

*В. Ф. Каблов, О. М. Новопольцева, Н. А. Кейбал, Д. А. Крюкова
В. Г. Кочетков, М. И. Шестернин-Гаевой*

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ МИКРОВОЛОКОН
ФОСФОРОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ
В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
НА СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия**

✉ Дарья Алексеевна Крюкова, dasha.antarius@yandex.ru

Аннотация. Исследовано влияние обработки кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой в присутствии элементарорганических соединений на свойства огнетеплозащитных материалов. Установлено, что обработка микроволокон плазмой в среде модификатора приводит к повышению огнетеплозащитных свойств эластомерных материалов за счет усиления взаимодействия в системе «волокно – каучук» и более равномерного распределения микроволокон в эластомерной матрице.

Ключевые слова: эластомеры, резины, кварцевые микроволокна, межфазное поверхностное натяжение, низкотемпературная плазма, огнетеплозащитный материал

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта № 45/655-24.

Для цитирования: Каблов В. Ф., Новопольцева О. М., Кейбал Н. А., Крюкова Д. А., Кочетков В. Г., Шестернин-Гаевой М. И. Влияние модификации минеральных микроволокон фосфорорганическими соединениями в условиях низкотемпературной плазмы на свойства эластомерных материалов. Известия ВолгГТУ. 2025; 12(307): 137–144. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-137-144.

Информация об авторах:

Виктор Федорович Каблов – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ВТПЭ ВПИ (филиал) ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-2970-6109>

e-mail: vkablov5@gmail.com

Оксана Михайловна Новопольцева – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ВТПЭ ВПИ (филиал) ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0003-0622-7073>

e-mail: novopoltsceva@yandex.ru

Наталья Александровна Кейбал – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ВТПЭ ВПИ (филиал) ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-7168-7087>

e-mail: keibal@mail.ru

Дарья Алексеевна Крюкова – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. управления науки и инноваций ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0003-3789-7002>

e-mail: dasha.antarius@yandex.ru

Владимир Григорьевич Кочетков – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. управления науки и инноваций ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-9829-0135>

e-mail: geminy-i@mail.ru

Михаил Иванович Шестернин-Гаевой – студент-магистрант кафедры ВТПЭ ВПИ (филиал) ВолгГТУ

e-mail: shesternin.misha@mail.ru

Вклад авторов:

В. Ф. Каблов – разработка рецептур, постановка задач, редакция текста статьи.

О. М. Новопольцева – разработка рецептур, постановка задач, редакция текста статьи.

Н. А. Кейбал – анализ полученных данных, проведение расчетов, редакция текста статьи.

Д. А. Крюкова – огневые испытания образцов полимеров, написание текста статьи.

В. Г. Кочетков – физико-механические испытания образцов полимеров, редакция текста статьи.

М. И. Шестернин-Гаевой – наработка и пробоподготовка образцов полимеров, редакция текста статьи.

Эластомерные материалы широко применяются в нефтегазовой, ракетной, авиационной и морской отраслях, включая специализированные конструкции, функционирующие в экстремальных температурных условиях. В авиационном строительстве разрабатываются композиционные полимерные материалы с пониженной теплопроводностью и плотностью, что позволяет снизить вес конструкций, расход топлива и вредные выбросы [1].

Одним из наиболее перспективных и научно-обоснованных методов поверхностной модификации микродисперсных наполнителей и полимерных матриц является обработка низкотемпературной плазмой, что открывает новые возможности для дифференцированного изменения их характеристик и расширения потенциала применения. Плазменная обработка улучшает адгезию за счет очистки и функционализации поверхности, образуя карбонильные, спиртовые, перекисные, аминные и другие

группы. Кроме того, плазмохимические методы имеют преимущество перед химической модификацией, которая требует использования агрессивных реагентов, таких как кислоты, гидроксиды и щелочи [2–3].

