО ГАСИС, 2007.

7. Одицова О.И., Румянцев Е.В., Козлова О.В., Румянцева В.Е., Полушин Е.Г., Русакова А.Н. Полимерно-клеевые композиции с мембранными свойствами для дублирования волокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, №6. С. 127...134.

8. ГОСТ Р 54855-2011. Материалы и изделия строительные. Определение расчетных значений теплофизических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2012.

REFERENCES

1. Belova I.Yu., Meteleva O.V., Galkov A.E., Shammut Yu.A. Development and research of composite heat storage materials // Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2019, No. 6. S. 186...190.

2. GOST 15588–2014 Heat-insulating polystyrene foam boards. Specifications. – M.: Standartinform, 2015.

3. Kusenкова A.A., Fedosov S.V., Malbiev S.A., Vetrova Yu.S., Gruzintseva N.A., Gusev B.N. State and prospects for the use of polymeric heat-insulating materials in construction // Bulletin of the Volga State Polytechnic University. Series: "Materials. Designs. Technologies". - 2018, No. 3 (7). pp. 26...43.

4. Zhernosek S.V., Olshansky V.I. Modification of the structure of composite textile materials under the influence of microwave radiation. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2020, No. 6. pp. 41...43.

5. Utility model patent No. 172004 Russian Federation, IPC E04B1/88 (2006.01) E04B1/80 (2006.01). Sheet composite heat-insulating material / Kusenkova A.A., Grushina Yu.S., Gruzintseva N.A., Zyablov V.A., Gusev B.N. – Published. 06/26/2017. Bull. No. 18.

6. TR 116-01. Technical recommendations on the technology of using a complex system of materials that provide high-quality sealing and sealing of joints of external wall panels. Technical instructions for sealing joints of prefabricated buildings with polymers. - M.: Publishing house of GOU DPO GASIS, 2007.

7. Odintsova O.I., Rumyantsev E.V., Kozlova O.V., Rumyantseva V.E., Polushin E.G., Rusakova A.N. Polymer-adhesive compositions with membrane properties

for duplication of fibrous materials. Izv. universities. Technology of the textile industry. - 2020, No. 6. pp. 127...134.

8. GOST R 54855-2011. Building materials and products. Determination of calculated values of thermo-physical characteristics. – M.: Standartinform, 2012.

Рекомендована кафедрой материаловедения и товароведения, метрологии и стандартизации ИВГПУ. Поступила 30.09.21.

УДК 677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_307

ТЕРМОПЛАСТИКОВЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

THERMOPLASTIC COMPOSITE TECHNOLOGIES

Д.Б. ГУБАНОВ

D.B. GUBANOV

ООО "Термопластиковые композитные технологии"

LLC "Thermoplastic Composite Technologies"

E-mail: info@tpcomposites.ru

В работе приведено описание ассортимента продукции, а также отдельных показателей качества термопластиковых композитов, производимых компанией ООО "Термопластиковые композитные технологии". Приведены основные отрасли, являющиеся потребителями угленасыщенных термопластичных композитов.

Показано, что в некоторых областях применение композитов на основе термопластов имеет экономические и функциональные преимущества по сравнению с термореактивными композитами и металлами, а также возможность быстрого и экономического серийного производства.

The paper provides a description of the product range, as well as individual quality indicators of thermoplastic composites produced by Thermoplastic Composite Technologies LLC. The main industries that are consumers of carbon-filled thermoplastic composites are given.

It is shown that in some areas the use of composites based on thermoplastics has economic and functional advantages compared to thermosetting composites and metals, as well as the possibility of fast and economical mass production.

Ключевые слова: угленасыщенные термопластичные композиты, автомобилестроение, индустрия спорта и отдыха, авиационно-космическая область, здравоохранение и медицина, электроника, 3D печать.

Keywords: carbon-filled thermoplastic composites, automotive industry, sports and recreation industry, aerospace, healthcare and medicine, electronics, 3D printing.

Компания "Термопластиковые композитные технологии" (ООО "ТКТ") – российский производитель термопластичных композитных материалов, разработчик технологий и оборудования для их переработки в готовые изделия.

ООО "ТКТ" стремится сделать композитные изделия более доступными для промышленности, повысить степень автоматизации их производства и расширить сферы применения композитов. Для чего в качестве основной своей специализации выбрало разработку композитов на основе термопластичных матриц. В компании по запатентованной технологии изготавливают термопластичные препреги, из которых уже производят материалы и изделия со свойствами, сопоставимыми с зарубежными аналогами.

Термореактивные полимеры (эпоксидные, полиэфирные и так далее) после отверждения приобретают сшитую структуру и теряют способность плавиться без разложения, в то время как термопластичные (полиамиды (РА, ПА), полипропилен (РР, ПП), полифениленсульфид (PPS, ПФС), полиэфирэфиркетон (РЕЕК, ПЭЭК)) могут многократно подвергаться циклическому нагреву-охлаждению.

В последнее время заметно увеличение применения углепластиков в гражданских отраслях промышленности. И это неудивительно. Эксплуатационные характеристики угле композита в зачатку во много раз превосходят характеристики традиционно используемых материалов. Однако наиболее распространенное производство углепластиков с эпоксидной матрицей характеризуется длительностью и низкой степенью автоматизации (последнее возможно, но достаточно дорогостояще). А для широкого применения необходимо использовать более быстрые и более автоматизированные технологии, например, те, по которым производят изделия из композитов с ис-

пользованием термопластичных связующих материалов. Современные термопласты позволяют получать изделия для работы даже в экстремальных условиях – минусовых температурах, температурах свыше 200°C, в агрессивных средах. И не стоит забывать о возможности их вторичной переработки и использования.

Если подытожить, то разрабатываемые ООО "ТКТ" термопластичные композитные материалы (ТПКМ) позволяют:

- организовать серийное производство композитных изделий с минимальной стоимостью;
- использовать автоматизированные процессы производства, в том числе и 3D-печать;
- использовать композиты в экстремальных условиях, благодаря подбору соответствующих полимерных матриц;
- проводить вторичную переработку изделий, что позволяет экономить финансовые ресурсы и снижать стоимость жизненного цикла композитного изделия.

На рис. 1 показан поперечный срез производимого в ООО "ТКТ" препрега.

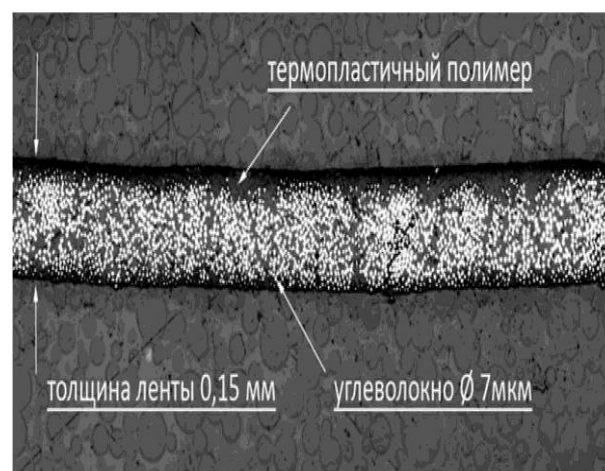


Рис. 1

В табл. 1 показаны основные свойства композитов на основе производимых в ООО "ТКТ" полуфабрикатов.

Показатель	Термопластичные углекомпози́ты ООО "ТКТ"			Для справки	
	ПА6	ПФС	ПЭЭК	углеэпокси-компо́зит	алюминий
Предел прочности, МПа	1900	2000	2400	1800	310
Модуль упругости, ГПа	120	130	145	125	70
Плотность, г/см ³	1,45	1,59	1,58	1,30	2,70
Температура эксплуатации, °С	-60...+120	-60...+220	-40...+260	-50...+110	-150...+350

Компания "ТКТ" разработала линейку инновационных композитных материалов – полуфабрикатов, доступных в различных формах под конкретные задачи заказчика с заданными свойствами. В настоящее время в компании выпускаются препреги на основе углеродного волокна и ПП, ПА6, ПФС, ПЭЭК. Ведется разработка по расширению линейки продукции за счет использования комбинаций иных волокон и полимеров. Базовое содержание волокна в продуктах колеблется от 40 до 60%. Хранить их можно при комнатной температуре без ограничения срока годности.



Рис. 2

Ассортимент продукции компании представлен:

- однонаправленными термопластичными композитными лентами (рис. 2 – однонаправленная термопластичная композитная лента), которые выпускаются на основе углеродного волокна и полиамидов, полифениленсульфидов, полиэфирэфиркетонов (последние – российского производства). Толщина лент составляет 0,14...0,2 мм, ширина 3, 6,35, 12,7, 25,4 и 50,8 мм, длина в катушке 100...1000 м. Данные ленты можно использовать при намотке и автоматической выкладке (ATL) изделий из

компо́зитов;

- консолидированными термопластичными композитными листами (рис. 3 – консолидированные термопластичные композитные листы), ориентация слоев наполнителя в которых может быть как базовой 0/90/-45/45, так и любой другой – по запросу заказчика. Толщина листов 0,5...5 мм, размер до 500x500 мм. Листы могут быть армированы как угле-, так и стекловолокнами, а в качестве матрицы используются ПП, ПА6, ПФС, ПЭЭК. Данные листы перерабатываются в готовые изделия путем горячего прессования и/или сварки;



Рис. 3

- термопластичным премиксом ВМС (Bulk Molding Compound, рис. 4 (термопластичный компаунд ВМС (Bulk Molding Compound)), состоящим из отрезков ленты длиной от 10 до 70 мм и шириной 3...7 мм. Формовочный компаунд поставляется в мешках от 1 до 10 кг, перерабатывается с помощью горячего прессования и может быть изготовлен из угле- и/или стекловолокон со связующими на основе ПП, ПА6, ПФС, ПЭЭК;



Рис. 4

- филаментом для 3D-печати, армированной непрерывным углеродным волокном (рис. 5 – филамент для 3D-печати, армированная непрерывным углеволокном). Диаметр филамента может быть 0,4, 0,6 и 1,2 мм, а длина в бобине от 100 до 1000 м. Степень наполнения – 40...60%. Жилка производится из ПА6. Но в настоящее время также получены первые образцы, и ведутся работы по запуску производства филамента на основе ПФС и ПЭЭК;



Рис. 5

- изделиями из термопластичных композитных материалов – под заказ (рис. 6 – пример выпускаемых под заказ изделий из термопластичных композитных материалов). Специалисты компании проектируют и изготовят формы и оснастку, а также произведут с помощью горячего прессования, открытого формования и/или сварки на принадлежащем компании оборудовании необходимую заказчику партию изделий размером до 500x500x200 мм.

На рис. 7 представлен углепластиковый кронштейн для мотоцикла, изготовленный ООО "ТКТ" под заказ. Благодаря переходу от использования композита на основе эпоксидной смолы к композиту на основе ПА6, удалось снизить стоимость и время

изготовления партии изделий, сохранив при этом их низкий вес и прочность.



Рис. 6

Партия кронштейнов была изготовлена с помощью горячего прессования из однонаправленной термопластичной композитной ленты на основе углеволокна и ПА6.



Рис. 7

Основные отрасли – потребители угленаполненных термопластичных композитов:

- автомобилестроение: конструкции сидений, дверные держатели, кузовные панели, элементы экстерьера и интерьера;
- индустрия спорта и отдыха: спортивные шлемы, части велосипедов, лыжи, сноуборды, дроны;
- авиационно-космическая область: напольные панели, фюзеляжи, опоры двигателя, компоненты кабины, корпуса и элементы ракет;
- здравоохранение и медицина: обувные вставки, протезы, ортезы;
- электроника: задние крышки для мобильных устройств;
- область 3D-печати: филамент для 3D-принтеров.

В некоторых областях применения композиты на основе термопластов дают ощутимые экономические и функциональные

преимущества, по сравнению с терморезактивными композитами и металлами. Возможность быстрого и экономичного серийного производства позволяет использовать композиты там, где ранее их применение было нерентабельным, например, изготовление дронов, авто-, мото- и велотехники.

Для российской композитной отрасли расширение производства и применения термопластичных композитов позволит как увеличить использование угле- и стеклопластиков в деталях и конструкциях, так и

частично решить проблему переработки композитных материалов. Вышедшие из строя изделия из ТПКМ достаточно легко перерабатываются с небольшим изменением механических свойств.

Компания "ТКТ" открыта для сотрудничества как в вопросах поставки материалов, изготовления деталей, так и совместных работах и исследованиях: info@tpcomposites.ru.

Поступила 14.12.21.

