

УДК 539.431:678

DOI 10.17513/snt.40393

## ИЗНОСОСТОЙКИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Сергеева Е.А., Хубатхузин А.А., Даловский К.Д.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,  
Казань, e-mail: prof.sergeeva@gmail.com, al\_kstu@mail.ru, dalovskiykirill@gmail.com

Показано, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен применяется в деталях и узлах триботехнического назначения вследствие уникального сочетания прочностных и эластичных свойств. Выявлена проблема гидрофобности такого полиэтилена, инертности, что препятствует пропитке полимерными матрицами и созданию износостойких композитов. Охарактеризованы ограничения традиционных способов химической активации полиэтилена по причине ресурсозатратности процессов. Выявлена перспективность плазменной модификации и поставлена цель создания физической модели композита с повышенным значением показателя прочности связи между тканым сверхвысокомолекулярным полиэтиленом и эпоксидно-диановой матрицей. Методы исследования: активация холодной плазмой в среде воздуха, оценка смачиваемости методом «сидячей капли», анализ прочности связи с матрицей на разрывной машине до и после активации полиэтилена плазмой, спектроскопия. В результате плазменного воздействия повышено значение показателя смачиваемости поверхности полиэтилена более чем в 3 раза, что позволяет пропитать износостойкий материал матрицей; существенно повышено значение показателя прочности связи исследуемого полиэтилена с эпоксидно-диановым связующим. Установлено, что плазменная модификация способствует формированию азот- и кислород-содержащих групп в поверхностном слое полиэтилена, что повышает его способность к химическому взаимодействию с матрицей, обеспечивает возможность получения устойчивого к нагрузкам композита триботехнического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

**Ключевые слова:** износостойкость, композит, модификация, плазма, прочность, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, смачиваемость

## WEAR-RESISTANT MATERIAL BASED ON ULTRA-HIGH MOLECULE WEIGHT POLYETHYLENE

Sergeeva E.A., Khubatkhuzin A.A., Dalovskiy K.D.

Kazan National Research Technological University, Kazan,  
e-mail: prof.sergeeva@gmail.com, al\_kstu@mail.ru, dalovskiykirill@gmail.com

It is shown that ultra-high molecular weight polyethylene is used in tribotechnical parts and units due to the unique combination of strength and elastic properties. The problem of hydrophobicity of such polyethylene, inertness, which prevents impregnation with polymer matrices and creation of wear-resistant composites is revealed. Limitations of traditional methods of chemical activation of polyethylene due to resource-intensive processes are characterized. The prospects of plasma modification are revealed and the goal is to create a physical model of a composite with an increased value of the bond strength indicator between woven ultra-high molecular weight polyethylene and epoxy-diane matrix. Research methods: activation with cold plasma in air, wettability assessment by the “sessile drop” method, analysis of the bond strength with the matrix on a tensile testing machine before and after polyethylene activation with plasma, spectroscopy. As a result of plasma exposure, the value of the wettability index of the polyethylene surface is increased more than threefold, which allows impregnation of the wear-resistant material with the matrix; the value of the bond strength of the studied polyethylene with the epoxy-diane binder has been significantly increased. It has been established that plasma modification promotes the formation of nitrogen- and oxygen-containing groups in the surface layer of polyethylene, which increases its ability to chemically interact with the matrix, and provides the possibility of obtaining a load-resistant tribological composite based on ultra-high molecular weight polyethylene.

**Keywords:** wear resistance, composite, modification, plasma, strength, ultra-high molecular weight polyethylene, wettability

### Введение

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и композиты с его применением используются в изделиях антифрикционного назначения, в частности в высоконагруженных опорных узлах мостов [1], в деталях трения и уплотнительных элементах техники [2], микроэлектронике и биомедицине [3]. Износостойкие материалы на основе СВМПЭ, вследствие его легкости, имеют повышенную удельную прочность относи-

тельно металлов, угле-, арамидо-, базальто-, стеклопластиков, сочетающуюся с эластичностью, что способствует распределению энергии поверхностных воздействий [4], в том числе при ударных, вибрационных и истирающих нагрузках. Однако проблемой остается обеспечение связи инертного СВМПЭ, стойкого к воздействию кислотно-щелочной активации, с полимерными матрицами, для реализации прочностных свойств в композите.