Применение минеральных микродисперсных наполнителей, в том числе волокнистых, является одним из наиболее действенных способов повышения эффективности огнетеплозащитных материалов за счет формирования более прочного мелкопористого пенококса после высокотемпературного воздействия. Однако введение микроволокон сопряжено с рядом сложностей, таких как ухудшение физико-механических характеристик за счет их склонности к агломерации и плохому распределению в эластомерной матрице. Введение коротких волокнистых наполнителей в состав эластомерных материалов, в контексте разработки новых высокоэффективных огнетеплозащитных покрытий, является оправданной стратегией, по-

сколькx позволяет увеличить прочность защитного коксового слоя в условиях воздействия высокотемпературных скоростных газовых потоков благодаря эффекту микроармирования. При этом микроволокна предотвращают уносу кокса с поверхности эластомерного материала газовым потоком, исключая беспрепятственное разрушение все новых слоев материала, что обеспечивает более длительное время эксплуатации огнетеплозащитного покрытия.

Для улучшения совместимости и равномерного распределения наполнителей предлагается модифицировать их поверхность неравновесной низкотемпературной плазмой газовых разрядов в среде фильтрованного воздуха. Для обеспечения стабильности режима плазменного разряда и предотвращения загрязнения обрабатываемого материала важно обеспечить чистоту рабочей среды, поэтому воздух предварительно фильтруют, например, от механических примесей (пыли) или органических загрязнений, которые могут вступать в нежелательные реакции при воздействии плазмы. Однако для повышения огнетеплозащитной эффективности возможно введение элементарного органического модификатора в разряд плазмы, что приводит к увеличению образования функционально-активных групп на поверхности микроволокон, влияющих на комплекс свойств материала.

В рамках исследования использовались кварцевые микроволокна ТКВ (ТУ 6-48-5786902-78-91), измельченные в настольной мельнице тонкого помола с водяным охлаждением RT-UF26W и просеянные в ситовом анализаторе с виброприводом ВП-300Т. Модифицировались микроволокна низкотемпературной плазмой с помощью настольной вакуумной системы MD-20ST. Система позволяет генерировать плазму с контролируемым химическим составом в среде фильтрованного воздуха и паров модификатора. Параметры обработки: частота импульсов составляла 40 кГц, мощность разряда изменялась от 100 до 600 Вт, а время обработки – от 1 до 10 минут.

Целью работы являлось изучение влияния обработки кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой в присутствии элементарно-органических соединений на свойства огнетеплозащитных материалов на основе этиленпропилендиенового каучука СКЭПТ-40, содержащего 30 масс. ч. наполнителя (БС-120) и серную вулканизирующую группу.

В качестве элементарно-органических соединений использовались синтезированные на ка-

федре ВТПЭ Волжского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» диметилкарбамил(диаминометил)фосфорамид (ДДФ) и азотфосфорборорганическое соединение (АФБ). ДДФ получают путем взаимодействия дициандиамида с диметилфосфитом в растворе фосфорной кислоты [4], а АФБ – это продукт взаимодействия нитрилотриметилфосфоновой кислоты, диэтиленгликоля и борной кислоты [5].

Изготовление резиновой смеси выполнялось на микросмесителе РС-0,2 согласно ГОСТ 30263-96. Вулканизационные характеристики определяли по ГОСТ Р 54547-2011 на реометре MDR 3000 Professional, а вулканизацию осуществляли в прессе Carver при 165 °С в течение 40 минут. Упруго-прочностные свойства вулканизатов оценивали по ГОСТ ISO 37-2020 с помощью настольной разрывной машины SHIMADZU AG-Xplus (1 кН).

Степень взаимодействия каучук – наполнитель оценивали по эффекту Пейна (ΔG), представляющему разность динамических модулей упругости при деформациях 0,1–40 %, на реометре MDR 3000 Professional. Эффект Пейна зависит от типа и структуры наполнителя, включая доступность его поверхности для взаимодействия. Меньший эффект Пейна указывает на лучшее распределение наполнителя и снижение взаимодействия между его частицами. Однородность распределения ингредиентов определяли на анализаторе распределения углеродной сажи GT-505-CBD (диспергестере) по ISO 11345-1997. Принцип работы анализатора основан на оптическом методе определения дисперсности частиц в каучуке, что делает его применимым не только для углеродной сажи, но и для других наполнителей, включая белую сажу (диоксид кремния).