УДК 691.175.2

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_311

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТВЕРЖДЕННОЙ ПОЛИЭФИРАКРИЛАТНОЙ СМОЛЫ МГФ-9

MECHANICAL PROPERTIES OF THE HARDENED POLYESTER ACRYLATE RESIN MGF-9

*В.Т. ЕРОФЕЕВ, В.И. ИВЛЕВ, А.В. МЫШКИН, В.А. ЮДИН,
Т.Ф. ЕЛЬЧИЦЕВА, А.Ф. СИГАЧЕВ*

*V.T. EROFEEV, V.I. IVLEV, A.V. MYSHKIN, V.A. YUDIN,
T.F. ELCHISHCHEVA, A.F. SIGACHEV*

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Тамбовский государственный технический университет)

(National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev,
Tambov State Technical University)

E-mail: a464aa@gmail.com; elschevat@mail.ru

Использование полимерных материалов и их экономическая эффективность заключается в возможности изготовления на их основе защитных покрытий для строительных конструкций, покрытий полов и других элементов самых различных рецептур, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства, важнейшими из которых являются физико-механические. В связи с этим цель исследований состояла в анализе зависимостей механических свойств и степени отверждения полиэфиракрилатных композитов от содержания отверждающих компонентов.

Прочностные испытания показали возможность получения высокопрочных полиэфиракрилатных композитов на основе смолы марки МГФ-9 с использованием в качестве ускорителя отверждения октоата кобальта (ОК-1) и инициатора отверждения – пероксида циклогексанона (ПЦОН-2).

Показана возможность применения оптимальных составов композиций в качестве защитных покрытий по строительным конструкциям и прочных полимербетонных полов на предприятиях текстильной промышленности.

The use of polymeric materials and their economic efficiency lies in the possibility of manufacturing, on their basis, of protective coatings for building structures, floor coverings and other elements of various formulations that provide the required performance properties, the most important of which are physical and mechanical. In this regard, the aim of the research was to analyze the dependences of the mechanical properties and the degree of hardening of polyester acrylate composites on the content of hardening components.

Strength tests have shown the possibility of obtaining high-strength polyether acrylate composites based on MGF-9 resin using cobalt octoate (OK-1) as a hardening accelerator and a hardening initiator – cyclohexanone peroxide (PCON-2).

The possibility of using optimal compositions of compositions as protective coatings for building structures and durable polymer concrete floors at enterprises of the textile industry is shown.

Ключевые слова: полиэфиракрилатная смола, композиционные полимерные материалы, эпоксидный композит, механические свойства, вяжущее, отвердитель, ускоритель отверждения, степень отверждения, прочностные характеристики.

Keywords: polyester acrylate resin, composite polymer materials, epoxy composite, mechanical properties, binder, hardener, hardening accelerator, degree of hardening, strength characteristics.

Введение

Повышение долговечности строительных конструкций и технологического оборудования во всех отраслях промышленности, в том числе и в текстильной, приобретает особую актуальность в современных условиях развития экономических отношений. С развитием химических и биологических технологий традиционные строительные материалы, используемые для изготовления строительных конструкций, полов, защитных покрытий, не удовлетворяют требованиям долговечности. Наиболее целесообразным в этом случае является использование армополимербетонных конструкций, полимерных защитных покрытий, клеев, герметиков. Для предприятий текстильной промышленности характерны высокие нагрузки на полы, эксплуатация строительных конструкций и материалов в условиях агрессивного воздействия производственной среды, поэтому необходимо использование особого типа покрытий для конструкций и полов, которые способны

выдерживать такого вида воздействия и нагрузки.

Строительные материалы и изделия на основе синтетических смол весьма эффективны при эксплуатации в агрессивных средах. При сравнении их с композитами на других связующих, выделяются их повышенные физико-механические свойства, износ- и химическая стойкость [1...4], электрическое сопротивление. Такие строительные материалы обычно наносят в виде тонкослойных лакокрасочных защитных покрытий и мастик.

Экспериментальные исследования механических свойств полиэфиракрилатной смолы МДФ-9 и композитов, полученных на ее основе, с добавлением кварцевого песка, проводились авторами ранее [5] с целью оптимизации состава и технологии получения этих материалов. В настоящей статье эти и полученные позже экспериментальные данные анализируются для получения дополнительной информации о меха-

низмах, формирующих механические свойства данного класса материалов.

Материалы и методы

Для получения композиционного материала использованы: вяжущее – олигоэфир-акрилат марки МГФ-9, отвердитель – пероксид циклогексанона (ПЦОН-2) и ускоритель отверждения – октоат кобальта (ОК-1). Образцы изготавливались в металлических формах, предварительно смазанных парафином. Для исследования механических свойств использовали образцы прямоугольного сечения с размерами 10×10×30 мм.

Определение прочности образцов проводили на универсальной испытательной машине Shimadzu Autograph AG-X Series (Япония). Управление процессом испытаний и предварительная обработка данных, получаемых на этой машине, производятся с помощью программного обеспечения TRAPEZIUM X*1. Измерения проводились с различной скоростью перемещения активного захвата – от 1 до 10 мм/мин. Усилие растяжения и сжатия было направлено вдоль длинной оси образца.

Кроме того, проводились испытания методом вдавливания индентора [6]. При этом

определялись твердость и модули упругости и деформации.

Все измерения осуществлялись при нормальных условиях.

Определение оптимальных условий для получения заданных свойств отвержденной смолы и композитов на ее основе проводилось с использованием метода математического планирования эксперимента (ММПЭ). Основным результатом этого метода – регрессионное уравнение, связывающее исследуемое свойство с влияющими на него факторами. Рассмотрим использование ММПЭ на примере определения прочности (при испытании на сжатие и изгиб) отвержденной смолы в зависимости от количества инициатора (ПЦОН-2) и ускорителя отверждения (ОК-1) [4]. Массовые доли: отвердителя – 1,6; 2,8 и 4,0; ускорителя отверждения – 3,2; 4,4 и 5,6.

Матрица планирования эксперимента содержит девять вариантов сочетания трех разных уровней двух факторов (план Коно). Соответственно, обработка экспериментальных данных позволяет получить регрессионное уравнение, содержащее девять коэффициентов:

$$Y_1 = A_0 + A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + A_{11} \cdot X_1^2 + A_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + A_{22} \cdot X_2^2 + A_{112} \cdot X_1^2 \cdot X_2 + A_{122} \cdot X_1 \cdot X_2^2 + A_{1122} \cdot X_1^2 \cdot X_2^2.$$

Результаты и обсуждения

Полученное для прочности при сжатии

$$Y_1 = 178,000 - 4,900 \cdot X_1 + 18,600 \cdot X_2 - 9,500 \cdot X_1^2 + 8,725 \cdot X_1 \cdot X_2 - 24,200 \cdot X_2^2 - 10,425 \cdot X_1^2 \cdot X_2 + 11,025 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + 5,675 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2.$$

Графически результаты вычислений по данному регрессионному уравнению представлены в виде изолиний уровней отклика на двумерной диаграмме (рис. 1 – зависимость изменения прочности композитов (МПа) на сжатие от содержания отверждающих компонентов ПЦОН-2 (%) и ОК-1 (%)).

Оптимальные значения факторов по этой диаграмме находятся визуально. Оптимальное для получения максимальной прочности на сжатие соотношение компонентов оказалось следующим: на 100 час-

уравнение регрессии имеет вид:

тей (по массе) смолы следует брать 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя отверждения.

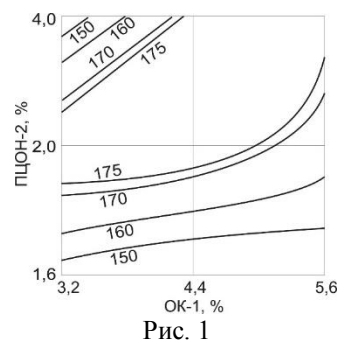


Рис. 1

Оптимальные значения факторов по этой диаграмме находятся визуально. Оптимальное для получения максимальной прочности на сжатие соотношение компонентов оказалось следующим: на 100 частей (по массе) смолы следует брать 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя твердения. Стандартный анализ уравнения регрессии на экстремумы (через частные производные) дал, близкие к визуальным, значения: 3,03 части отвердителя и 4,24 части ускорителя твердения.

Регрессионное уравнение полезно для определения оптимальных соотношений

переменных факторов. Но для более детального анализа необходимо построение графиков однопараметрических зависимостей. На рис. 2 представлены зависимости четырех характеристик отвержденной смолы от содержания отвердителя (слева) и ускорителя твердения (справа) в исходной смеси (сверху – вниз: степень отверждения; твердость (МПа); прочность на сжатие (МПа); прочность на изгиб (МПа)). Содержание фактора: максимальное значение – \bullet —, среднее значение – \blacktriangle —, минимальное – \blacksquare —).

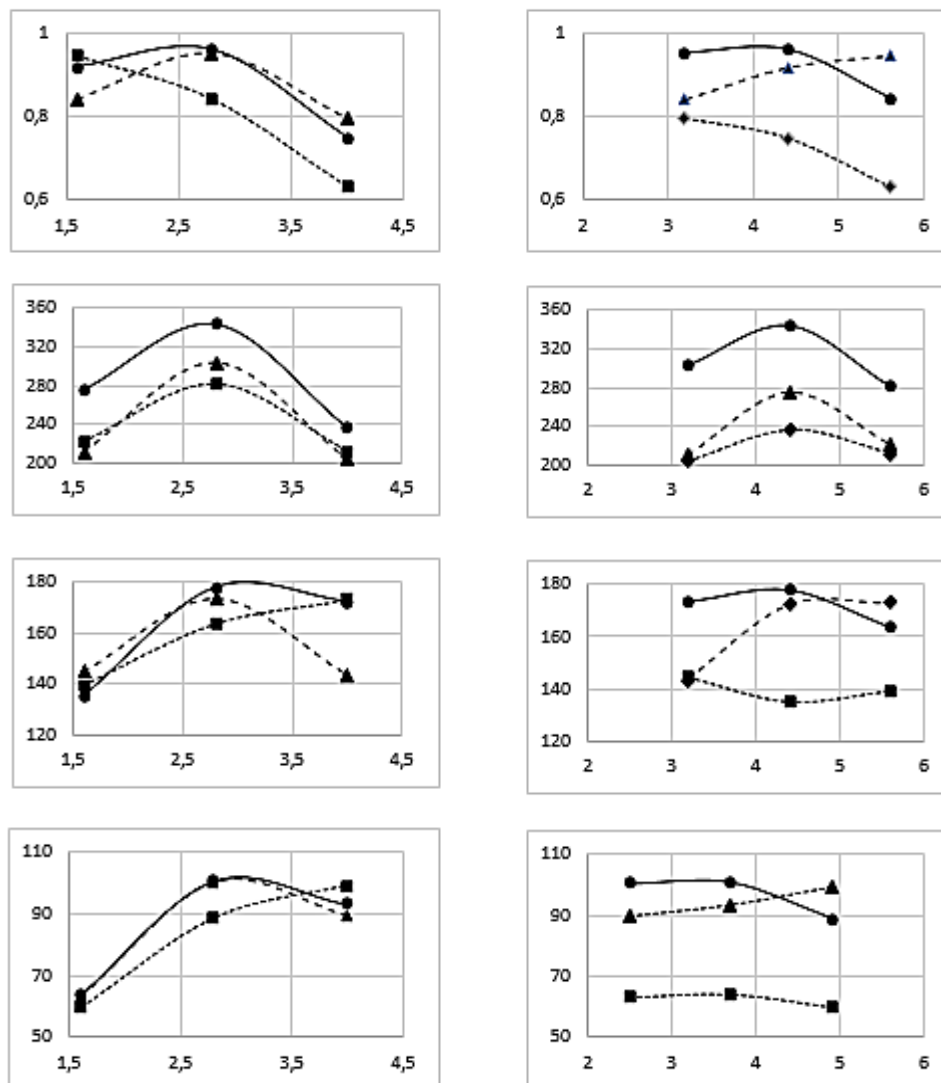


Рис. 2

Как видно из рис. 2, степень отверждения смолы в проведенных экспериментах никогда не достигает значения 1,0, откуда следует, что смола никогда не отвердевает

полностью. В связи с этим имеет смысл обратиться к определению термина "твердое состояние".

Известно, что в физике "твердым" называют агрегатное состояние вещества, в котором оно способно противостоять внешним воздействиям, стремящимся изменить его форму или размеры. Это определение макроскопическое, базирующееся фактически на видимых, относительно легко определяемых признаках – форма и размеры.

Второе определение – термодинамическое, фазовое. Признаком различия двух сосуществующих фаз является наличие физической (наблюдаемой так или иначе) границы раздела между ними. Фазы могут отличаться по составу, структуре (атомно-молекулярной) и свойствам. Макроскопически отвержденная смола находится в твердом агрегатном состоянии. Не полностью отвержденной смолу можно считать лишь в том случае, если из нее может быть легко выделена жидкая (текучая) компонента.

В микроскопическом понимании твердым называется такое состояние вещества, в котором тепловое движение молекул (атомов) сводится к колебаниям около некоторых положений равновесия, которые практически не меняются с течением времени. Разделение твердой и жидкой фаз в этом плане достаточно четко проводится лишь для веществ с относительно простым составом молекул – одноатомным или состоящим из небольшого числа атомов. Однако и в этом случае однозначное определение фазового состояния вещества (или исследуемого образца) не всегда возможно. Так, из-за образования гетерофазных флуктуаций состояние твердого (кристаллического) вещества в окрестности дефектов кристаллической структуры можно в определенном смысле (по степени упорядоченности) считать близким к жидкому [7...10].

