

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 67.017

doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-63-70

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕНТА СОДЕРЖАНИЯ МАТРИЦЫ
В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ
СВМПЭ-ТКАНИ С ПОМОЩЬЮ ПОТОКА
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ**

Фарида Равиловна Сагитова^{1✉}, Фарид Саидович Шарифуллин², Ильдар Шаукатович Абдуллин³

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

³ ООО «Плазма-ВСТ», Казань, Россия

¹ farida_sagitova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9746-4341>

² sharifullin80@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6903-7436>

³ plasma.vst@gmail.com

Аннотация

Выявлена возможность регулирования содержания компонентов композиционного материала: полимерной матрицы (ПМ) и армирующего наполнителя. Установлено, что слабая межфазная адгезия между армирующими волокнами и полимерной матрицей приводит к получению полимерного композиционного материала (ПКМ) с низкими физическим и механическими характеристиками. Для устранения данного недостатка выбран метод воздействия на армирующие материалы – поток низкоэнергетических ионов (ПНЭИ) при пониженном давлении, который позволяет улучшить их капиллярную смачиваемость, создавать условия для прочного взаимодействия с матрицей и регулировать соотношение ПМ – армирующий наполнитель. Поэтому актуальной задачей является исследование соотношения компонентов ПКМ для возможности снижения массы композиционных изделий при сохранении их прочностных характеристик. В качестве объектов исследований выбраны волокна сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марки D800 и ПКМ на основе СВМПЭ тканей и эпоксидной смолы ЭД-20.

Исследование смачиваемости поверхности СВМПЭ волокон по времени растекания капли эпоксидной смолы показало, что после воздействия

ПНЭИ происходит повышении взаимодействия полимерного связующего с волокнистым материалом за счет активации его поверхности при появлении дополнительных функциональных групп. Модификация ПНЭИ приводит к повышению капиллярности СВМПЭ ткани, высота поднятия эпоксидной смолы увеличивается более чем в 5 раз за счет появления гидроксильных групп на поверхности материала. Термомеханические характеристики ПКМ с варьированием содержания полимерной матрицы показали, что применение модифицированных ПНЭИ СВМПЭ тканей в качестве армирующих компонентов позволяет снизить содержание связующего на 10 %, при этом происходит повышение термической устойчивости композита на 5,5 %. Механические характеристики ПКМ на основе модифицированных СВМПЭ тканей имеют повышенные значения. Проведенные исследования позволили установить, что применение ПНЭИ позволяет снизить содержание связующего в ПКМ и при этом получить наилучшие механические характеристики.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, волокна, ткань, поток, низкоэнергетические ионы, смачиваемость, характеристики.

Ссылка для цитирования:

Сагитова Ф.Р. Регулирование процента содержания матрицы в композиционных материалах путем модификации СВМПЭ-ткани с помощью потока низкоэнергетических ионов / Ф.Р. Сагитова, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 11. – С. 63-70. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-63-70.

REGULATING THE PERCENTAGE OF MATRIX CONTENT IN COMPOSITE MATERIALS BY UHMW PE MODIFICATION USING A LOW-ENERGY ION FLOW

Farida Ravilevna Sagitova^{1✉}, Farid Saidovich Sharifullin², Ildar Shaukatovich Abdullin³

^{1,2}Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³Plasma-VST, Kazan, Russia

¹farida_sagitova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9746-4341>

²sharifullin80@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6903-7436>

³plasma.vst@gmail.com

Abstract

The possibility of regulating the content of composite material components that is polymer matrix (PM) and reinforcing filler is revealed. It found out that weak interfacial adhesion between reinforcing fibers and a polymer matrix leads to getting a polymer composite material (PCM) with low physical and mechanical characteristics. To eliminate this drawback, a method of influencing reinforcing materials is chosen – a low-energy ion flow at reduced pressure, which makes it possible to improve their capillary wettability, create conditions for strong interaction with the matrix, and regulate the PM–reinforcing filler ratio. Therefore, an urgent task is to study the ratio of PCM components in order to reduce the weight of composite products while maintaining their strength characteristics. Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW PE) fibers such as D800 and PCM based on UHMW PE and ED-20 epoxy resin are selected as research objects.