Для обеспечения связи СВМПЭ с каучуковыми эластомерами применяется введение химических соединений, например дифенилгаунидина, повышающего значение показателя прочности соединения компонентов в композите до трех раз, вследствие влияния вводимого соединения на надмолекулярную структуру СВМПЭ [5]. В случае воздействия комплексом кислот и ультрафиолетовой активации сила связи СВМПЭ с полимерами возрастает до четырех раз, с незначительной потерей прочности на растяжение [6], а при создании многокомпонентных систем СВМПЭ с микроразмерными углеволокнами и твердосмазочными частицами происходит рост сопротивления композита изнашиванию при различных триботехнических воздействиях [7]. Однако сложные химические, физико-химические воздействия и создание многокомпонентных систем усложняют технологию, повышают расход ресурсов в процессах получения композитов на основе СВМПЭ и требуют предварительных комплексных исследований по подбору оптимальных составов компонентов [8, 9].

Известны способы воздействия физического характера на изделия, подвергающиеся трению, например магнитной обработки, применяемой к материалам для упрочнения поверхности и повышения значения показателя износостойкости [10]. Для полимерных высокопрочных материалов целесообразно применение щадящих физических воздействий, например холодной плазмы, способствующей изменению поверхностных свойств материала при приложении определенных режимов плазменной модификации [11]. Действительно, в связи с низкой термостойкостью СВМПЭ воздействие холодной плазмой позволяет исключить деструкционные процессы и нарушение исходных физико-механических свойств материала.

Исследования влияния такой обработки на СВМПЭ демонстрируют возможность повышения прочности связи волокнистого СВМПЭ с эпоксидиановой матрицей и улучшения адгезии к пропиткам и покрытиям, вследствие активации поверхности СВМПЭ [12]. В частности, установлено,

что значение силы, необходимой для выдергивания из матрицы волокна СВМПЭ, активированного холодной плазмой, повышается в 2 раза [13]. Соответственно, актуальны дальнейшие исследования по получению износостойких материалов на основе СВМПЭ с применением холодной плазмы с оценкой ее влияния на изменение свойств поверхности СВМПЭ и механических характеристик композита.

**Цель исследования** – создание физической модели композита (ФМК) с повышенным значением прочности связи между тканым СВМПЭ и эпоксидно-диановой матрицей через: активацию ткани СВМПЭ холодной плазмой; оценку смачиваемости образцов; пропитку матрицей слоев СВМПЭ; оценку прочности связи слоев ФМК; оценку химических изменений.

#### Материалы и методы исследования

Текстильный материал рулонного типа из СВМПЭ (Китай) представляет собой белую ткань с поверхностной плотностью 320 г/м<sup>2</sup>, полотняного плетения, с соотношением 1:1 утка и основы. Активацию СВМПЭ выполняли в плазменной установке «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА» (КНИТУ, Казань) [14], генерирующей высокочастотный разряд емкостного типа. Плазменное воздействие на образцы СВМПЭ осуществлялось в течение 3 и 6 мин в воздушной среде, с предварительным понижением значения давления в камере до 25 Па, подачей воздуха, нагнетаемого в камеру установки с расходом 1500 см<sup>3</sup>/мин, и обеспечением разряда в 1,5 кВт. Для получения ФМК на основе СВМПЭ выполняли пропитку текстиля эпоксидно-диановым связующим ЭД-20 (ГОСТ 10587-84, в настоящее время действует только на территории РФ).

Оценку изменения поверхностных и физико-механических характеристик СВМПЭ до и после активации осуществляли по стандартным методикам [15]. Анализ краевого угла смачивания выполняли методом «сидячей» капли на приборе EasyDrop. Адгезионную взаимосвязь слоев в композите оценивали по ГОСТ 25.601-80 с адаптированным к целям исследования способом подготовки образцов.



Рис. 1. Схема подготовки образца к испытаниям на разрыв  
Источник: составлено авторами

Так, ленты СВМПЭ шириной 3 см, длиной 7 см в количестве 2 шт. пропитывали на 1 см длины ЭД-20 и пропитанными концами накладывали друг на друга, соединяя в единую полосу, где в средней части формируется композит (рис. 1).

