УДК 691.175.2
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_349

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ И ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОН ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ

IMPROVING 0F THERMAL RESISTANCE AND STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS USING ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE AND CARBON FIBERS MODIFIED WITH LOW-ENERGY ION FLOW

Ф.Р. САГИТОВА[1], Ф.С. ШАРИФУЛЛИН[1], И.Ш. АБДУЛЛИН[2]

F.R. SAGITOVA[1], F.S. SHARIFULLIN[1], I.SH. ABDULLIN[2]

([1]Казанский национальный исследовательский технологический университет, [2]ООО «Плазма-ВСТ»)

([1]Kazan National Research Technological University, [2]LLC Plasma-VST)

E-mail: farida_sagitova@mail.ru, plasma.vst@gmail.com

В статье представлены результаты комплексного исследования композиционных материалов, армированных волокнами из сверхвысокомолекулярного полиэтилена и углеродными тканями, подвергнутыми обработке потоком низкоэнергетических ионов в условиях высокочастотного разряда. Установлено, что модификация поверхности армирующих волокон способствует существенному повышению межфазной адгезии с полимерной матрицей и, как следствие, улучшению термомеханических и механических характеристик готового композиционного материала. Проведенный термомеханический анализ выявил значительное повышение критических температур и снижение микродеформаций при оптимизации содержания матрицы. Установлено, что при использовании обработанных потоком низкоэнергетических ионов волокон процент содержания матрицы может быть снижен до 40…50 % без ухудшения механических характеристик, что позволяет существенно уменьшить массу конечного изделия. Исследования механических характеристик композиционного материала подтвердили эффективность модификации потоком низкоэнергетических ионов как метода повышения эффективности армирования без увеличения массы композита. Это открывает перспективы для применения полученных материалов в конструкциях, где важны одновременно прочность и легкость, – в

первую очередь в аэрокосмической, автомобильной и медицинской отраслях. Предложенный подход к модификации волокнистых армирующих компонентов демонстрирует научную и практическую состоятельность и может быть положен в основу новых технологических решений в проектировании и производстве полимерных композиционных материалов с регулируемыми свойствами.

The article presents the results of a comprehensive study of composite materials reinforced with ultra-high molecular weight polyethylene fibers and carbon fabrics treated with a low-energy ion flow under high-frequency discharge conditions. It was found that surface modification of reinforcing fibers contributes to a significant increase in interfacial adhesion with the polymer matrix and, as a consequence, to an improvement in the thermomechanical and mechanical characteristics of the finished composite material. The thermomechanical analysis revealed a significant increase in critical temperatures and a decrease in microdeformations with optimization of the matrix content. It was found that when using fibers treated with a low-energy ion flow, the percentage of the matrix content can be reduced to 40–50% without deteriorating the mechanical characteristics, which allows for a significant reduction in the weight of the final product. The study of the mechanical characteristics of the composite material confirmed the effectiveness of modification by a low-energy ion flow as a method for increasing the reinforcement efficiency without increasing the mass of the composite. This opens up prospects for the use of the obtained materials in structures where both strength and lightness are critical - primarily in the aerospace, automotive and medical industries. The proposed approach to modifying fibrous reinforcing components demonstrates scientific and practical viability and can be used as a basis for new technological solutions in the design and production of polymer composite materials with adjustable properties.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, углеродные ткани, полимерная матрица, композиционные материалы, поток низкоэнергетических ионов, межфазное взаимодействие, термомеханический анализ, механические характеристики.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, carbon fabrics, polymer matrix, composite materials, low-energy ion flow, interfacial interaction, thermomechanical analysis, mechanical characteristics.

Введение

В последние десятилетия полимерные композиционные материалы (ПКМ) с армированием волокнами получили широкое распространение в конструкционных и функциональных применениях благодаря высокой удельной прочности, стойкости к агрессивным средам и возможности целенаправленного проектирования свойств [1…3].

Однако реализация полного потенциала армирующих волокон зачастую ограничивается недостаточной межфазной адгезией между армирующим компонентом и полимерной матрицей [4…6]. Эта проблема особенно актуальна при использовании таких малосмачиваемых материалов, как сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладающий высокой химической инертностью [7…9], а также углеродные волокна [10, 11], чувствительные к термическим и механическим воздействиям.