A study of the wettability of UHMW PE fiber surface by spreading time of epoxy resin drop has shown that after exposure to the low-energy ion flow, the interaction of the polymer binder with the fibrous

material increases due to activation of its surface when additional functional groups appear. Modification of the low-energy ion flow leads to an increase in the capillarity of UHMW PE material, the height of epoxy resin increases by more than 5 times due to the appearance of hydroxyl groups on the surface of the material. The thermomechanical characteristics of PCM with varying polymer matrix content have shown that the use of modified low-energy ion flow and UHMW PE materials as reinforcing components can reduce the binder content by 10%, while increasing the thermal stability of the composite by 5.5%. The mechanical characteristics of PCM based on modified UHMW PE materials have increased values. The conducted studies allowed to find out that the use of low-energy ion flow makes it possible to reduce the binder content in PCM and at the same time obtain the best mechanical characteristics.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, fibers, material, flow, low-energy ions, wettability, characteristics.

Reference for citing:

Sagitova FR, Sharifullin FS, Abdullin ISh. Regulating the percentage of matrix content in composite materials by UHMW PE modification using a low-energy ion flow. *Transport Engineering*. 2025;11:63-70. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-63-70.

Введение

ПКМ, армированные волокнистыми материалами, нашли широкое применение в конструкционных и функциональных изделиях благодаря высокой удельной прочности, устойчивости к агрессивным средам. Их применение позволяет существенно снизить вес изделий, упростить процесс изготовления и повысить долговечность [1-3].

Однако максимальное использование потенциала армирующих волокон часто ограничено слабой межфазной адгезией между волокнами и полимерной матрицей

[4, 5]. Эта проблема особенно заметна при применении таких материалов, как СВМПЭ, который имеет низкую поверхностную энергию и полностью насыщенные химические связи молекул. При этом СВМПЭ выделяется преимуществом в виде высокой химической инертности, энергоемкости, прочности на разрыв и устойчивости к истиранию [6, 7].

Для преодоления этой проблемы перспективным направлением является обработка поверхности материалов, направленная на улучшение их смачиваемости и

создание прочных связей с матрицей. В текстильной и легкой промышленности для модификации синтетических волокон все чаще применяют электрофизический метод воздействия потоком ПНИЭ при пониженном давлении. Такой метод активизирует поверхность волокон химически и структурно, улучшая их капиллярную смачиваемость и создавая условия для прочного взаимодействия с матрицей [8-10]. На основе полученных результатов появилась

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовались СВМПЭ волокна марки D800, обладающие следующими характеристиками: линейная плотность – 178 текс, предел прочности на разрыв – 0,95 ГПа, относительное удлинение на разрыв – 20 %. Эти параметры делают волокна подходящими для создания высокопрочных ПКМ, применяемых в различных отраслях, включая авиастроение, машиностроение и защитные конструкции.

Для изготовления ПКМ применялись как не модифицированные, так и модифицированные СВМПЭ волокна в качестве армирующих компонентов. Процесс создания композитов осуществлялся с использованием технологии инфузионной пропитки, за которой следовали этапы прессования и термической обработки для формирования конечного материала с заданными свойствами. Такая технология позволяет достичь равномерного распределения матрицы и обеспечить прочное взаимодействие между волокнами и полимерной основой.

Процесс инфузионной пропитки проводился с использованием специализированной установки, включающей вакуумный мешок с интегрированным каналом для равномерного распределения смолы, вакуумный насос *Modular 4S* и резервуар для дегазации и подачи эпоксидной композиции. Вакуумирование системы осуществлялось до достижения давления 0,01 МПа, что обеспечивало удаление воздуха и пузырьков из материала, улучшая качество пропитки. Регулирование процентного содержания полимерной матрицы (ПСМ) в композите достигалось за счет

возможность регулирования соотношения ПМ – армирующий наполнитель.

В связи с этим актуальной является задача поиска минимальной величины соотношения ПМ – армирующий наполнитель, при сохранении прочностных характеристик, что даст возможность существенно снизить общую массу композиционного материала и при этом получить его наилучшие механические характеристики.

приложения давления до 3 МПа, что позволяло точно контролировать соотношение компонентов и, как следствие, свойства конечного материала.