Отвержденные синтетические смолы (олиго- или полимеры) – это вещества, состоящие из многоатомных молекул сложного строения. Большие размеры и разветвленность этих молекул затрудняют трансляционную компоненту их теплового движения даже в жидком состоянии и приводят к почти полному его прекращению при относительно низких температурах – отвер-

ждению. Таким образом, степень отверждения смолы с позиций молекулярно-кинетической теории сводится к степени свободы трансляционного теплового движения молекул.

В процессе отверждения смолы происходит генерация свободных радикалов из пероксида циклогексанона, взаимодействие их с CH_2 -группами метакрильного фрагмента смолы и сшиванием последних в макромолекулы. Укрупнение молекул обуславливает потерю ими способности к трансляционному тепловому движению и переходу вещества в макроскопически твердое состояние. В наших экспериментах со смолой степень отверждения определялась долей некоторых (избранных) фрагментов макромолекул, вступивших (или не вступивших) в реакцию определенного типа, то есть микроскопически. Такой способ определения степени отверждения по отношению к макроскопическому состоянию, конечно, является косвенным, но вполне допустим по отношению к состоянию микроскопическому (атомно-молекулярному).

Графики, приведенные на рис. 2, позволяют сопоставить степень отверждения смолы с ее механическими свойствами, определяющими прочность образцов [11]. Как видно, максимальной степени отверждения отвечают и максимальные значения твердости и прочности. Однако полного соответствия между ними не наблюдается. Особенно четко это видно на рис. 3 (зависимость между прочностными характеристиками и степенью отверждения смолы: слева – направо: твердость, прочность на сжатие, прочность на изгиб (МПа)), где показано соотношение между степенью отверждения и прочностными характеристиками. Разброс экспериментальных точек настолько велик, что линию тренда (сплошная линия на рисунках) можно провести лишь с очень малым значением коэффициента достоверности интерполяции R^2 .

Все механические свойства материалов определяются в ходе их деформации при различных схемах приложения механического напряжения. Естественно, при этом

могут действовать разные атомно-молекулярные механизмы деформирования, при-

водящие к разным результатам.

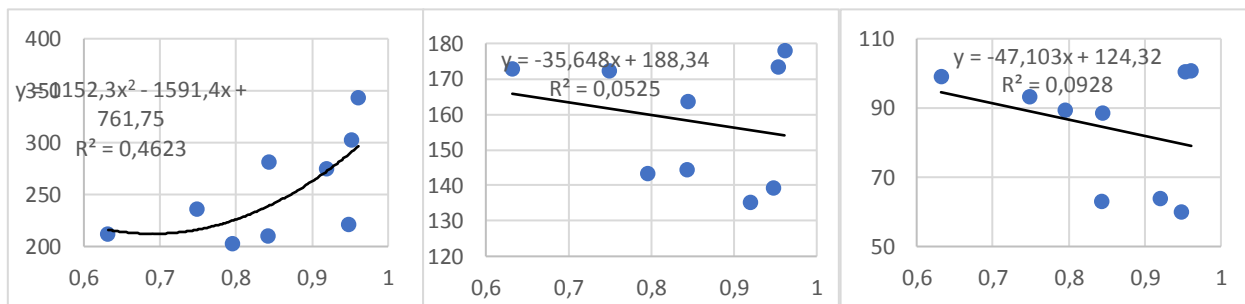


Рис. 3

Отметим, что в отличие от деформации веществ с простыми молекулами, когда молекулы остаются неизменными, при деформации полимерных материалов происходят изменения и в строении молекул, они делятся на части, которые затем соединяются в новые молекулы. Многообразие процессов приводит к тому, что описать процесс деформации отвержденного полимера какой-либо одной атомно-молекулярной моделью невозможно. Поэтому необходимо развитие обобщенных моделей, базирующихся на введении некоторых обобщенных параметров типа параметра беспорядка [12].

сжатие и изгиб, также не наблюдается (рис. 5). Лишь видно, что величина всех модулей уменьшается с увеличением времени выдержки, что свидетельствует о процессе ползучести [13].

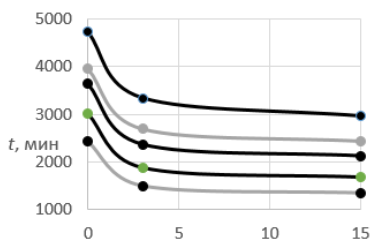


Рис. 4

Методом вдавливания индентора определялись твердость и упругие модули (условно-мгновенный E_0 , равновесный $E_{ув}$ и модуль деформации E_d) через отношение нагрузки на индентор (постоянной) к глубине погружения индентора (то есть деформации) спустя 1 с, 3 мин и 15 мин после начала приложения нагрузки. На рис. 4 результаты измерения модулей представлены как функция времени выдержки образца под нагрузкой. Однозначного соответствия между изменением модулей и степенью отверждения, как и при испытаниях на

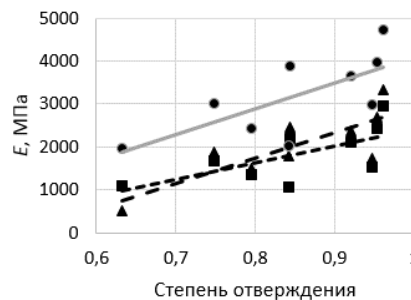


Рис. 5

Расчеты показали, что относительная деформация изменяется с течением времени по закону, близкому к логарифмическому, как это было показано в работах [14], [15] ранее.

Существенным в данном исследовании является то, что механические свойства, определенные методом вдавливания индентора (твердость и модули), демонстрируют тенденцию к росту с увеличением степени отверждения смолы (рис. 3 и рис. 5). Прочность при испытаниях на сжатие и изгиб, наоборот, уменьшается. Можно предположить, что это расхождение обусловлено особенностями напряженного состояния образцов. При испытаниях на сжатие и изгиб в напряженном состоянии находится (деформируется) материал образца по всему его сечению и, в конечном счете, образец разрушается. При

вдавливании индентора деформируется лишь небольшая часть образца около индентора, деформация в той или иной степени локализована, целостность образца не нарушается, образец до разрушения не доводится.

Отвержденные полимерные материалы обычно разрушаются хрупко. Процесс разрушения начинается с появления микротрещин, образование которых легче всего происходит на поверхности образца. Уменьшение прочности с увеличением степени отверждения означает, что наличие неполностью отвержденных участков (комплексов) затрудняет образование микротрещин.

Склонность к хрупкому разрушению практически у всех материалов, в том числе аморфных, усиливается с понижением температуры. Согласно теории гетерофазных флуктуаций [16] образование квазизжидких областей наиболее вероятно на поверхности материала и повышается с ростом температуры. Можно сказать, что при увеличении температуры состояние поверхности кристалла в некотором смысле приближается к жидкому – уменьшается степень его кристалличности. Отсюда можно сделать вывод о том, что чем больше кристаллической фазы, тем больше вероятность хрупкого разрушения и меньше прочность. Отверждение смолы приводит к уменьшению степени беспорядка в ее структуре, значит к охрупчиванию и уменьшению прочности.

При вдавливании индентора механические напряжения в значительной степени локализованы, до свободной поверхности образца не доходят, а образования микротрещин практически не происходит. Прочностные характеристики материала в этом случае определяются соотношением твердой и квазизжидкой составляющих и, естественно, растут с ростом степени отверждения. Именно так можно объяснить увеличение характеристик, определяемых методом вдавливания, с ростом степени отверждения.

Практическое применение результатов исследования заключалось в оптимизации состава защитного покрытия для метал-

лических конструкций в помещениях производственного назначения АО "Мордовспецстрой" и при изготовлении верхнего покрытия полов путем нанесения антикоррозионного полимерного покрытия МГФ-9. Это связующее характеризуется декоративными качествами и высокой прочностью и коррозионной стойкостью, поэтому может применяться для полимербетонов в цветных изделиях. Оптимальная толщина покрытия составляет от 3-х до 5...6 мм.

МГФ-9 входит в разработанный состав для изготовления лакокрасочных и мастичных композиций, высоконаполненных полимербетонов, которые могут использоваться в качестве антикоррозионной защиты строительных конструкций и полов в условиях высоких механических нагрузок и агрессивного воздействия среды путем нанесения слоя полимерного покрытия. При высоких нагрузках на покрытия полов на предприятиях текстильной промышленности и аналогичных производств рационально использование каркасных полимербетонов с зернами крупного заполнителя. В результате исследования прочностных показателей выявлен наиболее оптимальный защитный состав. При этом к приведенной выше рецептуре композита (на 100 частей по массе смолы – 3 части отвердителя и 4,6 частей ускорителя твердения) вводится при перемешивании гранитный щебень (фракция 2,5...5 мм) в количестве 2000 частей по массе, либо песок – 200 частей по массе.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ экспериментальных данных по механическим свойствам отвержденной полиэфиракрилатной смолы МГФ-9.

2. Установлено, что максимальной степени отверждения смолы, как правило, отвечают максимальные значения прочностных характеристик, однако однозначного соответствия между величинами этих свойств не наблюдается, что связывается с

различием молекулярных механизмов деформации при разных способах деформирования образцов.

3. При испытании методом вдавливания индентора наблюдается увеличение твердости и упругих модулей с ростом степени отверждения. Обнаружены также признаки логарифмической ползучести.

4. Проведен анализ способов определения понятия "твердое состояние" и методов оценки степени отверждения.

5. Практическое применение результатов исследования заключается в разработке оптимального состава и применении полученного композиционного материала для защиты металлических конструкций и при изготовлении верхнего покрытия полов в помещениях производственного назначения АО "Мордовспецстрой" путем нанесения антикоррозионного полимерного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.* Исследование накопления солей в наружных ограждающих конструкциях зданий промышленных предприятий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 2. С. 193...200.

2. *Желдаков Д.Ю., Гагарин В.Г.* Терминология и общая теория прогнозирования предельной долговечности конструкций // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2. С.114...118.

3. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.* Изменение влажности и теплопроводности строительных материалов при наличии в их составе солей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С. 18...27.

4. *Прошкина О.Г.* Разработка полимерных композитов на основе наномодифицированных полиэфиракрилатных смол // Актуальные вопросы архитектуры и строительства, Саранск, 23–24 декабря 2020 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2020. С. 352...355.

5. *Ivlev V.I., Sigachyov A.F., Fomin N.E., Yudin V.A.* Relaxation in resins with low-frequency mechanical cycling // Materials Physics and Mechanics. – Vol. 32, 2017. P. 207...212. DOI:10.18720/MPM.3222017-13.

6. *Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V.* The study of species composition of the microflora, selected surface samples proliferation composites in humid maritime climate // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. – №698(2), 2019. P. 022082. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022082.

7. *Pargi M.N.F., Teh P.L., Hussiensyah S., Yeoh C.K., Ghani. S.A.* Recycled-copper-filled epoxy composites: the effect of mixed particle size // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – №10, 2015. 3. <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0030-2>.

8. *Wong D.W.Y., Lin L., McGrail P.T., Peijs T., Hogg P.J.* Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres // Composites Part A // Applied Science and Manufacturing. – №41(6), 2010. P.759...767. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.008>.

9. *Луйв Э.Х., Машегуров А.Д., Роиз Л.Е.* Экспресс-метод определения реологических свойств полимерных материалов. – М.: Экспресс-информация ВНИИЭСМ 1983. Серия № 6.

10. *Qiu Y., Wu D., Xie W., Wang Z., Peng S.* Thermoplastic polyester elastomer composites containing two types of filler particles with different dimensions: Structure design and mechanical property control // Composite Structures. – №197(1), 2018. P. 21...27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.035>.

11. *Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V.* Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 972 (2020) 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.

12. *Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Moiseev V.V., Zotkina M.M., Afonin V.V., Podzhivotov N.Y.* Study of the Behavior of Cement Composites in the Conditions of Cyclic Exposure Positive and Negative Temperatures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures, SPCECI 2019. 19 Mira Street, Ekaterinburg, – 2020. P. 012052. DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012052.

13. *Afonin V.V., Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Kondrashchenko V.I.* Decision-making on quality composition materials exposed to temperature differences // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, TRANSBUD. Feuerbach square 7, Kharkiv: Institute of Physics Publishing. – 2019. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/708/1/012077.

14. *Петренко В.И., Макаrchuk М.В.* Исследование прочностных характеристик образцов из полилактида, выполненных по аддитивной технологии // Мат. XI Междунар. научн.-инновационной молодежной конф.: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. – Тамбов, 31 октября – 01 ноября 2019 г. – Тамбов. – 2019. С. 96...97.

15. Ivlev V.I., Sigachev A.F., Yudin V.A. Stress Relaxation and Creep of Materials Based on Epoxy Resin with a Filler from Hemp Fibers. *Inorganic Materials: Applied Research*. – Vol. 11, №4, 2020. P. 915...918. DOI:10.1134/S2075113320040152.