Одним из эффективных направлений решения данной задачи является модификация поверхности армирующих волокон для повышения их капиллярной смачиваемости и создания условий формирования

прочных межфазных связей с матрицей. Известные методы химической и физической модификации волокон требуют усложнения технологии получения волокнообразующих полимеров и самих волокон. Это приводит к увеличению времени технологических процессов, повышению расхода химических веществ, что, как правило, в условиях многотоннажных производств влечет за собой сложные экологические проблемы. Кроме того, при данных способах модификации улучшение одних свойств волокон часто сопровождается ухудшением других [12…15].

В качестве альтернативы традиционным методам модификации волокнистых материалов особую значимость приобретают плазменные методы обработки, представляющие собой воздействие на материалы плазмы газовых разрядов: тлеющего, барьерного, коронного, искрового, дугового, высокочастотного и сверхвысокочастотного. Они позволяют направленно модифицировать структуру волокнообразующего полимера с целью изменения физических, механических, поверхностных и эксплуатационных свойств волокон [16…19]. Общим недостатком большинства плазменных способов обработки является неустойчивость модифицирующего эффекта во времени, который в среднем снижается до 40% в течение 10 дней. Кроме того, проблемой остаются деструктивные процессы в текстильных материалах, что затрудняет комплексное улучшение их свойств.

Многие технологические процессы текстильной и легкой промышленности имеют своей целью модифицирование свойств поверхности волокон и нитей, улучшение их физических и механических показателей при сохранении других характеристик. Для модификации синтетических волокнистых материалов все чаще применяют высокочастотные (ВЧ) разряды. Незначительный процент ультрафиолетовой составляющей плазмы ВЧ пониженного давления позволяет производить модификацию материалов без их деструкции и достигать высокой устойчивости плазменного эффекта [20…24].

Такой подход позволяет структурно и химически активировать поверхность волокон, повышая их капиллярную смачиваемость и создавая условия для формирования прочных межфазных связей с матрицей. В то же время влияние подобных обработок на комплекс термомеханических и прочностных характеристик конечного композита требует всестороннего исследования, включая оценку оптимального содержания матрицы, влияющего на распределение напряжений и стабильность структуры материала.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств композиционных материалов с армирующими компонентами из СВМПЭ и углеродных волокон, модифицированных потоком низкоэнергетических ионов (ПНЭИ), генерируемых в условиях ВЧ разряда пониженного давления. Целью исследования является оценка влияния ионной обработки на межфазное взаимодействие, критические температуры, механическую прочность и допустимое снижение доли полимерной матрицы без ущерба для эксплуатационных свойств ПКМ.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались ПКМ с модифицированными и не модифицированными ПНЭИ армирующими компонентами из СВМПЭ волокон марки D800 и углеродных тканей СС245 и СС201. Характеристики СВМПЭ волокон марки D800: линейная плотность – 178 текс, предел прочности на разрыв – 0,95 ГПа, относительное удлинение на разрыв – 20%. Характеристики углеродных тканей СС245\СС201: плетение – саржевое 2/2\полотняное, плотность – 240\194 г/м^2, толщина – 280\250 мкм.

В качестве полимерной матрицы применялась эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) с отвердителем ПЭПА, распределенная по массе в диапазоне от 20% до 80%, что позволило исследовать влияние процентного содержания матрицы (ПСМ) на термомеханические и прочностные характеристики композиционного материала.

Модификация армирующих компонентов проводилась на опытно-промышленной плазменной установке, предназначенной для обработки волокнистых наполнителей. Описание, состав, принцип действия плаз-

менной установки и методика модификации представлены в работах [25, 26].

Режим плазменной модификации выбран исходя из ранее проведенных исследовательских работ как оптимальный для уве-личения смачиваемости и капиллярности армирующих волокон без разрушения их структуры [27, 28]. Для СВМПЭ волокон: мощность разряда W_p = 1,8 кВт, давление в вакуумной камере P = 26,6 Па, расход газа (аргона) G = 0,04 г/с, время воздействия t = 3 мин. Для углеродных тканей: мощность разряда W_p = 1,8 кВт, давление в вакуумной камере P = 50,0 Па, расход газа (воздуха) G = 0,04 г/с, время воздействия t = 20 мин.