Параметры теплостойкости оценивали по зависимости температуры на необогреваемой поверхности образца от времени воздействия пламени плазмотрона «Мультиплаз 3500», при этом температура на поверхности образца достигала 2000 °С. Температуру на обогреваемой и необогреваемой поверхности образца определяли с помощью пирометра марки С-300.3 «Фотон» (ГОСТ 28243-96). Скорость линейного горения оценивали по ГОСТ 12.1.044-2018, влияние целевых добавок на увеличение коксового остатка – по ОСТ 92-0903-78 с помощью камерной атмосферной печи с возможностью подачи газа STQ-8-12 (в среде воздуха).

Эрозионную стойкость образцов оценивали по прочностным характеристикам кокса, в условиях высокотемпературного центробежного воздействия, а также по времени возгорания и времени начала отслаивания кокса. Испытания проводили согласно методике № МТИ-13, разработанной на кафедре ВТПЭ ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ВолгГТУ» в рамках выполнения договора по теме «Барьер» с АО «ЦНИИСМ». Для вращения образца использовалось устройство ЭР 0118 с электродвигателем, позволяющим получать число оборотов до 3000 об/мин. Под действием центробежной силы, имитирующей эрозионное действие высокоскоростного газового потока, частицы кокса отрываются и задерживаются защитным кожухом. За время испытания фиксировалось время начала возгорания образца и время начала отслаивания кокса. Затем определялся диаметр образца после испытания. Продеструктурировавший слой удаляли и определяли толщину недеструктурировавшего слоя. Прочностные характеристики кокса определяются с учетом усилий на отрыв, реализуемых на границе слоя кокса и неразложившегося материала в момент отрыва слоя кокса под действием центробежных сил при вращении цилиндрического образца с постоянной скоростью по мере его высокотемпературного нагрева в пламени плазматрона. Прочность прококсированного слоя на отрыв определялась на единицу поверхности по формуле:

$$\sigma = \frac{2 \cdot (\pi \cdot \omega)^2 \cdot (R_0^2 - R^2) \cdot \rho_k}{(R_0 - R)^2},$$

где ω – угловая скорость, об/с; R_0 – начальный радиус, мм; R – радиус до границы пиролизного слоя по которому происходит отрыв, мм; ρ_k – плотность кокса кг/м³.

Ранее были проведены исследования влияния режимов модификации поверхности кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой на характер взаимодействия их поверхности с полимерной матрицей на основе этиленпропилендиенового каучука [6]. Установлено, что оптимальным является обработка в течение 7 минут при мощности воздействия 300 Вт. Данный режим модификации позволяет максимизировать величину коксового остатка материала при высокотемпературном воздействии и увеличить прочность кокса, что позволит повысить эффективность работы огнетеплозащитного материала.