16. Bakai A.S. Heterophase fluctuations at the gas-liquid phase transition // *Condensed Matter Physics*. NSC Kharkiv Institute of Physics&Technology, Kharkiv. – 2015. P. 40.

REFERENCES

1. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Investigation of salt accumulation in the external enclosing structures of buildings of industrial enterprises // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 2. S. 193 ... 200.

2. Zheldakov D.Yu., Gagarin V.G. Terminology and general theory of predicting the ultimate durability of structures // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2017, No. 2. P. 114 ... 118.

3. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Change in humidity and thermal conductivity of building materials in the presence of salts in their composition // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2020, No. 4. S. 18 ... 27.

4. Proshkina O.G. Development of polymer composites based on nanomodified polyester acrylate resins // *Actual issues of architecture and construction, Saransk, December 23–24, 2020*. - Saransk: National Research Mordovian State University named after. N.P. Ogareva, 2020. S. 352...355.

5. Ivlev V.I., Sigachyov A.F., Fomin N.E., Yudin V.A. Relaxation in resins with low-frequency mechanical cycling // *Materials Physics and Mechanics*. – Vol. 32, 2017. P. 207...212. DOI:10.18720/MPM.3222017-13.

6. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the microflora, selected surface samples proliferation composites in humid maritime climate // *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. – №698(2), 2019. P. 022082. DOI:10.1088/1757-899X/698/2/022082.

7. Pargi M.N.F., Teh P.L., Hussiensyah S., Yeoh C.K., Ghani. S.A. Recycled-copper-filled epoxy composites: the effect of mixed particle size // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – №10, 2015. 3. <https://doi.org/10.1186/s40712-015-0030-2>.

8. Wong D.W.Y., Lin L., McGrail P.T., Peijs T., Hogg P.J. Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres // *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing*. – №41(6), 2010. P.759...767. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.008>.

9. Liiv E.Kh., Mashegirov A.D., Roiz L.E. Express method for determining the rheological properties of polymeric materials. - М.: Express information VNIIESM 1983. Series No. 6.

10. Qiu Y., Wu D., Xie W., Wang Z., Peng S. Thermoplastic polyester elastomer composites containing two types of filler particles with different dimensions: Structure design and mechanical property control // *Composite Structures*. – №197(1), 2018. P. 21...27. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.035>.

11. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V. Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // *International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation*. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 972 (2020) 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.

12. Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Moiseev V.V., Zotkina M.M., Afonin V.V., Podzhivotov N.Y. Study of the Behavior of Cement Composites in the Conditions of Cyclic Exposure Positive and Negative Temperatures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures, SPCECI 2019. 19 Mira Street, Ekaterinburg, – 2020. P. 012052. DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012052*.

13. Afonin V.V., Erofeeva I.V., Emelyanov D.V., Fedortsov V.A., Kondrashchenko V.I. Decision-making on quality composition materials exposed to temperature differences // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings, TRANSBUD. Feuerbach square 7, Kharkiv: Institute of Physics Publishing. – 2019. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/708/1/012077*.

14. Petrenko V.I., Makarchuk M.V. Investigation of the strength characteristics of polylactide samples made using additive technology // *Mat. XI Intern. scientific-innovative youth conference: Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovative management. - Tambov, October 31 - November 01, 2019 - Tambov. – 2019. S. 96...97*.

15. Ivlev V.I., Sigachev A.F., Yudin V.A. Stress Relaxation and Creep of Materials Based on Epoxy Resin with a Filler from Hemp Fibers. *Inorganic Materials: Applied Research*. – Vol. 11, №4, 2020. P. 915...918. DOI:10.1134/S2075113320040152.

16. Bakai A.S. Heterophase fluctuations at the gas-liquid phase transition // *Condensed Matter Physics*. NSC Kharkiv Institute of Physics&Technology, Kharkiv. – 2015. P. 40.

Рекомендована кафедрой строительных материалов и технологий архитектурно-строительного факультета МГУ им. Н.П. Огарева. Поступила 22.12.21.

**О ВЫХОДЕ КАРБОНИЗОВАННЫХ ОСТАТКОВ
ПРИ ГЛУБОКОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВОЛОКОН-КОМПОЗИТОВ,
НАПОЛНЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ**

**ABOUT THE OUTPUT OF CARBONIZED RESIDUES
IN DEEP HEAT TREATMENT OF COMPOSITE FIBERS
FILLED WITH CARBON BLACK**

*В.В. МАРЦЕНИУК, Н.С. ЛУКИЧЕВА, Н.В. ДИАНКИНА, Д.А. ПЕТРОВА,
О.В. АСТАШКИНА, А.А. ЛЫСЕНКО*

*V.V. MARTSENYUK, N.S. LUKICHEVA, N.V. DIANKINA, D.A. PETROVA,
O.V. ASTASHKINA, A.A. LYSSSENKO*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: nvkm-stud@yandex.ru

Выход карбонизованного остатка (ВКО) – остатки твердого высокоуглеродистого вещества, полученного после высокотемпературной обработки полимеров (карбонизация и графитация). ВКО является важным критерием эффективности использования полимеров для производства углеродных волокон. Как методико-теоретически и практически правильно оценить ВКО с учетом содержания в исходных полимерных волокнах-прекурсорах примесей и специальных добавок, способных действовать на механизмы высокотемпературных обработок исходных волокон, так и влияние ВКО на свойства конечных продуктов (углеродных волокон) является актуальной задачей. В статье представлены результаты исследования воздействия технического углерода и углеродных нанотрубок в полимерных композитах, волокнах и пленках на ВКО. Показано, что теоретический ВКО отличается от практического выхода. Так, для гидратцеллюлозы, полиакрилонитрила и полиоксидадиазола введение технического углерода или углеродных нанотрубок увеличивает этот показатель. Особенно отчетливо этот эффект проявляется в случае использования полиакрилонитрила. Рассмотрен химический состав поверхности углеродного нанонаполнителя и предложено теоретическое обоснование взаимодействия наполнителя и полимерной матрицы в процессе высокотемпературной обработки.

The output of carbonized residue (OCR) is the residue of a solid high-carbon substance obtained after high-temperature processing of polymers (carbonization and graphitization). OCR is an important touchstone of efficiency of polymers used for the production of carbon fibers. It is the urgent problem to evaluate the OCR methodically, theoretically and practically correctly, taking into account the content of impurities and special additives in the initial polymer fibers-precursors, capable of acting on the mechanisms of high-temperature processing of the initial fibers, and the influence of OCR on the properties of the final products (carbon fibers). The article presents the study results of the effect of carbon black and carbon nanotubes in polymer composites, fibers and films on OCR. It is shown that the theoretical OCR differs from the practical one. So, for cellulose hydrate, polyacrylonitrile and polyoxadiazole, the introduction of carbon black or carbon nanotubes increases

this indicator. This effect is especially pronounced in the case of using polyacrylonitrile. The chemical composition of the carbon nanofiller surface is considered and a theoretical substantiation of the interaction of the filler and the polymer matrix in the process of high-temperature treatment is proposed.

Ключевые слова: выход карбонизованного остатка, волокна-композиты, гидратцеллюлоза, полиакрилонитрил, полиоксадиазол, углеродное волокно, технический углерод, термообработка, полимерные композиционные материалы.

Keywords: output of carbonized residue, composite fibers, hydrate cellulose, polyacrylonitrile, polyoxadiazole, carbon fiber, carbon black, heat treatment, polymer composite materials.

Вопросы, связанные с образованием и особенно с выходом (то есть количеством) карбонизованного остатка (ВКО) обсуждались и, по-видимому, будут обсуждаться еще не раз. Вместе с тем, для некоторых полимеров и полимерных систем, в частности для полимерных пленок и волокон, модифицированных нано- и микродобавками, вопросы, связанные с выходом карбонизованного остатка, изучены недостаточно.

Теоретическое (расчетное) содержание углерода в различных полимерах и практический выход карбонизованного остатка

широко представлены в работах [1...3]. Ниже, в табл. 1 (содержание углерода и выход карбонизованного остатка при карбонизации полимерных материалов при конечной температуре термообработки 800...900°C) и табл. 2 (эффективность карбонизации различных полимерных волокон-прекурсоров) приведены данные, характеризующие выход карбонизованных остатков у различных волокнообразующих полимеров [4...10].

Т а б л и ц а 1

Полимерный материал	Содержание углерода, %	Выход карбонизованного остатка*, %	Примечания
Фенолформальдегидные смолы	76...78	56...58	Нагрев без стабилизации
Эпоксидные смолы	74...76	50...52	Нагрев без стабилизации
Полибензимидазол	96	73	
Поли(о-фениленбутадиинилен)	97	96	Медленный нагрев
Полиимиды	70...76	32...48	Нагрев без термостабилизации
Полиоксадиазолы	65...68	43...48	Нагрев без выдержки
Полиакрилонитрил	68	23...36	Без стабилизации
Полиэтилен	86	1...2	Без стабилизации
Полипропилен	86	1...2	Без стабилизации
Полистирол	92	28...32	Без стабилизации
Целлюлоза	44...45	16...18	Пиролиз без добавок

П р и м е ч а н и е. * В некоторых исследованиях выход карбонизованного остатка называют выходом углеродного остатка, что, на наш взгляд, ошибочно.

В исследованиях, проведенных сотрудниками кафедры наноструктурных, волокнистых и композиционных материалов под руководством профессора А.А. Лысенко показано, что выход карбонизованного остатка при глубокой термообработке полимеров зависит от таких факторов, как: исходное содержание углерода в полимере,

конечная температура термообработки (КТТО), содержание примесей в полимерных материалах (например, зольности), скорость подъема температуры в процессе термообработки, вид и количество использованных пиролитических добавок [11...15]. Следует отметить, как это показано в табл. 1, что содержание углерода (то есть

теоретически возможный ВКО) всегда остается выше количества получаемого угольного остатка и, тем более, для образ-

цов, прошедших термообработку при 2000...3000°C.

Т а б л и ц а 2

Полимерные волокна	Содержание углерода по данным элементного анализа	Выход карбонизованного остатка, %		Особенности технологии
		без использования специальных приемов	с использованием добавок и дополнительных обработок	
Полиакрилонитрил (сополимеры)	63...65	48...52 после термостабилизации	57...60, фосфоросодержащие соединения	Требуется предокисление, обработка NaOH, радиационное облучение
Гидратцеллюлозные волокна	42...44	18...22	35...40, неорганические добавки пиролиза	Не нуждается в предокислении
Фенолформальдегидная смола (Kynol)	78...80	58...60	60...65, использование фосфорорганических соединений	Требуется предварительная полимеризация
Nomex	70...76	52...53	62...63, предварительная обработка H ₃ PO ₄	Нуждается в предокислении
Kevlar	70...76	34...40	50, изостатический нагрев	Нуждается в предокислении
Полистирол	86...90	16...18	возможно получение волокон	Требуют специальной обработки
Полиоксадиазол	65...68	48...50	57, использование добавок	Не нуждается в предокислении
Поливинилхлорид	38...39	1...2	35...36, предварительное дегидрохлорирование	Требуется стабилизация

Говоря о выходе карбонизованных остатков полимеров, необходимо учитывать состав такого остатка, так как ВКО

(масса) складывается из суммы остатков веществ, входивших в его состав до термообработки.

$$\text{ВКО} = \text{выход углерода} + \text{остатки примесей} + \text{остатки модифицирующих веществ}$$

Так, например, если с целью увеличения выхода углерода гидратцеллюлозные (ГЦ) волокна обрабатывать раствором NH₄Cl, то при термообработке выше 320°C эта соль аммония разложится и улетучится вместе с газами пиролиза, выполнив при этом функцию водоотщепляющего агента, а выход углеродного остатка составит 24...30%. Вместе с тем, если в качестве агента пиролиза взять аммиакат фосфорной кислоты, то при термообработке эта соль разложится с выделением NH₃, а вот остаток фосфорной кислоты, как это показано в работе [11], сохранится. При этом ВКО будет значительно больше и может достигать 36...40% в зависимости от КТТО. И, конечно, следует учитывать остаточное количество солей золь-

ности, содержание которых в гидратцеллюлозных волокнах может составлять от 1 до 0,1% при КТТО 900 и 2250°C соответственно.

Одним из современных методов физической модификации полимеров и полимерных волокон является модификация за счет введения в их структуру нано- и микродобавок [16]. Справедливости ради следует отметить, что даже при введении в полимерные матрицы дисперсий, которые с ними не взаимодействуют химически (например, композитные волокна из полипропилена, наполненные дисперсией фторопласта [17]), такую модификацию нельзя считать исключительно физической.

Достаточно рельефно взаимодействие между матрицей и наполнителем проявляется в случае глубокой термообработки аналогичных композитов с наполнителями в виде металлов, оксидов, углеродных нанотрубок (УНТ), технического углерода (ТУ). Особенно интересно введение углеродных нанодисперсий в полимерные, впоследствии карбонизируемые, волокна или пленки [15], [18], [19].