После затвердевания смолы образцы разрывали на испытательной машине Shimadzu AGS-X. Химические изменения в образцах СВМПЭ до и после модификации холодной плазмой оценивали с применением инфракрасной (ИК) спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 1202.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для решения проблемы создания износостойких материалов на основе СВМПЭ необходимо обеспечение хорошей адгезии между слоями армирующей СВМПЭ ткани с пропитывающей ее полимерной матрицей, в случае ФМК с матрицей ЭД-20. Прочность соединения компонентов композита обеспечивает высокую стойкость к трению и износу, прочность, долговечность и срок службы изделия. Однако СВМПЭ инертен, в нем отсутствуют функциональные груп-

пы, позволяющие создать монолитный композиционный материал, в котором СВМПЭ и матрица реагируют на нагрузки как единое целое. Плазменная обработка служит активации поверхности СВМПЭ, в результате чего происходит формирование модифицированных приповерхностных слоев с образованием в них химически активных групп. Экспресс-оценка изменения свойств поверхности СВМПЭ после воздействия холодной плазмой производилась по значению показателя краевого угла смачивания (рис. 2, 4).

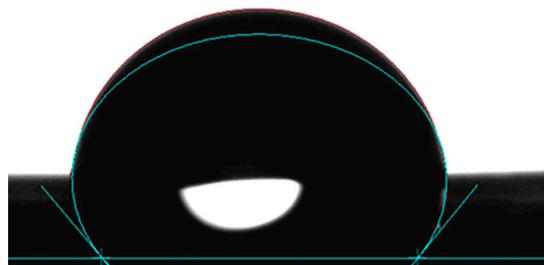


Рис. 2. Краевой угол смачивания исходного образца СВМПЭ  
Источник: составлено авторами

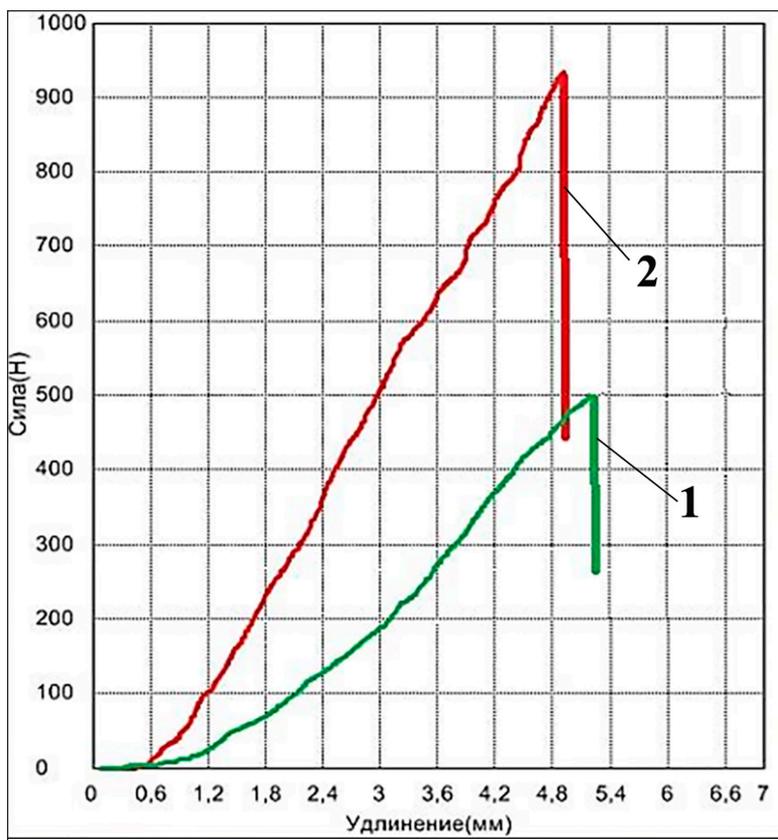


Рис. 3. Графики кривых нагружения образцов:  
1 – СВМПЭ без модификации; 2 – СВМПЭ после модификации в течение 6 мин.  
Источник: составлено авторами

Как видно из рис. 2, исходный образец СВМПЭ имеет краевой угол смачивания более  $120^\circ$ , что позволяет отнести данный материал к супергидрофобным и объясняет сложности смачивания его матрицами и получения устойчивого соединения с ними. На рис. 3, кривая 1, показана сила приложения разрывной нагрузки, необходимой для отрыва необработанных холодной плазмой полос СВМПЭ ткани, пропитанных ЭД-20 по схеме рис. 1, которая составила 500 Н.