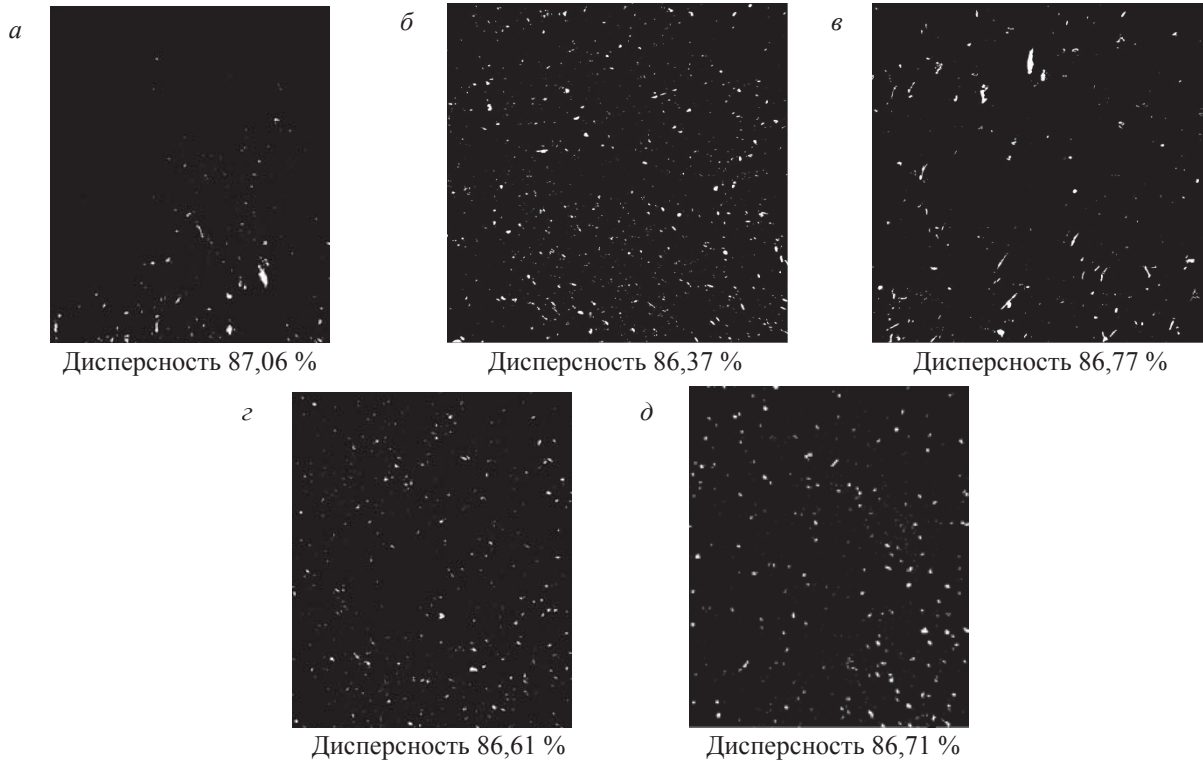
Поэтому в качестве образцов сравнения были выбраны: материал, не содержащий микроволокон и модификаторов (контрольный образец); материал, содержащий 10 масс. ч. необработанного кварцевого микроволокна (МКВ-10); материал, содержащий 10 масс. ч. кварцевого микроволокна, предварительно обработанного плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут (МКВ-10-7'). Обработка образцов модификатором АФБ происходила непосредственно в камере плазменной установки путем испарения его 5 %-ного водного раствора и впрыска образовавшегося пара в разряд плазмы (МКВ-10-7'-АФБ). Аналогично проводилась обработка модификатором ДДФ (МКВ-10-7'-ДДФ).

Исследования воздействия низкотемпературной плазмы на кварцевые микроволокна ТКВ и введение в разряд плазмы модификаторов АФБ и ДДФ (таблица) показали, что вулканизационные характеристики всех резиновых смесей изменяются незначительно. Наблюдается снижение оптимального времени вулканизации у образца МКВ-10-7' на 13 % по сравнению с контрольным образцом. При этом введение в состав резиновых смесей кварцевых микроволокон, предварительно обработанных плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут, повышает значение эффекта Пейна на 15 %, что свидетельствует об ухудшении однородности распределения наполнителя в эластомерной матрице. Однако модификация микроволокон низкотемпературной плазмой в присутствии элементоорганических соединений снижает этот показатель до уровня контрольного образца, что на 12 % ниже для образца МКВ-10-7'-ДДФ по сравнению с немодифицированным образцом МКВ-10-7' и на 15 % ниже для образца МКВ-10-7'-АФБ.

Исследования степени диспергирования ингредиентов на анализаторе распределения углеродной сажи GT-505-CBD показали, что величина дисперсности для всех образцов остается на одном уровне (см. рисунок). Однако, по изображениям диспертестера, видно, что при близком суммарном содержании областей неоднородного распределения ингредиентов при смешении (то есть участков белого поля) на фотографии образца МКВ-10-7' частицы наполнителя собраны в более крупные агломераты. При этом изображение диспертестера для образца МКВ-10-7'-АФБ характеризуется более мелкими областями белого поля, чем для образца МКВ-10-7'-ДДФ.