Рассмотрим волокно-композит, состоящий на 80 % из гидратцеллюлозы и на 20% из такого дешевого наполнителя, как ТУ. Теоретически мы можем ожидать увеличения выхода карбонизованного остатка. При карбонизации гидратцеллюлозы ВКО (без использования специальных добавок, при КТТО 800...900°С) составит 16...18% (табл. 1). При этом ТУ, получаемый при температурах 800...900°С, терять массу не должен. Таким образом, если взять волокна только из ГЦ, то из 100 г таких волокон получим 16...18 г углеродного волокна. В случае композитного гидратцеллюлозного волокна, наполненного ТУ, возможно (теоре-

тически) получить ВКО до 34%. Вышесказанное проиллюстрировано на рис. 1 (схема, поясняющая получение УВ с высоким ВКО).



Рис. 1

На практике все оказалось значительно сложнее, но и интереснее. В табл. 3 (экспериментальные данные, характеризующие ВКО при различных КТТО) приведены данные, характеризующие выход карбонизованного остатка пленочных композитов из гидратцеллюлозы, полиакрилонитрила (ПАН) и полиоксадиазола (ПОД), наполненных ТУ в количестве 10, 20 и 30 масс.% и прошедших термообработку при различных КТТО в среде азота.

Т а б л и ц а 3

Полимер	Содержание ТУ в композитной пленке, масс. %	Выход карбонизованного остатка (%) при различных КТТО		
		400°С	600°С	800°С
ГЦ	10	40	34	27
	20	48	37	31
	30	52	39	35
ПАН	10	71	58	58
	20	71	65	65
	30	75	68	67
ПОД	10	86	43	43
	20	86	48	48
	30	87	54	52

Результаты экспериментов свидетельствуют о следующем:

- для всех композитов с увеличением количества ТУ в их структуре ВКО увеличивается;

- выход карбонизованного остатка снижается с увеличением КТТО, что, впрочем, вполне закономерно;

- наибольшее снижение массы карбонизованного остатка наблюдается у пленок на основе ГЦ, в меньшей степени у компози-

тов на основе ПОД и еще меньше у композитов на основе ПАН;

- влияние КТТО на массу карбонизованного остатка при температурах 600 и 800°С для пленок-композитов из ПОД и ПАН практически не проявляется. Это может указывать на то, что процессы термодеструкции у этих композитов в большей степени завершены, чем у ГЦ.

Таким образом, по этой серии экспериментов можно заключить (сравнивая с дан-

ными табл. 2), что введение ТУ в структуру полимеров существенным образом влияет на процессы карбонизации, приводя к повышению ВКО. Экспериментальные данные по карбонизации волокон-композитов с содержанием ТУ 20 масс.% в среде азота

и КТТО 800°C приведены в табл. 4 (выход карбонизованного остатка для волокон-композитов на основе различных полимеров).

Т а б л и ц а 4

Полимер	Выход карбонизованного остатка, %		Примечание
	теоретический	экспериментальный	
ГЦ	33...34	29...30	без использования добавок пиролиза
ПАН	63...65	63...65	без термостабилизации
ПОД	65...68	48...50	без термостабилизации и использования добавок пиролиза

Вместе с тем, приведенные результаты исследований показывают:

- для волокон из ГЦ расчетный выход должен был составить 33...34%, а экспериментально ВКО достиг лишь 29...30%, то есть на 4% меньше ожидаемого значения;

- расчеты показывают, что для ПАН-волокон ВКО может составить 63...65%, и эксперименты показали выход также 63...65%, то есть потери массы волокна нет;

- для волокон из ПОД теоретический выход карбонизованного остатка может составлять 68...70%, а по данным эксперимента ВКО составляет 48...50%, то есть на 20% меньше расчетных значений.

На первый взгляд, полученные результаты кажутся малообъяснимыми и противоречивыми. Не понятно, каким образом введение в полимер технического углерода влияет на ВКО при термообработках. С одной стороны, модификация ГЦ, ПАН и ПОД путем введения в их структуру ТУ приводит к заметному увеличению ВКО, но с другой – расчетные значения выхода карбонизованного остатка для ГЦ и ПОД волокон не достигаются. Еще более удивительными кажутся результаты, полученные при термообработке композитов на основе ПАН. ВКО увеличивается и довольно существенно – на 8...12%. Как можно объяснить выявленные особенности карбонизации исследованных полимеров?

С использованием метода рентгенофотозлектронной спектроскопии (РФЭС) нами показано [12], что частицы ТУ содержат на своей поверхности до 1,5 ат.% кислорода в виде различных кислородсодержа-

щих групп, которые способны отщепляться, унося с собой часть атомов углерода, что проиллюстрировано на рис. 2 (кислородсодержащие группы на поверхности углерода, температуры их отщепления и продукты, образующиеся при этом [20]).

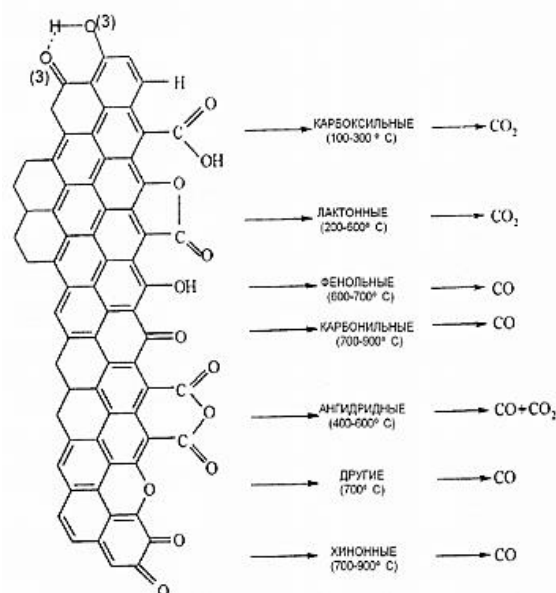


Рис. 2

Эксперименты по термообработке ТУ в среде азота при температурах 800...900°C показали потерю массы этого наполнителя до 10%.

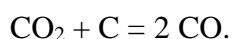
С учетом вышеприведенных данных теоретический ВКО для композитных волокон должен составлять:

- на основе ГЦ – 31...32%;
- на основе ПАН – 61...66%;
- на основе ПОД – 63...65%.

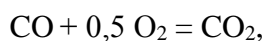
Вместе с тем, сравнение с данными табл. 4 показывает расхождение расчетных значений ВКО и экспериментальных. Особый интерес вызывают результаты карбонизации волокон и пленок на основе ПАН, где значения ВКО в экспериментах равны теоретическим значениям.

С целью объяснения экспериментальных данных по карбонизации композитов на основе ГЦ и ПОД нами высказано предположение о том, что ТУ, введенный в эти полимеры, оказывает деструктирующее действие на молекулы гидратцеллюлозы и полиоксидазола за счет отщепления кислорода при глубокой термообработке. Это может происходить не только при прямом воздействии атомов кислорода на макромолекулы целлюлозы, но и за счет взаимодействия СО и/или СО₂ (продуктов разложения ТУ), которые являются активирующими агентами, с молекулами ГЦ и ПОД [21].

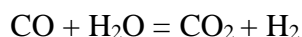
Взаимодействие СО₂ с углеродом можно выразить реакцией:



Монооксид углерода при взаимодействии с кислородом:



и/или с водой:



образует СО₂, который и далее окисляет углерод. В результате убыль массы карбонизованного остатка возрастает.

Полиакрилонитрильная матрица реагирует на отщепляющийся от ТУ кислород совсем иначе. Известно [22], что в технологии получения УВ из ПАН необходимо до карбонизации проводить термоокислительную стабилизацию, а кислород является одним из сшивающих агентов. При этом ВКО у термостабилизированных ПАН волокон существенно выше, чем у не сшитых и достигает, по данным работ [1], [11], 52% (против 23...36% для нестабилизированного ПАН) (табл. 1 и 2).

Проведенные исследования и их теоретическое обоснование позволяют утверждать, что получение УВ из волокон-композитов, содержащих в качестве модификатора технический углерод, является перспективным, так как при этом:

- "экономится" матричный полимер – гидратцеллюлоза, полиакрилонитрил, полиоксидазол или другие полимеры-прекурсоры;

- увеличивается выход карбонизованного остатка даже без использования дополнительных обработок и добавок.

Рассматривая практические аспекты работы, следует также отметить:

- необходимость использования в качестве наполнителя не просто высушенный ТУ, но и в обязательном порядке прошедший термообработку при температурах выше 900 °С, что позволит удалить кислород с его поверхности заранее и повысить ВКО;

- перспективность получения из волокон-композитов активированных УВ [23].

С научной точки зрения важно продолжение исследований в этом направлении, так как они вносят существенный вклад в развитие теоретических представлений о процессах деструкции и карбонизации полимеров.

В Ы В О Д Ы

1). Разработан способ модификации полимерных волокон и пленок, путем введения в них технического углерода;

2). Показано, что для композитных волокон и пленок на основе гидратцеллюлозы, полиакрилонитрила и полиоксидазола введение в их структуру технического углерода приводит к увеличению выхода карбонизованного остатка, то есть в конечном итоге, выхода готового продукта – углеродного волокна;

3) Предложено теоретическое обоснование повышения выхода карбонизованного остатка в случае использования гидратцеллюлозных, полиакрилонитрильных и полиоксидазольных полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Грибанов А.В.* Карбонизация полигетероариленов: Структура конечных и промежуточных продуктов: Дис. ... докт. хим. наук. – СПб., 2001.
2. *Goodhew P.J., Clarke A.J., Bailey J.E.* A review of the fabrication and properties of carbon fibres // *Materials Science and Engineering*. – Vol. 17, Is. 1, 1975. P. 3...30.
3. *Huang X.* Fabrication and Properties of Carbon Fibers // *Materials*. – 2009. – № 2. – P. 2369...2403.
4. *Hayes J.S.* Novoloid and Related Fibers Today // *Nonwoven Symposium, Geneva, 20–24 Apr. 2004*. – 2004. P. 257...263.
5. *Abdallah M.G.* Low Cost Carbon Fiber (LCCF) Development Program for Automotive Applications // *Carbon Fibers*. – 2002 : Materials of International Conference, Raleigh, NC (USA), 21-23 Octob. 2002. – 2002. P. 56...59.
6. *Ko K.S.* Preparation of Kevlar – derived Carbon Fibers and their Anodic Performances in Li Secondary Batteries // *Carbon*. – Vol. 39, 2001. P. 1619...1625.
7. *You S.Y., Park S.H.* Preparation and Properties of Activated Carbon Fabric from Acrylic Fabric Waste // *Carbon*. – Vol. 38, 2000. P. 1453...1460.
8. *Armistead J.P., Keller T.M., Sastri S.B.* Structure and Property Changes during Pyrolyses an acetyleneterminated Resin // *Carbon*. – Vol. 32, 1994. P. 345...348.
9. *Kijima M.* Poly(phenylenebutadiynylene)s as an Afficient Carbonizing Precursor // *Carbon*. – Vol. 39, 2001. P. 287...300.
10. *Imamura R.* Steam Activation of Phosphrous – Containing Phenolic Resin-based Carbon Fiber // *Carbon*. – Vol. 40, 2004. P. 1243...1245.
11. *Лысенко А.А.* Основы ресурсосберегающих технологий получения активированных углеродных волокон, их свойства и применение: Дис. ... докт. техн. наук. – СПб., 2007. С. 39...91.
12. *Михалчан А.А.* Разработка композитов на основе поливинилиденфторида, наполненного углеродными наночастицами: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011. С. 63...104.
13. *Сазанов Ю.Н., Лысенко В.А., Сальникова П.Ю.* Влияние углеродных наноструктур на карбонизацию полиакрилонитрила // *Журнал прикладной химии*. – 2013. Т. 86, № 9. С. 1443...1449.
14. *Сальникова П.Ю., Житенева Лысенко В.А.* Термические свойства полиакрилонитрильных волокон, модифицированных наночастицами углерода // *Вестник СПГУТД*. – 2010, № 4(22). С. 8...12.
15. *Петрова Д.А.* Получение и исследование свойств волокон-композитов на основе полиакрилонитрила, наполненных углеродными нанотрубками: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2016. С. 57...124.
16. *Peter W.R., Beaumont, Carl H., Zweben.* Comprehensive Composite Material II // Elsevier Ltd. – 2018.
17. *Пророкова Н.П.* Модифицирование синтетических волокнистых материалов с использованием фторполимеров (обзор) // *Полимерные материалы*. – 2017, № 2. С. 6...17.

18. *Сальникова П.Ю.* Разработка и исследование свойств электропроводящих углеродных волокон и композитов: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2014. С. 54...106.

19. *Young-Wan Ju, Gyoung-Rin Choi, Hong-Ryun Jung, Wan-Jin Lee* Electrochemical properties of electrospun PAN/MWNT carbon nanofibers electrodes coated with polypyrrole // *Electrochimica Acta*. – № 53, 2008. P. 5796...5803.