Полученные результаты согласуются с ранними исследованиями [11], когда оценивался ФМК из единичного СВМПЭ волокна и эпоксидно-диановой матрицы по значению показателя высоты поднятия полимера по волокну (изменению капиллярности), который продемонстрировал приращение на 141% у активированного плазмой волокна, относительно необработанного материала. Следовательно, образцы СВМПЭ в процессе плазменной активации приобретают гидрофильные свойства, более выраженные при обработке в течение 6 мин, что потенциально обеспечивает более эффективную пропитку СВМПЭ ткани ЭД-20 и повышение значения показателя

прочности связи между пропитанными слоями СВМПЭ.

Действительно, как видно из рис. 3, кривая 2, модельный образец, полученный на основе модифицированного холодной плазмой СВМПЭ по схеме рис. 1, выдерживает нагрузку на разрыв 925 Н, что в 1,85 раз выше, чем у ФМК, полученной по той же схеме, но без активации СВМПЭ.

Соответственно, воздействие на СВМПЭ холодной плазмы позволяет создать модельный композит с ЭД-20, за счет повышения смачиваемости поверхности образца после модификации и существенного приращения стойкости к разрушающим воздействиям. Для выявления механизма плазменной активации СВМПЭ и возможных химических превращений произвели оценку ИК-спектров до и после воздействия холодной плазмы в течение 6 мин (рис. 5).

Согласно рис. 5 после активации СВМПЭ ткани на спектрах регистрируются выраженные полосы поглощения: в области  $1238$  и  $1510$   $\text{см}^{-1}$ , отвечающие колебаниям C-N групп; в области  $3733$   $\text{см}^{-1}$ , отражающие присутствие кислородсодержащих групп (-O-).

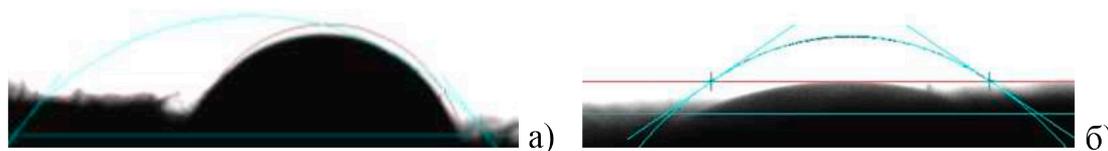


Рис. 4. Диаграмма изменения краевого угла смачивания СВМПЭ после воздействия холодной плазмы: а) образец, обработанный в течение 3 мин; б) образец, обработанный в течение 6 мин. Источник: составлено авторами