Изготовление образцов ПКМ с углеродными тканями осуществлялось методами резки армирующего материала на плоттере Zund G3 M-1600, укладки в форму и последующей инжекции эпоксидной смолы под давлением с использованием оборудования RTM-фирмы Isojet. Температура формования составляла 120°C.

Формирование ПКМ с использованием волокон СВМПЭ осуществлялось методом инфузионной пропитки с последующим прессованием и подогревом. Процесс инфузионной пропитки выполнялся на установке, состоящей из вакуумного мешка с каналом распределения смолы, вакуумного насоса Modular 4S и емкости для дегазации и подачи композиции на основе эпоксидной смолы. Вакуумирование собранной установки проводили до давления 0,01 МПа. Процентное содержание матрицы в ПКМ регулировали прикладыванием давления до 3 МПа.

Для оценки термомеханических свойств применялся термомеханический анализатор серии Netzsch 402 F1 (Германия). Измерения проводились в диапазоне температур до 400 °C при нагрузке 1 Н. Параметром наблюдения служило изменение относительной деформации dL/L_0, где L_0 – исходная толщина образца. Также определялась температура начала деструкции материала ($T_{крит}$), характеризующая стабильность межфазного взаимодействия между волокном и матрицей.

В дополнение к методике термомеханического анализа (ТМА) проведены испытания ПКМ на трехточечный изгиб, растяжение и межслойный сдвиг методом короткой балки с применением универсальной испытательной машины AGS-X (Shimadzu, Германия) по ГОСТ Р 56805-2015, ГОСТ 32656-2017 и ГОСТ 32659-2014 соответственно. Для испытаний на трехточечный изгиб изготовлены прямоугольные образцы размером 60×15×2 мм, на растяжение – образцы в виде лопаток размером 250×25×2 мм, на межслойный сдвиг – образцы в форме прямоугольного параллелепипеда размером 20×10×2 мм на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ IMES-ICORE SF plastic 1180/1980.

Экспериментальные результаты и их обсуждения

Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационную пригодность композиционных материалов с волокнистыми материалами в качестве армирующих, является их поведение в условиях теплового и механического воздействия. Так как модификация ПНЭИ армирующих волокнистых материалов позволяет повысить их смачиваемость и капиллярность, т. е. адгезию со связующим, это приводит к возможности регулирования процента содержания матрицы и ее влияния на термомеханические характеристики композиционного материала.

На рис. 1 и 2 представлены результаты термомеханического анализа композиционного материала с применением немодифицированных и модифицированных СВМПЭ волокон с различным ПСМ.

Анализ графиков изменения относительной деформации dL/L_0 при нагреве до 400 °C (рис. 1) показывает, что при снижении ПСМ до значений менее 60% у композиционных материалов с применением немодифицированных армирующих волокон происходит резкое увеличение деформации, что свидетельствует о потере термомеханической стабильности. Однако обработка СВМПЭ волокон ПНЭИ позволила добиться снижения dL/L_0 даже при 50% содержания матрицы за счет улучшения межфазной адгезии и перераспределения напряжений в структуре ПКМ (рис. 2).

