

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-Tech (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](http://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 Bacarreira 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 structure 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–V558.
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 mnogosloynnoy 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.