

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.

ЛИТЕРАТУРА

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. *Тимошкова 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.