В качестве связующего компонента применялась эпоксидная смола ЭД-20, соответствующая ГОСТ 10587-84, с отвердителем ПЭПА. Доля матрицы в композите варьировалась в диапазоне от 50 % до 70 % по массе, что позволило провести комплексное исследование влияния содержания матрицы на термомеханические и прочностные характеристики ПКМ. Такой подход обеспечил возможность выявления оптимального состава материала для достижения требуемых эксплуатационных свойств.

Модификация СВМПЭ волокон выполнялась на опытно-промышленной плазменной установке, разработанной специально для обработки волокнистых материалов. Подробное описание конструкции, принципов работы и методики обработки приведено в работе [11]. Технологические параметры плазменной обработки были определены на основе предыдущих исследований: давление в вакуумной камере (P) составляло 26,6 Па, расход рабочего газа (аргона) (G_{Ar}) – 0,04 г/с, время воздействия (t) – 180 с [12, 13]. Для оценки влияния энергии ионов на свойства волокон варьировалась мощность разряда (W_p) в диапазоне от 0,3 до 1,8 кВт. Такой подход позволил установить оптимальные условия обработки для достижения максимальной эффективности модификации.

Смачиваемость поверхности СВМПЭ волокон оценивалась по времени растекания капли эпоксидной смолы с использо-

ванием микроскопа *Kruss DSA25e*, оснащенного дозирующим шприцем и высокоскоростной видеокамерой для точной регистрации формы капли. Этот метод позволил количественно оценить взаимодействие смолы с поверхностью волокон, что является ключевым фактором для качества пропитки.

Капиллярные свойства тканей из СВМПЭ определялись в соответствии с ГОСТ 29104.11-91. Высота подъема эпоксидной смолы считалась максимальной, если ее прирост не превышал 1 мм по сравнению с предыдущим измерением. Такой подход обеспечивал точность и воспроизводимость результатов, позволяя оценить способность материала к эффективной пропитке.

Для изучения термомеханических характеристик ПКМ использовался термомеханический анализатор *Netzsch 402 F1* (Германия). Испытания проводились в температурном диапазоне до 400 °С при постоянной нагрузке 1 Н. Основным измеряемым параметром была относительная

деформация (dL/L_0), где L_0 — исходная толщина образца. Кроме того, определялась температура начала термической деформации материала, которая характеризует стабильность межфазного взаимодействия между армирующими волокнами и полимерной матрицей. Эти данные позволили оценить термическую устойчивость композитов и их поведение при повышенных температурах.

Механические характеристики ПКМ исследовались на универсальной испытательной машине *AGS-X (Shimadzu, Германия)* в соответствии с рядом стандартов:

- трехточечный изгиб – ГОСТ Р 56805-2015;
- растяжение — ГОСТ 32656-2017;
- межслойный сдвиг методом короткой балки – ГОСТ 32659-2014.

Эти испытания позволили комплексно оценить прочностные характеристики композитов, включая их способность противостоять различным видам нагрузок, что критически важно для их применения в реальных конструкциях.

Результаты

Одним из показателей эффективности взаимодействия полимерной матрицы с волокнистым армирующим компонентом является время растекания капли по поверхности. Результаты влияния ПНЭИ на время растекания капли эпоксидной смолы (τ) при взаимодействии с поверхностью СВМПЭ волокна представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние мощности разряда при воздействии ПНЭИ ($P = 26,6$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $t = 180$ С) на время растекания капли эпоксидной смолы на поверхности СВМПЭ волокна

Table 1

Effect of the discharge power under the influence of low-energy ion flow ($P = 26,6$ Pa, $G_{Ar} = 0,04$ g/s, $t = 180$ s) on the spreading time of an epoxy resin drop on the surface of UHMW PE fiber

W_p , кВт	τ , с
Без обработки	Более 60
0,30	8,0
0,70	12,0
1,45	7,6
1,80	7,3

Влияние ПНЭИ на смачиваемость СВМПЭ ткани эпоксидной смолой определяли по высоте капиллярного поднятия жидкости (h). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние мощности разряда при воздействии ПНЭИ ($P = 26,6$ Па, $G_{Ar} = 0,04$ г/с, $t = 180$ с) на высоту капиллярного поднятия эпоксидной смолы по поверхности СВМПЭ ткани

Table 2

Effect of the discharge power under the influence of low-energy ion flow ($P = 26,6$ Pa, $G_{Ar} = 0,04$ g/s, $t = 180$ s) on the height of capillary rise of epoxy resin on the surface of UHMW PE material

W_p , кВт	h , см
Без обработки	3
0,30	15,6
0,70	16,3
1,45	17,0
1,80	17,3

Для оценки влияния модификации армирующих тканей на термомеханиче-

ские характеристики ПКМ при изменении ПСМ применен метод термомеханического анализа.