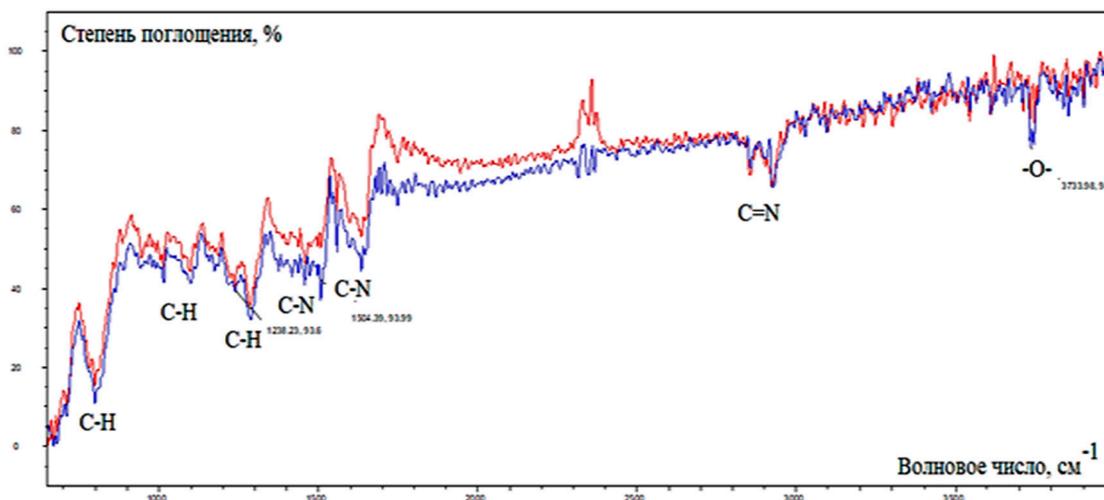


Рис. 5. Фрагмент записи диаграмм ИК-спектров образцов СВМПЭ до и после модификации. Источник: составлено авторами

Результаты, показанные на рис. 5, объясняют положительное влияние воздушной среды холодной плазмы на повышение значения показателя прочности связи компонентов в модельном композите. Так, инертный СВМПЭ, характеризующийся неполярными (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-связями) при воздействии потока воздушной среды в плазменном состоянии, где в ионизированном виде присутствуют кислород- и азот-содержащие соединения, претерпевает бомбардировку данными частицами, обуславливающую разрыв связей в поверхностных слоях СВМПЭ и взаимодействие их с соединениями кислорода и азота плазмы, что обеспечивает формирование на образцах полярных групп, положительно влияющих на смачиваемость поверхности СВМПЭ и прочность соединения компонентов модельного композита.

Результаты исследования физико-механических свойств и ИК-спектроскопии согласуются с данными, полученными на разрывной машине [12], при выдергивании свободного конца моноволокна СВМПЭ из чашечки микрокомпозита с ЭД-20, а также с микрофотографиями поверхности волокна, сделанными на электронном микроскопе [11]. Установлено повышение значения показателя прочности связи моноволокна с ЭД-20 после его обработки в холодной плазме воздушной среды в 2 раза и когезионное распределение полимерной матрицы по поверхности СВМПЭ на микрофотографиях, что в совокупности позволяет рекомендовать холодную плазму для активации СВМПЭ, повышения значения показателя прочности связи с полимерами и получения износостойких композитов.

### Заключение

Таким образом, в ходе теоретического анализа проблемы выявлено, что сочетание прочностных и эластичных свойств в СВМПЭ обеспечивает перспективы его использования в изделиях триботехнического назначения, однако инертность поверхности материала затрудняет использование его в композитах с полимерными матрицами, устойчивых к истирающим воздействиям. Показаны возможные способы повышения значения показателя прочности связи СВМПЭ с матрицами за счет его химической модификации при дополнительном введении активирующих соединений и частиц и создания многокомпонентных систем, что усложняет технологию и повышает затраты ресурсов в процессах получения композитов. Охарактеризованы преимущества холодной плазмы для модификации поверхности

СВМПЭ, подтвержденные экспериментально на ФМК в ходе исследования.

Так, при оценке смачиваемости тканого СВМПЭ по методу «сидячей капли» установлена супергидрофобность поверхности образца до активации и рост смачиваемости в 3,5 раза при воздействии холодной плазмой в течение 6 мин. ФМК, полученная из модифицированного плазмой СВМПЭ, демонстрирует в 1,85 раз более высокое значение показателя прочности связи слоев композита, относительно неактивированного образца, что объясняется формированием дополнительных азот- и кислород-содержащих групп, зарегистрированных по результатам ИК-спектроскопии, при воздействии плазмообразующей воздушной среды. Получение повышенного значения показателя прочности связи в ФМК позволяет рекомендовать холодную плазму для активации инертного СВМПЭ, последующего получения и испытания износостойких изделий в композициях с эпоксидно-диановыми, а также другими полимерными матрицами, в интересах создания уплотнителей, лент, футеровочных изделий, работающих в условиях трения.

