

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ
КВАРЦЕВЫХ МИКРОВОЛОКОН НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ
НА СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ ОГНЕТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

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

*E-mail: dasha.antarius@yandex.ru

Исследовано влияние мощности разряда и времени обработки поверхности кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой на величину межфазного натяжения и адгезию на границе раздела «каучук – микроволокно». Установлено, что введение кварцевых микроволокон, модифицированных плазмой, улучшает основные эксплуатационные свойства материалов (вулканизационные, упруго-прочностные, огнетеплозащитные).

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

Огнетеплозащитные эластомерные материалы (ОТЗМ) «жертвенного» назначения применяются для защиты конструкций от высокотемпературного воздействия [1].

Широкое применение нашли огнетеплозащитные материалы на основе бутадиен-нитрильного (БНКС) [2] и этиленпропилендиенового (СКЭПТ) каучуков [3]. Однако именно этиленпропилендиеновые каучуки являются одними из самых универсальных и перспективных типов синтетических каучуков для изделий с фиксированной массой. Одним из важнейших преимуществ СКЭПТ является его низкая плотность ($\rho = 850\text{--}870 \text{ кг/м}^3$), что обуславливает его применение в авиакосмической технике [5].

Кроме того, СКЭПТ характеризуется превосходным сопротивлением как низким, так и высоким температурам (теплостойкость СКЭПТ на $50\text{--}70^\circ\text{C}$ выше теплостойкости каучуков общего назначения), стойкостью к окислению, действию озона и погодному старению (обосновывающая длительное хранение), стойкостью к действию полярных сред, отличными диэлектрическими свойствами в сочетании с технико-экономическими показателями [4]. В то же время теплозащитная функция связана с тепловыми затратами на термодеструкцию каучука. В этом плане материалы на основе СКЭПТ имеют существенное преимущество перед материалами на основе бутадиен-нитриль-

© Каблов В. Ф., Новопольцева О. М., Кейбал Н. А., Крюкова Д. А., Кочетков В. Г., Шестернин М. И., 2024.

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта № 45/655-24».

ных каучуков, в которых термические превращения сопровождаются значительными эффектами структурирования и циклизации. Кроме того, СКЭПТ изготавливается из относительно недорогого сырья, что повышает экономическую эффективность производства огнетеплозащитных материалов на его основе.

Для повышения огнетеплозащитной эффективности материалов на основе СКЭПТ используются минеральные микроволокнистые наполнители, в присутствии которых увеличивается прочность защитного коксового слоя за счет эффекта микроармирования [6]. Однако СКЭПТ характеризуется низкими значениями поверхностной энергии, что затрудняет формирование адгезионных связей с субстратами минеральной природы. Для повышения совместимости СКЭПТ с минеральным наполнителем используют различные модифицирующие агенты, которые способствуют образованию, как в структуре эластомера, так и на поверхности наполнителя, реакционноспособных функциональных групп. Такими соединениями являются бифункциональные органосиланы, которые применяют в качестве сшивающих агентов, агентов сочетания и промоторов адгезии [7].

В качестве альтернативы традиционным методам модификации волокнистых наполнителей особую значимость приобретают плазменные методы обработки, представляющие собой воздействие на материалы плазмы газовых разрядов: тлеющего, барьерного, коронного, искрового, дугового, высокочастотного и сверхвысокочастотного [8].

Обработка неравновесной низкотемпературной плазмой является экологически безвредной, высокоэффективной и менее затратной по сравнению с традиционными методами химической и физической модификации полимерных материалов [9]. Она позволяет изменять свойства очень тонкого приповерхностного слоя материала, сохраняя механические и физико-химические свойства массы материала. В результате такой обработки происходит улучшение адгезионных свойств поверхности микроволокон, что связано не только с очисткой поверхности от различного рода загрязнителей, замасливателей и т. д., но и с образованием гидрофильных групп различной химической природы, обеспечивающих высокие адгезионные свойства модифицированных поверхностей. Состав, структура и свойства таких полярных групп зависят как от природы обра-

батываемого материала, так и от свойств плазмы и природы плазмообразующего газа. Под воздействием плазмы поверхность материала может становиться как более гидрофильной, так и более гидрофобной [10].

Активными компонентами в плазме являются свободные электроны, свободные атомы, радикалы, возбужденные частицы, ультрафиолетовое излучение и озон. Электроны, бомбардирующие поверхность с энергией, превышающей энергию химических связей, могут инициировать реакции, аналогичные радиационно-химическим. Основными продуктами взаимодействия электронов и ультрафиолетового излучения являются свободные радикалы, ненасыщенные соединения, межмолекулярные сшивки и газообразные продукты, преимущественно водород. Активированная поверхность приобретает уникальные свойства, образно говоря, становится «шероховатой на молекулярном уровне», что повышает ее адгезионные характеристики [10].