На рис. 1 представлены зависимости изменения термомеханических характеристик ПКМ с немодифицированными СВМПЭ армирующими тканями

СВМПЭ армирующими тканями от ПСМ.

На рис. 2 представлены зависимости изменения термомеханических характеристик ПКМ с модифицированными СВМПЭ армирующими тканями от ПСМ.

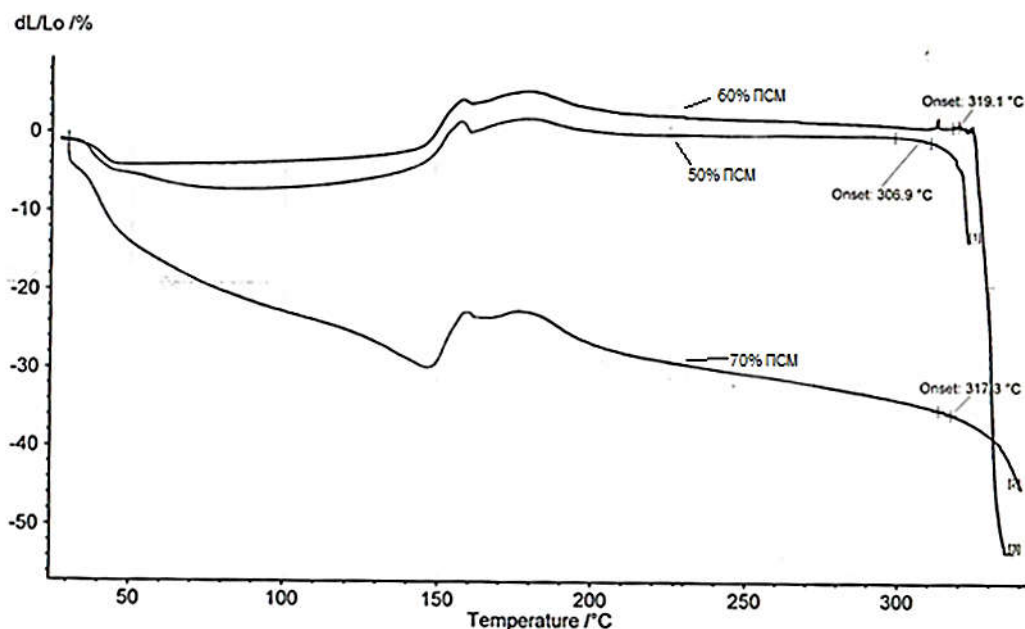


Рис.1. Влияние ПСМ на термомеханические характеристики ПКМ с немодифицированными СВМПЭ армирующими тканями
Fig. 1. The influence of PMC on the thermomechanical characteristics of PCM with unmodified UHMWPE reinforcing fabrics