### Список литературы

1. Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Гаврильева А.А., Охлопкова Т.А., Борисова Р.В., Дьяконов А.А. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «полимер – волокно» // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2016. № 5 (55). С. 80–92. URL: [https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/struktumye-podrazdeleniya/dnii/vestnik-svfu/arkhiv/arkhiv-2016/Vestnik%205%20\(55\)%202016.pdf](https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/struktumye-podrazdeleniya/dnii/vestnik-svfu/arkhiv/arkhiv-2016/Vestnik%205%20(55)%202016.pdf) (дата обращения: 10.04.2025).
2. Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Окоченникова А.В. Разработка композиционных материалов на основе СВМПЭ и углеродного и базальтового волокон // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. № 29 (4). С. 661–674. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674.
3. Abdul Samad M. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review // Polymers. 2021. № 13 (4). P. 608. DOI: 10.3390/polym13040608.
4. Сергеева Е.А., Тихонова Н.В., Даловский К.Д., Гиладеев А.Р. Быстровозводимые модульные конструкции на основе высокопрочных легких композитов // Перспективы науки. 2024. № 6 (177). С. 138–140. EDN PTLFJL. URL: [http://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/177/science-prospect-6\(177\)-main.pdf](http://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/177/science-prospect-6(177)-main.pdf) (дата обращения: 08.04.2025).
5. Дьяконов А.А., Шадрин Н.В., Соколова М.Д., Федоров А.Л., Слепцова С.А., Охлопкова А.А. Двухслойный композиционный материал на основе эластомера и сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 10 (178). С. 438–441. URL: [https://www.mashin.ru/eshop/journals/uprochnyayuwie-technologie\\_i\\_pokrytiya/2025/23/](https://www.mashin.ru/eshop/journals/uprochnyayuwie-technologie_i_pokrytiya/2025/23/) (дата обращения: 08.04.2025).
6. Dayyoub T., Kolesnikov E., Filippova O.V., Kaloshkin S.D., Telyshev D.V., Maksimkin A.V. The Influences of Chemical Modifications on the Structural, Mechanical, Tribological and Adhesive Properties of Oriented UHMWPE Films // Journal of Composites Science. 2024. № 8 (1). P. 36. DOI: 10.3390/jcs8010036.

7. Панин С.В., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Буслевич Д.Г., Валентюкевич Н.Н. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 88–95. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.11y.
8. Mohammed A.J., Mohammed A.S., Mohammed A.S. Prediction of Tribological Properties of UHMWPE/SiC Polymer Composites Using Machine Learning Techniques // Polymers. 2023. № 15 (20). P. 4057. DOI: 10.3390/polym15204057.
9. Васильев А.П., Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Дьяконов А.А., Оконешникова А.В., Макаров И.С. Износостойкость композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с комбинированным наполнением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 8. С. 76–82. EDN HMERXA. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-76-82.
10. Бурлаченко О.В., Фоменко Н.А., Ляшенко А.А., Рисунов А.Р. Исследование износостойкости и микротвердости валов в зависимости от технологических режимов обработки на основе поверхностно-пластического деформирования в переменном магнитном поле // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 3. С. 14–19. DOI: 10.17513/snt.40318.
11. Сергеева Е.А., Абдуллин И.Ш. Влияние высокочастотного разряда пониженного давления на свойства ВВПЭ волокон // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 2. С. 84–89. EDN KDMYZF.
12. Saitaer X., Wang J., Gao Q., Li Y., Sun J., Cao J., Wang Y., Liu Z., Liu X. Preparation of Superhydrophobic Flame-Retardant UHMWPE Fabrics with Excellent Mechanical Stability by Simple Coating Method // Coatings. 2025. Vol. 15, Is. 4. P. 366. DOI: 10.3390/coatings15040366.
13. Сергеева Е.А., Ибатуллина А.Р., Кадыров Ф.Ф. Повышение адгезионной способности сверхвысокомолекулярного полиэтиленового волокна с помощью плазменной обработки // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 17. С. 123–126. EDN PGQVAL.
14. Khubatkhuzin A.A., Sharifullin F.S., Shaechov M.F. Polymer Composite Materials with Dispersive Fillers Modified in a Gas Discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2379, Is. 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2379/1/012004.
15. Букина Ю.А., Сергеева Е.А. Методы контроля качества текстильных материалов. Определение физико-механических характеристик и поверхностных свойств // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 11. С. 49–54. EDN OZOURJ.