20. *Тарковская И.А.* Сорбция ртути, родия и палладия материалами на основе природных углей // *Журнал физической химии*. – 1996. Т. 70, № 8. С. 1463...1467.

21. *Ryu S., Jin H., Gondy D., Puset N., Ehrburger P.* Activation of carbon fibers by steam and carbon dioxide // *Carbon*. – Vol. 7, 1993. P. 841842.

22. *Конкин А.А.* Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. – М.: Химия, 1974.

23. *Русова Н.В., Асташкина О.В., Лысенко А.А., Каширский Д.А.* Модифицированные волокна из полиоксадиазола и активированные углеродные волокна на их основе // VII Междунар. конф.: Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология ("Композит-2016"), 28–30 июня 2016 г. тезисы докладов. – Энгельс, 2016. С. 246...252.

REFERENCES

1. *Gribanov A.V.* Carbonization of polyheteroarylenes: Structure of final and intermediate products: Cand. ... doc. chem. Sciences. - SPb., 2001.
2. *Goodhew P.J., Clarke A.J., Bailey J.E.* A review of the fabrication and properties of carbon fibres // *Materials Science and Engineering*. – Vol. 17, Is. 1, 1975. P. 3...30.
3. *Huang X.* Fabrication and Properties of Carbon Fibers // *Materials*. – 2009. – № 2. – P. 2369...2403.
4. *Hayes J.S.* Novoloid and Related Fibers Today // *Nonwoven Symposium, Geneva, 20–24 Apr. 2004*. – 2004. P. 257...263.
5. *Abdallah M.G.* Low Cost Carbon Fiber (LCCF) Development Program for Automotive Applications // *Carbon Fibers*. – 2002 : Materials of International Conference, Raleigh, NC (USA), 21-23 Octob. 2002. – 2002. R. 56...59.
6. *Ko K.S.* Preparation of Kevlar – derived Carbon Fibers and their Anodic Performances in Li Secondary Batteries // *Carbon*. – Vol. 39, 2001. P. 1619...1625.
7. *You S.Y., Park S.H.* Preparation and Properties of Activated Carbon Fabric from Acrylic Fabric Waste // *Carbon*. – Vol. 38, 2000. P. 1453...1460.
8. *Armistead J.P., Keller T.M., Sastri S.B.* Structure and Property Changes during Pyrolyses an acetylene-terminated Resin // *Carbon*. – Vol. 32, 1994. P. 345...348.
9. *Kijima M.* Poly(phenylenebutadiynylene)s as an Afficient Carbonizing Precursor // *Carbon*. – Vol. 39, 2001. P. 287...300.

10. Imamura R. Steam Activation of Phosphorous – Containing Phenolic Resin-based Carbon Fiber // Carbon. – Vol. 40, 2004. P. 1243...1245.
11. Lysenko A.A. Fundamentals of resource-saving technologies for obtaining activated carbon fibers, their properties and application: Dis. ... doc. tech. Sciences. - SPb., 2007. S. 39 ... 91.
12. Mikhanchan A.A. Development of composites based on polyvinylidene fluoride filled with carbon nanoparticles: Dis. ... cand. tech. Sciences. - St. Petersburg, 2011. S. 63 ... 104.
13. Sazanov Yu.N., Lysenko V.A., Salnikova P.Yu. Influence of carbon nanostructures on the carbonization of polyacrylonitrile // Journal of Applied Chemistry. – 2013. V. 86, No. 9. S. 1443...1449.
14. Salnikova P.Yu., Zhiteneva Lysenko V.A. Thermal properties of polyacrylonitrile fibers modified with carbon nanoparticles // Vestnik SPGUTD. – 2010, No. 4(22). pp. 8...12.
15. Petrova D.A. Preparation and study of the properties of fiber-composites based on polyacrylonitrile filled with carbon nanotubes: Cand. ...cand. tech. nauk.– St. Petersburg, 2016. S. 57...124.
16. Peter W.R. Beaumont, Carl H. Zweben. Comprehensive Composite Material II // Elsevier Ltd. – 2018.
17. Prorokova N.P. Modification of synthetic fibrous materials using fluoropolymers (review) // Polymer Materials. - 2017, No. 2. S. 6 ... 17.
18. Salnikova P.Yu. Development and study of the properties of electrically conductive carbon fibers and composites: Dis. ... cand. tech. Sciences. - St. Petersburg, 2014. S. 54 ... 106.
19. Young-Wan Ju, Gyoung-Rin Choi, Hong-Ryun Jung, Wan-Jin Lee Electrochemical properties of electrospun PAN/MWNT carbon nanofibers electrodes coated with polypyrrole, Electrochimica Acta. - No. 53, 2008. R. 5796 ... 5803.
20. Tarkovskaya I.A. Sorption of mercury, rhodium and palladium by materials based on natural coals // Journal of Physical Chemistry. –1996. T. 70, No. 8. S. 1463...1467.
21. Ryu S., Jin H., Gony D., Pusset N., Ehrburger P. Activation of carbon fibers by steam and carbon dioxide // Carbon. – Vol. 7, 1993. P. 841842.
22. Konkin A.A. Carbon and other heat-resistant fibrous materials. - M.: Chemistry, 1974.
23. Rusova N.V., Astashkina O.V., Lysenko A.A., Kashirsky D.A. Modified fibers from polyoxadiazole and activated carbon fibers based on them // VII Intern. Conf.: Promising polymeric composite materials. Alternative technologies. Recycling. Application. Ecology ("Composite-2016"), June 28–30, 2016 abstracts. – Engels, 2016. S. 246...252.

Рекомендована кафедрой наноструктурных, волоконистых и композиционных материалов. Поступила 28.12.21.

УДК 641. 1.

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_327

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАУБАБА (КАЗАХСТАН)
ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ**

**PROSPECTS FOR THE USE OF NATURAL ZEOLITE
FROM THE DAUBABA DEPOSIT (KAZAKHSTAN)
FOR FILLING POLYMERS**

*Г.Ф. САГИТОВА, В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Т.У. ТОГАТАЕВ,
А.С. САДЫРБАЕВА, Ж.К. ШУХАНОВА, З.А. ЕМКУЛОВА*

*G.F. SAGITOVA, V.M. JANPAIZOVA, T.U. TOGATAEV,
A.S. SADYRBAYEVA, ZH.K. SHUKHANOVA, Z.A. EMKULOVA*

(Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)

(M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan)

E-mail: guzalita.f1978@mail.ru

В данной работе исследовано влияние введения различных модификаторов для регулирования функциональных свойств полимерных композиционных материалов. В качестве модификаторов часто используют природные

и синтетические цеолиты, так как известно, что введение цеолитов в полимер улучшает функциональные свойства полимерных композиционных материалов. Однако при выборе ингредиентов для эластомерных композиций необходимо учитывать не только их стоимость, но и экологическую безопасность. Результаты научных исследований позволили определить рецептуру и технологию приготовления резиновых смесей с использованием модифицированного цеолита Даубабинского месторождения. Выявлено влияние дисперсности цеолита на эксплуатационные свойства резиновых смесей и резин. В ходе эксперимента установлено, что при оптимальном содержании модифицированного цеолита, 15 масс.ч. на 100 масс. ч. каучука, при размере частиц 5...25 мкр полученные резиновые смеси по пластозластическим свойствам соответствуют нормам контроля. Кроме того, после термического старения замена каолина на цеолит практически не влияет на изменение относительного удлинения.

In this paper, the effect of the introduction of various modifiers for regulating the functional properties of polymer composite materials is studied. Natural and synthetic zeolites are often used as modifiers, since the introduction of zeolites into the polymer improves the functional properties of polymer composite materials. However, when choosing ingredients for elastomeric compositions, it is necessary to take into account not only their cost, but also environmental safety. The results of scientific research made it possible to determine the recipe and technology for preparing rubber mixtures using modified zeolite from the Daubabinsky deposit. The influence of the dispersion of zeolite on the operational properties of rubber mixtures and rubbers is revealed. During the experiment, it was found that at the optimal content of modified zeolite, 15 wt. h. per 100 wt. parts of rubber, with a particle size of 5...25 microns. the obtained rubber mixtures according to the plastoelastic properties comply with the control standards. In addition, after thermal aging, the replacement of kaolin with zeolite practically does not affect the change in elongation.

Ключевые слова: наполнитель, резина, цеолит, каолин, каучук, резиновая смесь, эластомерные композиции, дисперсность, эксплуатационные свойства.

Keywords: filler, rubber, zeolite, kaolin, rubber, rubber mixture, elastomeric compositions, dispersion, operational properties.

Введение

Технология создания полимерных композиционных материалов предполагает введение в качестве наполнителей структурно-активных добавок, обладающих развитой удельной поверхностью. Такой прием позволяет регулировать функциональные свойства композиций для эксплуатации в различных условиях, в том числе при экстремально низких температурах. В качестве модификаторов различных полимерных матриц часто используют слоистые и каркасные природные минералы, включая природные и синтетические цеолиты.

Структурной единицей цеолита является кремне- или алюмоокислородный тетраэдр, у которого вершина (атом кислорода) является общей для двух других тетраэдров. Такая система алюмокремнеокислородных тетраэдров образует каркас с развитой системой пор и каналов, которая обуславливает развитую удельную микропористость цеолитов. Этим оправдана привлекательность их использования в качестве наполнителей полимеров [1].

Одним из способов улучшения свойств полимеров является их наполнение структурно-активными добавками, добавление

которых обеспечивает формирование заданной фазовой и надмолекулярной структуры матрицы. В настоящее время в качестве модификаторов различных полимерных матриц (политетрафторэ-тилен, полиэтилены, полиэфирные смолы, резины и т.д.) часто используют слоистые и каркасные природные минералы, в том числе природные и синтетические цеолиты. Известно, что введение цеолитов в полимер улучшает функциональные свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ). В работе [2] показано улучшение прочностных характеристик эпоксидного материала на 43 % при введении в качестве модификатора цеолита природного происхождения. Для усиления адгезионного взаимодействия на границе "полимер – наполнитель", приводящего к существенному изменению структурной организации гетерогенной системы, используют различные технологические приемы. Например, механохимическая активация наполнителя позволяет увеличить удельную поверхность частиц в 1,5...2 раза [3].

Известно [4...6], [8], что резина является сложной многокомпонентной системой, состоящей из 10...15 и более ингредиентов. В настоящее время ассортимент ингредиентов для эластомерных композиций насчитывает несколько сотен наименований, поэтому возникают проблемы рационального выбора требуемых ингредиентов с учетом не только их стоимости, но и экологической безопасности. При разработке рецепта необходимо также учитывать способы приготовления композиции, их вулканизации. Разрабатываемый рецепт должен обеспечивать эксплуатационные свойства изделий, и

при этом композиция должна хорошо перерабатываться на технологическом оборудовании. Для выполнения этих требований необходимо знать достоинства и недостатки применяемого сырья и материалов, предвидеть, как будут взаимодействовать те или иные ингредиенты при их совместном присутствии в композиции [10], [11].

Методы

Результаты научных исследований, проводимых на кафедре нефтепереработки и нефтехимии в течение ряда лет, по поиску эффективных наполнителей для резиновых смесей показали эффективность их применения, положительное влияние на технологические и эксплуатационные свойства полученных резиновых смесей и вулканизатов. К настоящему моменту определены принципы построения рецептур и технологии приготовления резиновых смесей с использованием модифицированного цеолита Даубабинского месторождения. Однако представляет интерес исследование влияния дисперсности минерала цеолит на свойства резиновых смесей и резин [7], [9], [12].

С целью выявления влияния дисперсности цеолита на эксплуатационные свойства резин для исследования был взят рецепт стандартной резиновой смеси на основе каучука СКИ-3 для изготовления брызговикиков.

В данной работе были проведены исследования влияния дисперсности цеолита Даубабинского месторождения на свойства резин. Рецепт резиновой смеси для изготовления брызговикиков приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование ингредиентов	Масс.частей на 100 масс.частей каучука	Массовые %
Каучук СКИ-3	100,0	42,19
Сера техническая	2,0	0,84
Сульфенамид "Ц"	1,5	0,63
Белила цинковые	5,0	2,11
Стеариновая кислота	2,0	0,84
Канифоль талловая	4,0	1,69
Фталевый ангидрид	0,5	0,21
Бензойная кислота	1,0	0,42
Воск защитный	2,0	0,84
Масло ПН-6Ш	16,0	6,75
Диафен ФП	1,0	0,42

Ацетонанил	2,0	0,84
Каолин	20,0	8,44
Цеолит	0÷10	0,00÷4,22
Техуглерод П-245	40,0	16,88
Техуглерод П-514	40,0	16,88
Итого	237,0	100

В рецепте наполнитель каолин заменили на цеолит Даубабинского месторождения.

Резиновые смеси после охлаждения подвергали вулканизации в прессе при температуре 155°C в течение 30 мин для получения стандартных образцов и шайб, кото-

рые затем использовали для исследования физико-механических свойств вулканизатов.