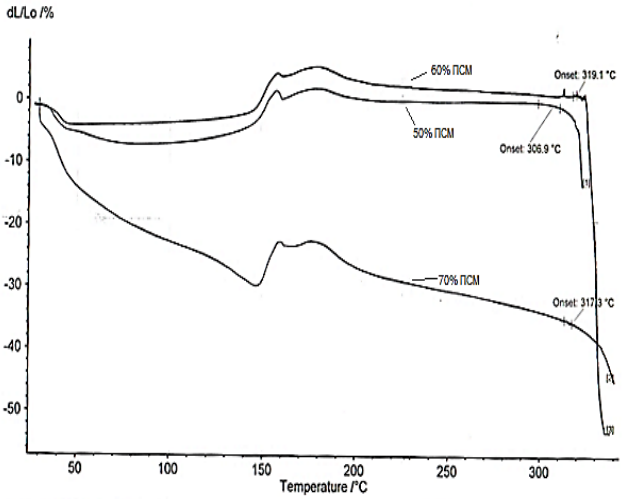

Рис. 1

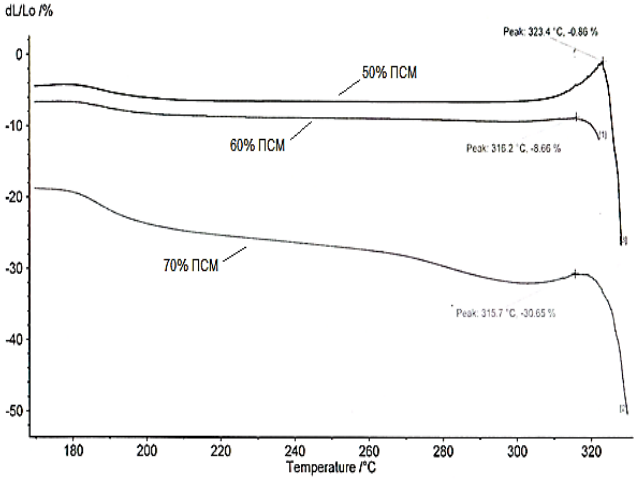

Рис. 2

Эти изменения отражаются на температуре начала разрушения: после модификации наблюдается сдвиг критической температуры на 5…15°С в сторону повышения в зависимости от содержания матрицы. При применении модифицированных СВМПЭ волокон характер изменения зависимости имеет линейную форму и оказывает выраженное влияние на температурную стабильность ПКМ и межфазное взаимодействие в зоне армирующий элемент – матрица.

Для композиционных материалов с армированием из углеродных волокон (УВ) выявлены аналогичные зависимости. Результаты исследования температуры начала деструкции ПКМ с применением армирующих УВ до и после их модификации в зависимости от ПСМ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание матрицы, %	Температура начала деструкции, °С	
	ПКМ с УВ без модификации	ПКМ с модифицированными УВ
20	203,8	213,5
40	251,1	321,4
60	271,2	305,0
80	216,3	297,7

Согласно данным табл. 1 модификация УВ позволила уменьшить содержание матрицы до 40% без утраты целостности структуры. Критическая температура деструкции ПКМ возросла в 1,3 раза при применении УВ, модифицированных ПНЭИ. Образцы ПКМ без модификации УВ сохраняли свои термомеханические характеристики при содержании матрицы более 60%, тогда как модифицированные композиты демонстрировали устойчивость уже при 40%-м содержании матрицы.

Такие результаты указывают на формирование более прочной межфазной зоны, обеспечивающей согласованную работу армирующего волокна и полимерной матрицы. Повышение температуры разрушения также подтверждает снижение вероятности локального перегрева и деградации в процессе эксплуатации при термической нагрузке.

Первоначальная оценка прочностных характеристик композитов с армирующими элементами из СВМПЭ волокон и УВ показала типичные ограничения, присущие немодифицированным системам: невысокая межфазная адгезия, склонность к межслоевому расслоению и недостаточная термостабильность при пониженном содержании полимерной матрицы. Для устранения данных негативных факторов необходимо повысить свободную энергию поверхности армирующих компонентов для увеличения адгезионного взаимодействия со связующим и улучшения механических характеристик композиционного материала в целом.

В табл. 2 представлены результаты механических испытаний композиционных материалов с применением армирующих СВМПЭ волокон до и после модификации ПНЭИ.

Таблица 2

Армирующее СВМПЭ волокно	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при межслойном сгибе, МПа
без воздействия ПНЭИ (ПСМ=60)	660	151	4,8
с воздействием ПНЭИ (ПСМ=50)	850	460	13,0

Согласно представленным данным табл. 2 применение модифицированных СВМПЭ волокон в качестве армирующих позволяет улучшить механические характеристики ПКМ. Ионизированный атом аргона не способен повысить адгезию волокон за счет пришивания новых функциональных групп в процессе модификации. Однако радикалы на поверхности СВМПЭ волокон являются долгоживущими из-за низкой подвижности макромолекул. При выносе волокон из вакуумной камеры образованные на поверхности радикалы рекомбинируют с полярными группами из воздуха. В связи с этим при обработке в аргоне повышается адгезионная способность СВМПЭ волокон и, как следствие, улучшаются механические характеристики композиционного материала.