Влияние совместной модификации кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой и элементоорганическими соединениями на свойства резиновых смесей и вулканизатов

Показатели	Контрольный образец	МКВ-10	МКВ-10-7'	МКВ-10-7'-АФБ	МКВ-10-7'-ДДФ
Дозировка кварцевых микроволокон ТКВ, масс. ч.	-	10	10	10	10
Дозировка модификатора АФБ, масс. ч.	-	-	-	3	-
Дозировка модификатора ДДФ, масс. ч.	-	-	-	-	3
Вулканизационные характеристики резиновых смесей					
Оптимальное время вулканизации, мин	28,52	27,10	24,76	27,54	27,65
Максимальная скорость вулканизации, Н·м/мин	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Эффект Пейна $\Delta G'$, кПа	85,87	87,80	98,43	85,24	87,82
Упруго-прочностные свойства вулканизатов (165 °С, 40 мин)					
Условная прочность при растяжении, МПа	10,3	10,8	14,1	14,3	14,1
Относительное удлинение при разрыве, %	643	640	610	610	620
Относительное остаточное удлинение после разрыва, %	20	18	16	14	16
Огнестеплозащитные свойства вулканизатов					
Время прогрева необогреваемой поверхности образца до 100 °С, $t_{T \rightarrow 100^\circ \text{C}}, \text{с}$	200	300	460	480	470
Скорость линейного горения, мм/с	0,688	0,423	0,310	0,324	0,339
Коксовый остаток, %	19,68	26,48	26,82	29,97	28,74
Время начала отслаивания кокса, с	22	32	46	50	47
Прочность кокса на отрыв, МПа/м ²	37,3	40,5	67,92	71,3	70,4



Влияние режима обработки кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой на степень их диспергирования в резиновой смеси:

а – контрольный образец; б) образец, содержащий 10 масс. ч. волокна; в – образец, содержащий 10 масс. ч. волокна, обработанного плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут; г – образец, содержащий 10 масс. ч. волокна, обработанного плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут совместно с модификатором АФБ; д – образец, содержащий 10 масс. ч. волокна, обработанного плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут совместно с модификатором ДДФ

Теплозащитные свойства вулканизатов оценивали по времени прогрева необогреваемой поверхности образца до 100 °С (см. таблицу). Установлено, что все исследуемые образцы характеризуются увеличением времени прогрева. Однако с введением в состав резиновых смесей кварцевого микроволокна, предварительно обработанного плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут в среде модификатора АФБ, время прогрева увеличивается в большей степени (в 2,4 раза по сравнению с контрольным образцом и на 5 % по сравнению с немодифицированным образцом). Наблюдается снижение скорости линейного горения для образцов, обработанных плазмой как в среде фильтрованного воздуха, так и в среде модификаторов, в среднем в 2,1 раз.

Аналогично модификация микроволокон влияет на показатель коксового остатка и прочность кокса на отрыв при эрозионном воздействии: происходит увеличение КО на 35–52 % и упрочнение коксовой структуры на 82–91 % по сравнению с контрольным образцом и на 68–76 % по сравнению с МКВ-10.

Наполнение резиновых смесей кварцевым микроволокном ТКВ повышает стойкость защитного кокса, образовавшегося при высокотемпературном воздействии, к эрозионному уносу (время начала отслаивания кокса увеличивается с 22 секунд для контрольного образца до 32 секунд для образца МКВ-10). Плазменная обработка волокон в среде воздуха повышает этот показатель до 46 секунд благодаря увеличению степени взаимодействия микроволокон с эластомерной матрицей, что связано не только с очисткой поверхности от различного рода загрязнений, но и с ее функционализацией – образованием на поверхности карбонильных, спиртовых, перекисных, аминных и прочих групп. Это происходит за счет разрушения под воздействием плазмы поверхностных связей и перестройки поверхностной структуры, а также за счет образования радикалов и их вступления в реакции с компонентами плазменной среды. Модификация микроволокон АФБ позволяет еще увеличить время начала отслаивания кокса до 50 секунд не только за счет повышения взаимодействия в системе «волокно – каучук», но и за счет более равномерного распределения микроволокон в объеме материала.