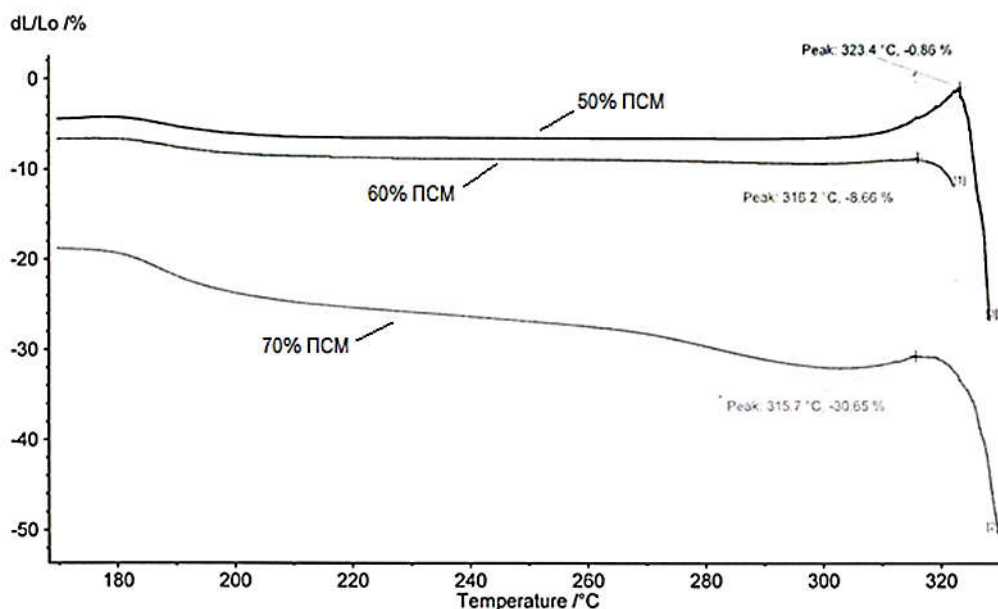


Рис.2. Влияние ПСМ на термомеханические характеристики ПКМ с немодифицированными СВМПЭ армирующими тканями
Fig. 2. The influence of PMC on the thermomechanical characteristics of PCM with unmodified UHMWPE reinforcing fabrics

Для установления влияния снижения ПСМ с 60 до 50 % на эксплуатационные свойства ПКМ определяли их механические характеристики.

В табл. 3 представлены результаты механических испытаний ПКМ с применением армирующих СВМПЭ тканей до и после модификации ПНЭИ.

Effect of low-energy ion flow on the mechanical characteristics of PCM with UHMW PE reinforcing fabrics

ПКМ на основе СВМПЭ ткани	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа
без воздействия ПНЭИ (ПСМ=60)	660	151	4,8
с воздействием ПНЭИ (ПСМ=50)	850	460	13,0

Заключение

По результатам выполненных исследований получены следующие результаты.

Установлен режим модификации ПНЭИ позволяющий повысить смачиваемость поверхности СВМПЭ волокон эпоксидной смолой. Время растекания капли эпоксидной смолы на поверхности СВМПЭ волокна после модификации уменьшается более чем в 8 раз, что свидетельствует о повышении взаимодействия полимерного связующего с волокнистым материалом. Данный эффект связан с активацией поверхности СВМПЭ волокон за счет появления дополнительных функциональных групп в результате воздействия ионов и радикалов при воздействии ПНЭИ.

Исследование капиллярности СВМПЭ ткани показало, что после воздействия ПНЭИ происходит увеличение высоты поднятия жидкости более чем в 5 раз за счет повышения смачиваемости материала и сродства эпоксидной смолы благодаря уменьшению напряжений при появлении гидроксильных групп на поверхности материала.

Улучшение смачиваемости и капиллярности СВМПЭ ткани после воздействия ПНЭИ позволило снизить содержание

матрицы в ПКМ на 10 %, при этом наблюдалось повышение термической устойчивости на 5,5 % и стабильное термомеханическое сопротивление композита на всем диапазоне исследуемых температур. Такие свойства ПКМ проявил благодаря улучшению межфазного взаимодействия между полимерной матрицей и армирующими тканями, модифицированными ПНЭИ и, как следствие, повышению адгезионной прочности между компонентами композита. Это также привело к существенному повышению механических характеристик ПКМ: предел прочности при растяжении увеличился на 28 %, предел прочности при изгибе – более чем в 3 раза, предел прочности при межслойном сдвиге – более чем в 2,7 раза.

Таким образом, проведенные исследования позволили получить данные о влиянии процентного содержания матрицы и метода модификации армирующих компонентов на свойства ПКМ на основе СВМПЭ тканей. Вариация содержания матрицы, плазменная модификация тканей и точное соблюдение технологических параметров обеспечили возможность оптимизации характеристик композитов для различных сфер применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245-256.
2. Pukánszky B. Interfaces and interphases in multi-component 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. Ritter A., Sulaiman T., Altitinch A., Bair E., Baratto-Filho F., Gonzaga C., Correr G. Composite-composite adhesion as a function of adhesive-composite material and surface treatment // Operative dentistry. 2019. V. 44. No. 4. P. 348-354.