Результаты механических испытаний композиционных материалов, армированных углеродными тканями, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Марка углеродной ткани	Относительный предел прочности при растяжении, %	Относительный предел прочности при изгибе, %	Относительный предел прочности при межслойном сгибе, %
СС 201	2	10	17
СС 245	5	5	17

Анализ данных табл. 3 показывает, что применение модифицированных углеродных тканей вне зависимости от вида их переплетения оказывает положительное влияние на механические характеристики композиционного материала. Данный эффект можно объяснить следующим. Во-первых, при производстве углеродных тканей используются волокна с нанесенным на поверхность замасливателем, который снижает адгезионное взаимодействие с матрицей при последующем их использовании в композиционных материалах. Во-вторых, в углеродных тканях между волокнами имеются микропустоты, в которые затруднен доступ вязкого связующего. При модификации углеродных тканей ПНЭИ с применением плазмообразующего газа воздуха за счет окислительных процессов происходит частичное удаление замасливателя и формирование на поверхности тканей гидроксильных функциональных групп. Это приводит к существенному повышению смачиваемости поверхности, способствует увеличению межфазного взаимодействия армирующего наполнителя с полимерной матрицей и, как следствие, повышению адгезионной прочности матрица – наполнитель.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование термомеханических и прочностных характеристик композиционных материалов с армирующими компонентами из СВМПЭ волокон и углеродных тканей показало высокую эффективность их предварительной модификации ПНЭИ в режимах, приводящих к увеличению смачиваемости и капиллярности.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о значительном усилении межфазного взаимодействия между армирующими волокнами и полимерной матрицей, выражающемся в росте критических температур деструкции, улучшении механических характеристик, а также в снижении деформаций при нагреве.

Установлена возможность варьирования процентного содержания полимерной матрицы в составе композиционного материала. При использовании модифицированных СВМПЭ волокон содержание матрицы может быть снижено с 60% до 50%, а при применении углеродных тканей – с 60% до 40% без ухудшения механических характеристик композиционного материала, что позволяет существенно уменьшить массу конечного изделия. Это открывает перспективы для применения полученных материалов в конструкциях, где важны одновременно прочность и легкость, – в первую очередь в аэрокосмической, автомобильной и медицинской отраслях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oladele I., Omotosho T., Adediran A.* Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications // International Journal of Polymer Science. 2020. No. 1. P. 1…12.

2. *Pukánszky B.* Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future // European polymer journal. 2005. V. 41, No. 4. P. 645…662.

3. *Раскутин А.Е.* Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 349…367.

4. *Кузнецов В.П., Баумгартэн М.И., Невзоров Б.П., Фадеев Ю.А.* Адгезия в композиционных материалах: термины и физическая сущность // Вестник КемГУ. 2014. №2 (58). С. 173…177.

5. *Ritter A., Sulaiman T., Altitinchi A. etc.* Composite-composite adhesion as a function of adhesive-composite material and surface treatment // Operative dentistry. 2019. V. 44, No. 4. P. 348…354.

6. *Kendall K.* Adhesion and composites // Composite Interfaces. 1996. V. 4, No. 5. P. 299…311.

7. *Chen L., Deng B., Li X., Wang Z.* Structural evolution of UHMWPE gel fibers as high degree plasticized system during stretching: An in-situ wide and small angle X-ray scattering study // Polymer. 2022. V. 255. P. 125149.

8. *Zhang Q., Lan L., Zheng Z., Liu P.* Constructing highly oriented and condensed shish-kebab crystalline structure of HDPE/UHMWPE blends via intense stretching process: Achieving high mechanical properties and in-plane thermal conductivity // Polymer. 2022. V. 241. P. 124532.

9. *Пахомов П.М., Голикова А.Ю., Хижняк С.Д.* О строении высокопрочных волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полученных методом гель-формования // Химические волокна. 2006. №3. С. 18…23.

10. *Xu B., Wang X., Lu Y.* Surface modification of polyacrylonitrile-based carbon fiber and its interaction with imide // Applied Surface Science. 2006. V. 253, No. 5. P. 2695…2701.

11. *Severini F., Formaro L., Pegoraro M., Posca L.* Chemical modification of carbon fiber surfaces // Carbon. 2002. V. 40. No. 5. P. 735…741.

12. *Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О.* Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов. Тамбов: ТГТУ, 2012. 180 с.

13. *Перепелкин К.Е.* Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства // Химические волокна. 2005. № 4. С. 7…22.