Таким образом, в ходе исследования изучено влияние обработки кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой в присутствии элементоорганических соединений на свойства

резиновых смесей и вулканизатов на основе этиленпропилендиенового каучука СКЭПТ-40. Установлено, что обработка кварцевых микроволокон ТКВ плазмой мощностью 300 Вт в течение 7 минут в среде 5 %-ного водного раствора азотфосфорборорганического соединения АФБ увеличивает их теплозащитную эффективность при высокотемпературном воздействии в 2,4 раза за счет более однородного распределения в эластомерной матрице. Кроме того, при воздействии высокотемпературных газовых потоков стойкость образца МКВ-10-7'-АФБ к эрозионному уносу больше в 2,3 раза за счет повышения взаимодействия между волокном и эластомерной матрицей, что упрочняет защитный коксовый слой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Zaikov, G. E., Kalugina E. V., Gumargalieva K. Z.* Fundamental regularities of thermal oxidation of heat-resistant heterochain polymers – Thermal Stability of Engineering Heterochain Thermoresistant Polymers – Utrecht, Boston, 2004. – 280 p.
2. *Gilman, A. B., Kuznetsov A. A., Ozerin A. N.* Modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers and powders using low-temperature plasma / Russian Chemical Bulletin. – 2017. – Vol. 66. № 4. – P. 577–586. DOI 10.1007/s11172-017-1776-x.
3. *Провоторова, Д. А.* Модификация непредельных каучуков в низкотемпературной плазме как способ улучшения их адгезионных свойств / Д. А. Провоторова, В. Ф. Каблов, А. Н. Озерин [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. – 2013. – № 9. – С. 06–08. – EDN RCDONV.
4. *Каблов, В. Ф.* Модификатор на основе дициандиамида и диметилфосфита для огнетеплоустойких эластомерных материалов / В. Ф. Каблов, В. Г. Кочетков, Н. А. Кейбал [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95, № 5. – С. 596–603. – DOI 10.31857/S004446182205005X. – EDN DIQVUZ.
5. Патент № 2837040 С1 Российская Федерация, МПК C08L 23/16, C08K 3/06, C08K 3/04. Теплозащитный материал : заявл. 22.07.2024 : опубл. 25.03.2025 / В. Ф. Каблов, О. М. Новопольцева, Н. А. Кейбал [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет". – EDN UTMWJ.
6. Исследование влияния режимов обработки микродисперсных компонентов низкотемпературной плазмой на свойства эластомерных огнетеплозащитных материалов / В. Ф. Каблов, В. Г. Кочетков, Н. А. Кейбал [и др.] // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 9. – С. 738–742. – DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-9-738-742. – EDN LAPOMS.

REFERENCES

1. *Zaikov, G. E., Kalugina E.V., Gumargalieva K.Z.* Fundamental regularities of thermal oxidation of heat-resistant heterochain polymers – Thermal Stability of Engineering Heterochain Thermoresistant Polymers – Utrecht, Boston, 2004 – 280 p.
2. *Gilman, A. B., Kuznetsov A.A., Ozerin A.N.* Modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers and powders using low-temperature plasma / Russian Chemical Bulletin. – 2017. – Vol. 66. №4. pp. 577–586. DOI 10.1007/s11172-017-1776-x.

3. Modifikatsiya nepredelnikh kauchukov v nizkotemperaturnoi plazme kak sposob uluchsheniya ikh adgezionnykh svoystv / D. A. Provotorova, V. F. Kablov, A. N. Ozerin [i dr.] // Klei. Germetiki. Tekhnologii. – 2013. – № 9. – S. 06-08. – EDN RCDOHV.

4. Modifikator na osnove ditsiandiamida i dimetilfosfita dlya ogneplostoikikh elastomernikh materialov / V. F. Kablov, V. G. Kochetkov, N. A. Keibal [i dr.] // Zhurnal prikladnoi khimii. – 2022. – T. 95, № 5. – S. 596–603. – DOI 10.31857/S004446182205005X. – EDN DIQVUZ.

5. Patent № 2837040 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK C08L 23/16, C08K 3/06, C08K 3/04. Teplozashchitnyy materi-

al : zayavl. 22.07.2024 : opubl. 25.03.2025 / V. F. Kablov, O. M. Novopoltseva, N. A. Keibal [i dr.] ; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie visshego obrazovaniya "Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet". – EDN UTMWJ.