5. Kendall K. Adhesion and composites // *Composite Interfaces*. 1996. V. 4. No. 5. P. 299-311.
6. 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 proper-ties and in-plane thermal conductivity // *Polymer*. 2022.V. 241. P. 124532.
7. Пахомов П.М., Голикова А.Ю., Хижняк С.Д. О строении высокопрочных волокон из сверхвысоко-молекулярного полиэтилена, полученных методом гель-формования // *Химические волокна*. 2006. №3. С. 18-23.
8. 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.
9. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш., Корнеева Н.В., Кудинов В.В., Скидченко Е.А. Исследование адгезионных свойств гибридных волокон после плазменной обработки // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. №

12. С. 64-66.
10. 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.
11. 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. 348с.
12. 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.
13. Некрасов И. К., Абдуллин И. Ш., Сагитова Ф. Р. Исследование влияния плазменного воздействия ВЧЕ разряда пониженного давления на аппретированные СВМПЭ-волокна // *Известия ВолгГТУ*. 2025. №2 (297). С.49-56.

REFERENCES

1. Kolosova AS, Sokolskaya MK, Vitkalova IA, Torlova AS, Pikalov ES. Modern polymer composite materials and their application. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;5-1:245-256.
2. Pukánszky B. Interfaces and interphases in multi-component materials: past, present, future. *European Polymer Journ*. 2005;41(4):645-662.
3. Raskutin AE. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviation Materials and Technologies*. 2017;5:349-367.
4. Ritter A, Sulaiman T, Altitinch A, Bair E, Baratto-Filho F, Gonzaga C, Correr G. Composite-composite adhesion as a function of adhesive-composite material and surface treatment. *Operative Dentistry*. 2019;44(4):348-354.
5. Kendall K. Adhesion and composites. *Composite Interfaces*. 1996;4(5):299-311.
6. 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 proper-ties and in-plane thermal conductivity. *Polymer*. 2022;241:124532.
7. Pakhomov PM, Golikova AY, Khizhnyak SD. On the structure of high-strength fibers from ultra-high

- molecular weight polyethylene obtained by gel molding. *Khimicheskie Volokna*. 2006;3:18-23.
8. Maksimov AI, Gorberg BL, Titov VA. Possibilities and problems of plasma machining of fabrics and polymeric materials. *Textilnaya Khimiya*. 1992;1:101-118.
9. Garifullin AR, Abdullin ISh, Korneeva NV, Kudinov VV, Skidchenko EA. Study of adhesive properties of hybrid fibers after plasma treatment. *Bulletin of Technological University*. 2015;12:64-66.
10. Abdullina VKh, Davletbaev RS. Plasma methods of surface activation of polyolefine fibers. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(4-3):656-659.
11. Abdullin ISh, Zheltukhin VS, Kashapov NF. High-frequency plasma-jet treatment of materials at low pressures. Theory and practice of application. *Kazan: KSU Publishing House*; 2000.
12. Abdullin ISh, Nekrasov IK, Sagitova FR. Dependence of strength characteristics of synthetic fibers on the composition of plasma gas and treatment time under the influence of a low-pressure discharge. *Perspektivnye Materialy*. 2025;5:80-88.
13. Nekrasov I. K., Abdullin I. Sh., Sagitova F. R. Investigation of the influence of plasma effect of low-pressure CCP discharge on appretized UHMWPE fibers. *Izvestia VSTU*. 2025;2(297):49-56.

Информация об авторах:

Сагитова Фарида Равилевна – кандидат химических наук, ведущий инженер Казанского национального исследовательского технологического университета, Author-ID-РИНЦ 53190, тел. +79099101070.

Шарифуллин Фарид Саидович – доктор технических наук, профессор Казанского национального

исследовательского технологического университета, Author-ID-РИНЦ 177543, тел. +79276767265.

Абдуллин Ильдар Шаукатович – доктор технических наук, ООО «Плазма-ВСТ», Author-ID-РИНЦ 41737, тел. +79600848084.

Sagitova Farida Ravilevna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Engineer at Kazan National Research Technological University, Author-ID-RSCI 53190, phone: +79099101070.

Sharifullin Farid Saidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor at Kazan National Research Tech-

nological University, Author-ID-RSCI 177543, phone: +79276767265.

Abdullin Ildar Shaukatovich – Doctor of Technical Sciences, Plasma-VST, Author-ID-RSCI 41737, phone: +79600848084.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 06.08.2025; принята к публикации 27.10.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 09.07.2025; approved after review on 06.08.2025; accepted for publication on 27.10.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.