14. *Кустельман В.Н.* Физические методы модификации полимерных материалов. М: Химия, 1980. 224 с.

15. *Ершов И.П., Сергеева Е.А., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш.* Модификация синтетических волокон и нитей. Обзор // Вестник Казанского технологического университета. 2012, Т. 15, № 18. С. 136...143.

16. *Асташкина О.В., Богдан Н.Ф., Лысенко А.А.* Получение активированных углеродных волокон методом твердофазной (химической) активации // Химические волокна. 2008. №3. С. 8…10.

17. *Войценя В.С., Гужова С.К., Титов В.И.* Воздействие низкотемпературной плазмы электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.

18. *Максимов А.И., Горберг Б.Л., Титов В.А.* Возможности и проблемы плазменной обработки тканей и полимерных материалов // Текстильная химия. 1992. №1. С. 101…118.

19. *Гильман А.Б., Потапов В.К.* Плазмохимическая модификация поверхности полимерных материалов // Прикладная физика. 1995. Вып. 3-4. С. 14…22.

20. *Гришанова И.А., Абдуллин И.Ш., Желонкин Я.О.* Плазменная активация поверхности армированных органопластиков // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Вып. 3. Т. 12. С. 62.

21. *Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш., Корнеев Н.В. и др.* Исследование адгезионных свойств гибридных волокон после плазменной обработки // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 12. С. 64…66.

22. *Абдуллина В.Х., Давлетбаев Р.С.* Плазменные методы активации поверхности полиолефиновых волокон // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Вып. 12. №4-3. С. 656…659.

23. *Ершов И.П., Зенитова Л.А., Сергеева Е.А.* Гидрофилизация стекловолокна путем обработки его в высокочастотном емкостном разряде // Новые технологии и материалы легкой промышленности. Казань: КНИТУ, 2013. С. 279…281.

24. *Сагитова Ф.Р., Некрасов И.К., Шарифуллин Ф.С.* Влияние плазмохимических процессов на физико-механические характеристики неорганических и органических волокнистых наполнителей

композиционных материалов // Сб-к трудов X Междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 2024. С. 71.

25. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф.* Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. Казань: Изд-во Казан. технол. ун-та, 2007. 356 с.

26. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во КГУ, 2000. 348 с.

27. *Abdullin I.S., Zheltuhin V.S., Nekrasov, I.K., Sagitova F.R.* Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers // High Energy Chem. V. 57. P. 132…136.

28. *Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К., Сагитова Ф.Р.* Зависимость прочностных характеристик синтетических волокон от состава плазмообразующего газа и времени обработки при воздействии разряда пониженного давления // Перспективные материалы. 2025. № 5. С. 80…88.

REFERENCES

1. *Oladele I., Omotosho T., Adediran A.* Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications // International Journal of Polymer Science. 2020, No. 1. P. 1…12.

2. *Pukánszky B.* Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future // European polymer journal. 2005, V. 41, No. 4. P. 645…662.

3. *Raskutin A.E.* Russian polymer composite materials of the new generation, their development and implementation in promising developed designs // Aviation materials and technologies. 2017, No. 5. P. 349…367.

4. *Kuznetsov V.P., Baumgarten M.I., Nevzorov B.P., Fadeev Yu.A.* Adhesion in composite materials: terms and physical essence // Bulletin of KemSU. 2014, No. 2 (58). P. 173…177.

5. *Ritter A., Sulaiman T., Altitinchi A. etc.* Composite-composite adhesion as a function of adhesive-composite material and surface treatment // Operative dentistry. 2019, V. 44, No. 4. P. 348…354.

6. *Kendall K.* Adhesion and composites // Composite Interfaces. 1996, V. 4, No. 5. P. 299…311.

7. *Chen L., Deng B., Li X., Wang Z.* Structural evolution of UHMWPE gel fibers as high degree plasticized system during stretching: An in-situ wide and small angle X-ray scattering study // Polymer. 2022, V. 255. P. 125149.

8. *Zhang Q., Lan L., Zheng Z., Liu P.* Constructing highly oriented and condensed shish-kebab crystalline structure of HDPE/UHMWPE blends via intense stretching process: Achieving high mechanical properties and in-plane thermal conductivity // Polymer. 2022, V. 241. P. 124532.