Режим изготовления резиновых смесей для брызговиков на лабораторных вальцах ПД 320 160/160 и порядок ввода ингредиентов представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Наименование операции	Время, мин	
	начало операции	конец операции
1 стадия смешения		
Загрузка каучуков СКН-40	0	3
Загрузка ½ части сыпучих ингредиентов (белила цинковые, кислота стеариновая техническая, воск защитный, канифоль таловая, ацетонанил Р и 1/2 части технического углерода П514, П 245)	3	8
Загрузка, ½ части сыпучих ингредиентов (фталевый ангидрид, бензойная кислота, диафен ФП, цеолит) и ½ части технического углерода П514, П 245	8	12
Загрузка пластификаторов масло ПН-6ш, ½ части технического углерода П514, П 245	12	17
Загрузка ½ части технического углерода П 514, П 245	17	23
Снятие смеси с вальцов	23	25
Итого		25
2 стадия смешения		
Загрузка смеси, разогрев	0	2
Загрузка сантогарда, ускорителя сульфенамида Ц, серы технической	2	5
Снятие смеси с вальцов	5	6

Трудностей при проведении процесса смешения не отмечалось. Цеолит легко вводится в резиновую смесь. Распределение ингредиентов в каучуке было удовлетворительным при использовании цеолита среднего размера частиц которых составлял 5...12 мкр, что не требовало изменения режима вальцевания.

Охлаждение смеси проводили на металлическом столе. Готовые резиновые смеси выдерживали при комнатной температуре в течение 2-х часов, после чего вулканизовали в прессе при температуре 165°C в течение 10 мин для получения стандартных образцов и шайб, которые затем использо-

вали для исследования физико-механических свойств вулканизатов. Ниже приведены результаты исследования пластоэластических и физико-механических свойств резиновой смеси.

Обсуждение результатов

Результаты исследований пластоэластических свойств сырых резиновых смесей показали, что полученные резиновые смеси для изготовления брызговиков по пластоэластическим свойствам соответствуют нормам контроля при дозировке модифицированного цеолита 15 масс.ч. на 100 масс. частей каучука (табл. 3).

Показатели	Нормы кон- троля	На 100 масс.частей каучука				
		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Пластичность, усл.ед.	0,30± 5	0,28	0,29	0,30	0,31	0,31

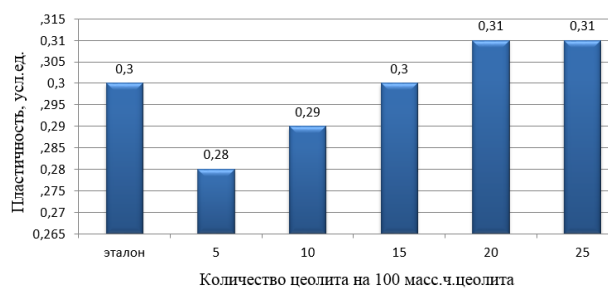


Рис. 1

Вулканизацию образцов полученных резиновых смесей проводили при температуре 165°C в течение 10 мин.

Как видно из диаграмм на рис. 1 (диаграмма зависимости пластичности резиновой смеси для изготовления брызговики от содержания цеолита), эластомерные композиции, наполненные цеолитом при оптимальном содержании 15 масс.ч. на 100 масс. частей каучука при размере частиц 5...25 мкр, имеют показатели, соответствующие нормам контроля. Но дальнейшее снижение доли каолина и увеличение доли цеолита приводит к увеличению твердости по Шору выше оптимальных значений. Поэтому оптимальной дозировкой можно считать 15 масс.частей цеолита. На изменение относительного удлинения после термического старения замена каолина на цеолит практически не влияет.

Таким образом, можно сделать заключение, что цеолит является более активным наполнителем, чем каолин.

В ы в о д ы

В результате исследования установлено, что введение цеолита, обладающего развитой удельной поверхностью, в полимер позволяет улучшить функциональные свойства композиций для эксплуатации в различных условиях.

Определены состав рецептур и технология приготовления резиновых смесей с использованием модифицированного цеолита Даубабинского месторождения.

Установлено влияние дисперсности минерала цеолита на свойства резиновых смесей и резин.

Пластоэластические показатели сырых резиновых смесей при дозировке модифицированного цеолита 15 масс.ч. на 100 масс. частей каучука соответствуют нормам контроля.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бейсеев О.Б., Бейсеев А.О., Шакирова Г.С. Новые и нетрадиционные виды природных минеральных наполнителей Казахстана и перспективы их использования для создания композиционных материалов многоцелевого назначения // Наука и инновации. – 2005, № 1. С. 116...123.
2. Сакибаева С.А., Сырманова К.К., Негим Э.С. Технология эластомеров. – Шымкент: "Элем", 2013.
3. Туренко С. В., Пучков А.Ф., Каблов В. Ф., Спиридонова М.П. Наполнители для резин. – Волгоград: ВолгГТУ, 2005.
4. Размахнин К.К., Хатькова А.Н. Модификация свойств цеолитов с целью расширения областей их применения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011, № 4. С. 246...252.
5. Конысбек Ж.К., Ким М.Е., Сакибаева С.А., Оразымбетова А.О., Жантасова У.С. Исследование влияния цеолитовых наполнителей на свойства резин // Научные труды ЮКГУ им.М.Ауэзова. – 2018, №3(47). С.24...31.
6. Васильянова Л.С., Лазарева Е.А. Цеолиты в экологии // Новости науки Казахстана. – 2016, № 1 (127). С.61...85.
7. Панова Л.Г. Наполнители для полимерных композиционных материалов. – Саратов.: СГТУ, 2010.
8. Корнев А.Е., Буканов А.М., Швердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: Химия, 2000.
9. Ескараева Г.З., Сакибаева С.А., Белоусов В.А. Модификация шинных резин природными цеолитами // Комплексное использование минерального сырья. – Алматы, 2000, № 2. С.85...87.
10. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Tarlanova B., Sagitova G., Shingisbayeva Zh. The study of physical and chemical properties of water-soluble polymer reagents and their compatibility with antibiotics// Rasayan Journal of Chemistry. – Vol. 13, № 3. P.1417...1423. July - September | 2020 ISSN: 0974-1496 | e-ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP
11. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Sagitova G., Bekzhigitova K., Shingisbayeva Zh. The investigation of physical and chemical proper-

ties of water solutions of polymers and their application in combination with drugs // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 14, № 1, 1-8 January – March, 2021 ISSN: 0974-1496/ e-ISSN: 0976-0083. CODEN: RJCABP

12. Туребекова Г.З., Сагитова Г.Ф., Алтамысова Г.Б., Жаппарбергенова Э.Б, Абилхаймызы Л., Сихимбаева М.Т. Способ связи резин с текстильными кордами из синтетических волокон// *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2020, №5. С. 26...33.

REFERENCES

1. Beiseev O.B., Beiseev A.O., Shakirova G.S. New and non-traditional types of natural mineral fillers in Kazakhstan and the prospects for their use for the creation of multi-purpose composite materials // *Science and Innovations*. - 2005, No. 1. S. 116 ... 123.

2. Sakibaeva S.A., Syrmanova K.K., Negim E.S. elastomer technology. - Shymkent: "Alem", 2013.

3. Turenko S.V., Puchkov A.F., Kablov V.F., Spiridonova M.P. Fillers for rubbers. - Volgograd: VolgGTU, 2005.

4. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N. Modification of the properties of zeolites in order to expand their areas of application // *Mining Information and Analytical Bulletin*. - 2011, No. 4. S. 246 ... 252.

5. Konysbek Zh.K., Kim M.E., Sakibaeva S.A., Orazymbetova A.O., Zhantasova U.S. Study of the influence of zeolite fillers on the properties of rubber // *Scientific works of SKSU named after M. Auezov*. - 2018, No. 3 (47). P.24...31.

6. Vasilyanova L.S., Lazareva E.A. Zeolites in ecology // *Science News of Kazakhstan*. - 2016, No. 1 (127). P.61...85.

7. Panova L.G. Fillers for polymeric composite materials. - Saratov.: SGTU, 2010.

8. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. Technology of elastomeric materials. – M.: Chemistry, 2000.

9. Eskaraeva G.Z., Sakibaeva S.A., Belousov V.A. Modification of tire rubbers with natural zeolites // *Complex use of mineral raw materials*. - Almaty, 2000, No. 2. P. 85 ... 87.

10. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Tarlanova B., Sagitova G., Shingisbayeva Zh. The study of physical and chemical properties of water-soluble polymer reagents and their compatibility with antibiotics// *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 13, No. 3. P.1417...1423. July-September | 2020 ISSN: 0974-1496 | e-ISSN: 0976-0083 | CODEN: RJCABP

11. Dzhakipbekov E., Sakibayeva S., Dzhakipbekova N., Sagitova G., Bekzhigitova K., Shingisbayeva Zh. The investigation of physical and chemical properties of water solutions of polymers and their application in combination with drugs // *Rasayan Journal of Chemistry*. – Vol. 14, No. 1, 1-8 January – March, 2021 ISSN: 0974-1496/e-ISSN: 0976-0083. CODEN: RJCABP

12. Turebekova G.Z., Sagitova G.F., Alpamysova G.B., Zhapparbergenova E.B., Abilkhaimkyzy L., Sikhimbaeva M.T. The method of bonding rubber with textile cords made of synthetic fibers // *Izv. universities. Technology of the textile industry*. - 2020, No. 5. pp. 26...33.

Поступила 22.12.21.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ПОКРЫТИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА НА ЕГО ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ
С ПОМОЩЬЮ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF THE COMPONENTS
OF THE POLYSTYRENE FOAM COATING ON ITS FLAMMABILITY
USING REGRESSION ANALYSIS**

А.М. МОЧАЛОВ, М.В. АКУЛОВА, Д.А. УЛЬЕВ, И.Ю. ШАРАБАНОВА

A.M. MOCHALOV, M.V. AKULOVA, D.A. ULYEV, I.Y. SHARABANOVA

**(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Ивановский государственный политехнический университет)**

**(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Ivanovo State Polytechnical University)**

E-mail: anton.mochalov.93@mail.ru

Пенополистирол применяется в различных областях промышленности, особенно часто – в качестве теплоизоляции. Наряду с положительными свойствами пенополистирол обладает следующими пожароопасными свойствами: высокой воспламеняемостью, токсичностью продуктов горения, быстрым распространением пламени. Это ограничивает его повсеместное применение.

В данной работе приведены результаты исследования влияния различных компонентов композиционного покрытия на воспламеняемость пенополистирола, установлено их положительное влияние на увеличение времени воспламенения. Показано, что время воспламенения пенополистирола с покрытием увеличивается в несколько раз по сравнению с контрольным образцом. Посредством проведения регрессионного анализа определена концентрация компонентов, входящих в состав композиционного покрытия: органосилоксана (полиэтилсилоксановая жидкость) и жидкого стекла. Приводятся результаты влияния предложенного жидкофазного покрытия на воспламеняемость пенополистирола. Представлены результаты регрессионного анализа, подтверждающего эффективность разработанного состава при воздействии пламени на поверхность пенополистирола.

Expanded polystyrene is used in various fields of industry, especially often it is used as thermal insulation. Along with the positive properties, expanded polystyrene has the following fire-hazardous properties: high flammability, toxicity of combustion products, rapid flame speed. This limits its widespread use.

This paper presents the results of a study of the effect of various components of the composite coating on the flammability of polystyrene foam, their positive effect on increasing the combustion time is established. It is shown that the combustion time of coated polystyrene foam increases several times compared to the control sample. By means of regression analysis, the concentration of the components that make up the composite coating was determined: organosiloxane (polyethylsiloxane liquid) and liquid glass. The results of the influence of the proposed liquid-phase coating on the flammability of expanded polystyrene are presented. The results of

regression analysis confirming the effectiveness of the developed composition when exposed to flame on the surface of polystyrene foam are presented.

Ключевые слова: покрытие, пенополистирол, органосилоксаны, жидкое стекло, двухфакторный эксперимент, пожарно-технические свойства.

Keywords: coating, expanded polystyrene, organosiloxanes, liquid glass, two-factor experiment, fire-technical properties.

Введение

Пенополистирол, применяемый в промышленности, наряду с положительными свойствами обладает и пожароопасными свойствами: высокой воспламеняемостью, токсичностью продуктов горения, быстрым распространением пламени. Так, линейная скорость распространения огня по поверхности пенополистирола составляет 1 см/с, воспламенение пенополистиролов происходит при температуре от 220 до 380°C, самовоспламенение соответствует температуре 460...480°C. Это ограничивает сферы его применения [1].

Анализ литературных данных [2...4] показал, что в настоящее время с целью снижения пожарной опасности пенополистирола производители добавляют антипирены в полистирольную массу. Такой пенополистирол называют "самозатухающим", однако их применение не позволяет снизить пожарную опасность пенополистирольных плит, а сами антипирены имеют высокую стоимость.

С целью снижения пожарной опасности пенополистирола в данной работе предложен огнезащитный состав на основе органосилоксанов, приведены его пожарно-технические и физические свойства.