6. Issledovanie vliyaniya rezhimov obrabotki mikrodispersnykh komponentov nizkotemperaturnoi plazmoi na svoystva elastomernikh ogneplozashchitnykh materialov / V. F. Kablov, V. G. Kochetkov, N. A. Keibal [i dr.] // Vestnik mashinostroeniya. – 2025. – T. 104, № 9. – S. 738-742. – DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-9-738-742. – EDN LAPOMS.

**V. F. Kablov, O. M. Novopoltseva, N. A. Keibal, D. A. Kryukova
V. G. Kochetkov, M. I. Shesternin-Gaevoy**

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE INTRODUCTION OF ORGANOELEMENT MODIFIERS DURING THE TREATMENT OF MINERAL MICROFIBERS WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA ON THE PROPERTIES OF THE MATERIAL

**Volzhsky polytechnic institute (branch)
Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia**

✉ Daria A. Kryukova, dasha.antarius@yandex.ru

Abstract. The effect of the joint modification of quartz microfibers by low-temperature plasma and organoelement compounds on the properties of fire-protective materials has been studied. It has been established that the treatment of microfibers with plasma in a modifier medium leads to an increase in the fire and heat protection properties of materials due to increased interaction in the fiber–rubber system and a more uniform distribution of microfibers in the elastomeric matrix.

Keywords: elastomers, rubbers, quartz microfibers, interfacial surface tension, low-temperature plasma, fire-proof material

Funding: The study was carried out with the financial support of Volgograd State Technical University (from the funds of the Priority 2030 development program under agreement No. 075-15-2025-063) within the framework of scientific project No. 45/655-24.

For citation: Kablov V. F., Novopoltseva O. M., Keibal N. A., Kryukova D. A., Kochetkov V. G., Shesternin-Gaevoy M. I. Investigation of the effect of the introduction of organoelement modifiers during the treatment of mineral microfibers with low-temperature plasma on the properties of the material. Izvestiya VSTU. 2025; 12(307): 137–144. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-137-144.

Information about the Authors:

Viktor F. Kablov – Dr. Sci. (Tech), Professor, Professor of the Department of VTPE VPI (branch) VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-2970-6109>

e-mail: vkablov5@gmail.com

Oksana M. Novopoltseva – Dr. Sci. (Tech), Associate Professor, Professor of the Department of VTPE VPI (branch) VSTU

<https://orcid.org/0000-0003-0622-7073>

e-mail: novopoltseva@yandex.ru

Natalia A. Keibal – Dr. Sci. (Tech), Associate Professor, Head of the Department of VTPE VPI (branch) VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-7168-7087>

e-mail: keibal@mail.ru

Daria A. Kryukova – Cand. Sci. (Tech), Senior Researcher of the Department of Science and Innovations of VSTU

<https://orcid.org/0000-0003-3789-7002>

e-mail: dasha.antarius@yandex.ru

Vladimir G. Kochetkov – Cand. Sci. (Tech), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Science and Innovations of VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-9829-0135>

e-mail: geminy-i@mail.ru

Mikhail I. Shesternin-Gaevoy – master's degree student of the Department of VTPE VPI (branch) VSTU

e-mail: shesternin.misha@mail.ru

Contribution of the authors:

Viktor F. Kablov – formulation development, task assignment, editing the text of the article.

Oksana M. Novopoltseva – formulation development, task assignment, editing the text of the article.

Natalia A. Keibal – analysis of the obtained data, performing calculations, editing the text of the article.

Daria A. Kryukova – fire testing of polymer samples, editing the text of the article. writing the text of the article.

Vladimir G. Kochetkov – physical-mechanical testing of polymer samples, editing the text of the article.

Mikhail I. Shesternin-Gaevoy – development and sample preparation of polymer samples, editing the text of the article.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025 г., доработана 18.11.2025 г., подписана в печать 03.12.2025

The article was submitted 27.10.2025, revised 18.11.2025, accepted for publication 03.12.2025