9. *Pakhomov P.M., Golikova A.Yu., Khizhnyak S.D.* On the structure of high-strength fibers from ultra-high molecular weight polyethylene obtained by gel-spinning // Chemical fibers. 2006. No. 3. P. 18…23.

10. *Xu B., Wang X., Lu Y.* Surface modification of polyacrylonitrile-based carbon fiber and its interaction with imide // Applied Surface Science. 2006. V. 253, No.5. P. 2695…2701.

11. *Severini F., Formaro L., Pegoraro M., Posca L.* Chemical modification of carbon fiber surfaces // Carbon. 2002, V. 40. No. 5. P. 735…741.

12. *Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O.* Modern technologies for the production and processing of polymer and composite materials // Tambov: TSTU, 2012. 180 p.

13. *Perepelkin K.E.* Polymer fibrous composites, their main types, principles of production and properties // Chemical fibers. 2005. No. 4. P. 7…22.

14. *Kustelman V.N.* Physical methods of modification of polymeric materials. M: Chemistry, 1980. 224 p.

15. *Ershov I.P., Sergeeva E.A., Zenitova L.A., Abdullin I.Sh.* Modification of synthetic fibers and threads. Review // Bulletin of Kazan Technological University. 2012, Vol.15, No.18. P. 136…143.

16. *Astashkina O.V., Bogdan N.F., Lysenko A.A.* Production of activated carbon fibers by solid-phase (chemical) activation // Chemical fibers. 2008, No. 3. P. 8…10.

17. *Voitsenya V.S., Guzhova S.K., Titov V.I.* Effect of low-temperature plasma of electromagnetic radiation on materials. M.: Energoatomizdat, 1991. 224 p.

18. *Maksimov A.I., Gorberg B.L., Titov V.A.* Possibilities and problems of plasma treatment of fabrics and polymeric materials // Textile chemistry. 1992. No. 1. P. 101…118.

19. *Gilman A.B., Potapov V.K.* Plasma-chemical modification of the surface of polymeric materials // Applied Physics. 1995, Issue 3-4. P. 14…22.

20. *Grishanova I.A., Abdullin I.Sh., Zhelonkin Ya.O.* Plasma activation of the surface of reinforced organoplastics // Collection of scientific papers SWorld. 2013, Issue 3, Vol. 12. P. 62.

21. *Garifullin A.R., Abdullin I.Sh., Korneeva N.V. etc.* Study of adhesive properties of hybrid fibers after plasma treatment // Bulletin of Kazan Technological University. 2015, No. 12. P. 64…66.

22. *Abdullina V.Kh., Davletbaev R.S.* Plasma methods of activation of the surface of polyolefin fibers // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010, Issue 12, No. 4-3. P. 656…659.

23. *Ershov I.P., Zenitova L.A., Sergeeva E.A.* Hydrophilization of glass fiber by treating it in a radio-frequency capacitive discharge // New technologies and materials of light industry. Kazan: KNITU Publishing House, 2013. P. 279…281.

24. *Sagitova F.R., Nekrasov I.K., Sharifullin F.S.* Influence of plasma-chemical processes on the physical and mechanical characteristics of inorganic and organic fibrous fillers of composite materials // Collection of works of the X International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry. Ivanovo, 2024. P.71.

25. *Abdullin I. Sh., Zheltukhin V. S., Sagbiev I. R., Shaekhov M. F.* Modification of nanolayers in radio-frequency plasma of low pressure. Kazan: Publishing house of Kazan. technological University. 2007. 356 p.

26. *Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F.* High-frequency plasma-jet processing of materials at low pressures. Theory and practice of application. Kazan: Publishing house of KSU, 2000. 348 p.

27. *Abdullin I.S., Zheltuhin V.S., Nekrasov, I.K., Sagitova F.R.* Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers // High Energy Chem, V. 57. P. 132…136.

28. *Abdullin I.Sh., Nekrasov I.K., Sagitova F.R.* Dependence of the strength characteristics of synthetic fibers on the composition of the plasma-forming gas and the processing time under the influence of a low-pressure discharge // Advanced Materials. 2025. No. 5. P. 80...88.

Рекомендована кафедрой плазмохимических технологий наноматериалов и покрытий КНИТУ. Поступила 14.07.25.