Состав включает органосилоксан и жидкое стекло, что, с одной стороны, с помощью органической составляющей повышает адгезию покрытия к пенополистирольной подложке, а с другой стороны – повышенное содержание кремния создает на поверхности прочное огнезащитное покрытие. Органосилоксаны, или силиконы, составляют наиболее важную из групп полимеров, в которых основная цепь образована вместе с углеродом другими элементами. Участки разной полярности отдельных силоксановых группировок линейных силок-

сановых цепей при вращении вокруг связей стремятся расположиться в пространстве так, чтобы дипольные моменты разных группировок были, по возможности, скомпенсированы [5], [6]. Жидкое стекло широко распространено в огнезащите и других областях [9], [10].

Задачей данного исследования являлось с помощью регрессионного метода анализа определение влияния различных компонентов композиционного покрытия на воспламеняемость пенополистирола, определение максимального времени воспламенения и определение влияния покрытия на коэффициент теплопроводности и водопоглощение пенополистирола.

Методы

В качестве объектов исследования выбран пенополистирол марок RAVATHERM XPS STANDARD (ТУ 2244-002-00259620-2013 и ПСБ-С 15У (ТУ 2244-007-04001508-96). В качестве компонентов огнезащитного состава были выбраны органосилоксан (полиэтилсилоксановая жидкость – 5, ГОСТ ГОСТ 13004) и натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078).

Основой методологии работы является ГОСТ 30402–96 "Материалы строительные. Методы испытаний на воспламеняемость".

Общий вид установки для проведения эксперимента и подробное описание результатов предварительных исследований приведены в статье [7]. На основании данных, полученных в ходе предварительного эксперимента, был сделан вывод о достаточной эффективности органосилоксана и жидкого стекла для защиты пенополистирола от огневого воздействия [8].

Результаты и обсуждения

Для оценки влияния компонентов покрытия пенополистирола на его воспламеняемость был проведен двухфакторный

эксперимент с использованием метода регрессионного анализа. Была построена математическая модель, описывающая зависимость времени достижения максимальной

температуры воспламенения от соответствующих концентраций компонентов.

Данная зависимость описывается в форме полинома второй степени в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (1)$$

Результаты исследования воспламеняемости пенополистирола марки ПСБ-С 15-У после обработки огнезащитными составами с различным содержанием органокси-

локсана и жидкого стекла представлены в табл. 1. Для наибольшей точности эксперимента проводилось по 5 параллельных испытаний.

Таблица 1

Параметр	Фактор	Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание органосилоксана, %	X ₁	0	5	0	10	0	2,5	10	30
Содержание жидкого стекла, %	X ₂	0	0	5	0	10	2,5	30	10
Среднее время достижения максимальной температуры, с	Y _{ср}	180	246	206	286	236	241	242	265

Для нахождения оптимума функции отклика была решена система уравнений:

$$\begin{cases} 2(-0,53) + 0,08x_2 = -16,2, \\ 0,08x_1 + 2(-0,39)x_2 = -9,27, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -1,06x_1 + 0,08x_2 = -16,2, \\ 0,08x_1 - 0,78x_2 = -9,27. \end{cases} \quad (3)$$

По итогам проведения регрессионного анализа была получена следующая зависимость:

$$y = 178 + 16,2x_1 + 9,27x_2 + 0,08x_1x_2 - 0,53x_1^2 - 0,39x_2^2. \quad (4)$$

Время достижения максимальной температуры при данных значениях факторов составляет 373 с (рис. 1).

Результаты исследования воспламеняемости пенополистирола марки RAVATHERM XPS STANDARD после обработки огнезащитными составами с различным содержанием органосилоксана и жидкого стекла представлены в табл. 2. Для наибольшей точности эксперимента проводилось по 5 параллельных испытаний.

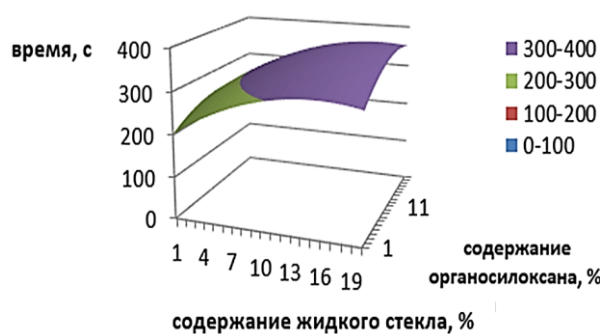


Рис. 1

Таблица 2

Параметр	Фактор	Номер эксперимента							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание органосилоксана, %	X ₁	0	5	0	10	0	2,5	10	30
Содержание жидкого стекла, %	X ₂	0	0	5	0	10	2,5	30	10
Среднее время достижения максимальной температуры, с	Y _{ср}	154	180	166	218	177	186	175	215

Для определения оптимальных концентраций органосилоксана и жидкого стекла на основе экспериментальных данных была построена математическая модель, описывающая зависимость времени достижения максимальной температуры от соответствующих концентраций.

Данная зависимость искалась в форме полинома второй степени (формула (1)).

$$y = 152 + 8,5x_1 + 4,18x_2 - 0,06x_1x_2 - 0,22x_1^2 - 0,16x_2^2. \quad (7)$$

Время достижения максимальной температуры при данных значениях факторов составит 249 с (рис. 2).

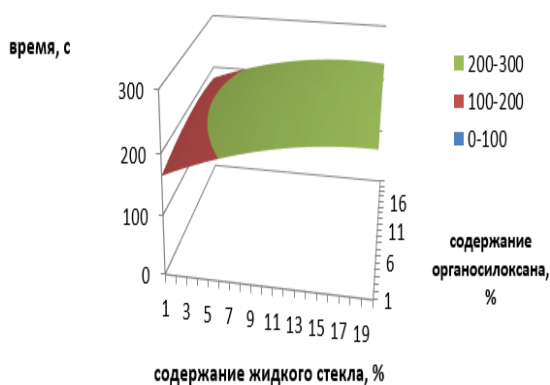


Рис. 2

После проведения двухфакторного эксперимента была проведена проверка основных свойств пенополистирола с нанесенным огнезащитным составом. По результатам данной проверки было установлено, что показатель водопоглощения пенополистирола не изменяется. При проверке теплопроводности пенополистирола с нанесенным огнезащитным составом результаты колебались в пределах 0,028...0,037

Для нахождения оптимума функции отклика была решена система уравнений:

$$\begin{cases} 2(-0,22)x_1 - 0,06x_2 = -8,5, \\ -0,06x_1 + 2(-0,16)x_2 = -4,18, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} -0,44x_1 - 0,06x_2 = -8,5, \\ -0,06x_1 - 0,32x_2 = -4,18. \end{cases} \quad (6)$$

По итогам проведения регрессионного анализа была получена следующая зависимость:

Вт/(м·°С), что практически не уступает изначальным параметрам (0,035...0,043 Вт/(м·°С)).

Таким образом, по результатам обработки данных, полученных в ходе двухфакторного эксперимента, направленного на определение оптимальной концентрации огнезащитного состава, применение которого положительно сказывается на увеличении времени воспламеняемости и уменьшении времени горения пенополистирольной плиты, можно сформулировать следующие выводы. Наибольшая эффективность по защите пенополистирола марки ПСБ-С 15-У достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 16%, жидкое стекло – 14%. Наибольшая эффективность по защите пенополистирола марки RAVATHERM XPS STANDARD достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 18%, жидкое стекло – 10%.

Более подробно результаты двухфакторного эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Компоненты огнезащитного состава		Эффект от применения состава (время, с)
	органосилоксан	жидкое стекло	
Воспламеняемость	16 %	14 %	373
	18 %	10 %	249

Результаты двухфакторного эксперимента показали, что наибольшая эффективность достигается путем применения огнезащитного состава со следующим процентным содержанием веществ: органосилоксан – 16...18%, жидкое стекло – 10...14%. Положительного эффекта удалось достичь благодаря применению в составе таких компонентов, как органосилоксан и жидкое стекло.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Акулова М.В., Мочалов А.М., Лебедев Д.В., Родионов Е.Г. О безопасности самозатухающего пенополистирола // Сб. мат. Междунар. научн.-практ. конф.: Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Иваново 20-21 сентября 2017 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 2017. С. 9...12.

2. Guidelines for the use of expanded foam polystyrene panel systems in industrial buildings so as to minimise the risk of fire // (Fire Engineering Research Report 06/1/2006, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800 Christchurch, New Zealand).

3. Дашко Л.В., Елисеева И.А., Дашко И.В., Пономарева Н.Г. Анализ патентов и материалов заявок на изобретения, связанных с огнезащитой пенополистирола // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. Том 25, Вып. 1. С. 17...25.

4. Кетов А.А., Красновских М.П., Максимович Н.Г. Пожарная опасность самозатухающего пенополистирола // Пожарная безопасность. – 2014. Вып. 1. С. 54...59.

5. Машкин Н.А., Крутасов Б.В., Бернацкий А.Ф., Крутасова И.Б., Ларичкин В.В. Применение кремнийорганических модификаторов для защиты памятников деревянного зодчества // Изв. вузов. Строительство. – 2013, № 10. С. 11...17.

6. Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д. Структурная химия органосилоксанов: состав и строение кластеров $SI N(O,C) M (N = 2-21)$ с мостиковыми связями $SI-O-SI$ // Физика и химия стекла. – 2014. Т. 40, №2. С. 234...243.

7. Акулова М.В., Мочалов А.М. О результатах исследования влияния огнезащитных составов на основе органосилоксанов на воспламеняемость пенополистирола // Современные проблемы гражданской защиты (Предыдущее название "Вестник Воронежского института ГПС МЧС России"). – Вып. 2 (31), 2019. С. 48...55.

8. Mochalov A.M., Akulova M.V., Sokolova J.A. and Sokolova A.G. New flame-retardant composition for lowering contribution of expanded poly styrene to the

propagation of fire // XXXIX RSP "Seminar Theoretical Basics of Construction". – Wrocław, Poland, 2020.

9. Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е., Кокиаров С.А., Ахмадулина Ю.С., Соколова Ю.А. Применение механомагнитоактивированных водных растворов жидкого стекла для модифицирования мелкозернистых композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 6. С. 58...65.

10. Шустов Ю.С., Плеханова С.В., Шитова Т.И., Люкишинова И.В. Сравнение методик оценки распространения пламени на свойства специальной одежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5. С. 63...67.

R E F E R E N C E S

1. Akulova M. V., Mochalov A.M., Lebedev D. V., Rodionov E. G. On the safety of self-extinguishing polystyrene foam // Modern fire-safe materials and technologies: Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, Ivanovo, September 20-21, 2017 - Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. - pp. 9-12.

2. Guidelines for the use of expanded foam polystyrene panel systems in industrial buildings so as to minimise the risk of fire // (Fire Engineering Research Report 06/1/2006, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800 Christchurch, New Zealand).

3. Dashko L.V., Eliseeva I.A., Dashko I.V., Ponomareva N.G., Analysis of patents and materials of applications for inventions related to fire protection of expanded polystyrene // Fire and explosion safety - Volume 25, Issue 1. - 2016 - pp. 17-25.

4. Ketov A. A., Krasnov M. P., M. N. G. Fire danger self-extinguishing expanded polystyrene // Fire safety Issue. 1, 2014 – p. 54-59.

5. Mashkin N. A., Krutikov B. V., Bernatsky A. F., Krutikova I. B., V. V. Larichkin the Use of silicone modifiers for the protection of monuments of wooden architecture // News of higher educational institutions. Construction. 2013. No. 10. pp. 11-17.

6. Shevchenko V.Ya., Blatov V.A., Ilyushin G.D. Structural chemistry of organosiloxanes: composition and structure of $SI N(O,C) M (N = 2-21)$ clusters with $SI-O-SI$ bridging bonds // Physics and chemistry of glass. 2014. Volume 40, No. 2. pp. 234-243.

7. M.V. Akulova, A.M. Mochalov On the results of the study of the effect of flame retardants based on organosiloxanes on the flammability of polystyrene foam // Journal Modern Problems of Civil Protection (Previous title "Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia"). - Issue 2 (31). - 2019 - pp. 48-55.

8. A M Mochalov, M V Akulova, J A Sokolova and A G Sokolova New flame-retardant composition for lowering contribution of expanded poly styrene to the

propagation of fire // XXXIX RSP «Seminar Theoretical Basics of Construction», Wrocław, Poland, 2020.

9. S. V. Fedosov, M. V. Akulova, T.E. Slizneva, S. A. Koksharov., Y. S. Akhmadulina, Yu. A. Sokolova Application machinemanufacturer aqueous liquid glass for modification of fine-grained composites // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2016. No. 6 (366). pp. 58-65.

10. Yu.S. Shustov, S.V. Plekhanova, T.I. Shitova, I.V. Lyukshinova Comparison of methods for assessing

the spread of flame on the properties of special clothing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 5 (395). pp. 63-67.

Рекомендована кафедрой государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе УНК "Государственный надзор"). Поступила 28.12.21.