В ходе выполнения работы микроволокна модифицировали плазмой с помощью вакуумной настольной системы плазмохимической обработки поверхности MD-20ST. Данная система обеспечивает возможность генерации плазмы с контролируемым химическим составом в среде фильтрованного воздуха. Частота импульсов составляла 40 кГц, а мощность разряда достигала 600 Вт. Вакуумметр обеспечивает давление в камере на уровне 50 Па. При этом температура внутри камеры поддерживается на отметке не более 65 °С за счет принудительного воздушного охлаждения.

Для выявления закономерностей влияния воздействия низкотемпературной плазмы на образцы микроволокна были проведены эксперименты, в которых варьировались входные параметры установки. Мощность разряда изменялась в диапазоне от 100 до 600 Вт, а время обработки – от 1 до 10 минут.

Цель работы заключается в исследовании влияния режимов обработки низкотемпературной плазмой (мощности и длительности воздействия) поверхности кварцевых микроволокон ТКВ (ТУ 6-48-5786902-78-91) на характер их взаимодействия с неполярным этиленпропилендиеновым каучуком СКЭПТ-40 (ТУ 2294-087-05766563-2010), а также их влияния на комплекс вулканизационных, упруго-прочностных и огнетеплозащитных характеристик резин.

В качестве образцов сравнения была изготовлена эластомерная композиция, не содержащая микроволокон (контрольный образец), и композиция, содержащая 10 масс. ч. немодифицированных микроволокон.

Изготовление и вулканизацию резиновых смесей осуществляли в микросмесителе РС-0,2 и вулканизационном прессе «Carver» в соответствии с ГОСТ 30263-96 [11]. Вулканизация резиновых смесей проходила при температуре 155 °С в течение 60 минут.

Определение вулканизационных характеристик резиновых смесей проводили на реометре «MDR 3000 Professional» по ГОСТ Р 54547-2011 [12]. Степень взаимодействия каучук-наполнитель оценивали по величине эффекта Пейна (ΔG) – разности значений динамического модуля упругости в выбранном интервале амплитуд деформаций (0,1–40 %) [13]. Значение эффекта Пейна зависит не только от типа наполнителя, но и от его структурных особенностей, в частности от величины поверхности наполнителя, доступной для взаимодействия [14]. Меньший эффект Пейна соответствует лучшему распределению наполнителя в резине и уменьшению взаимодействия между частицами наполнителя [15].

Упруго-прочностные свойства резин определяли по ГОСТ ISO 37-2020 [16]. Для оценки огне- и теплостойкости образцов определяли следующие параметры: зависимость температуры на необогреваемой поверхности образца от времени воздействия открытого пламени плазмотрона, потеря массы образца и скорость линейного горения по ГОСТ 12.1.044-2018 [17]. При высокотемпературном прогреве на поверхности образца создавалась температура порядка 2000 °С.

Влияние введения исследуемых добавок на величину коксового остатка проводилось по ОСТ 92-0903-78 [18].

Одной из главных термодинамических характеристик поверхности является ее свободная энергия (СЭП), представляющая собой избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела фаз, обусловленный различием межмолекулярных взаимодействий в граничащих материалах. СЭП твердых материалов не может быть измерена непосредственно, она рассчитывается на основе контактного угла смачивания поверхности разными жидкостями [19].

Для определения СЭП образцов наиболее часто используемым является метод Оуэнса–Вендта–Рабея–Кьельбле (ОВРК), являющийся

косвенным методом определения СЭП и основанный на определении смачиваемости поверхности материала жидкостями с разным поверхностным натяжением. Для проведения расчетов по этому методу необходимо знать не только значения контактных углов смачивания (θ) образцов сразу несколькими жидкостями, но и дисперсионную и полярную составляющие поверхностного натяжения каждой из них [20]. Дисперсионная составляющая (γ_s^d) включает силы Ван-дер-Ваальса и другие неспецифические взаимодействия, полярная составляющая (γ_s^p) – сильные взаимодействия и водородные связи. Соотношение между этими составляющими поверхностной энергии выражается формулой Оуэнса–Вендта [21; 22]:

$$\frac{\gamma_l(\cos \theta + 1)}{2\sqrt{\gamma_l^d}} = \frac{\sqrt{\gamma_l^p}}{\sqrt{\gamma_l^d}} \cdot \sqrt{\gamma_s^p} + \sqrt{\gamma_s^d}, \quad (1)$$

где индексы s и l относятся к твердой и жидкой фазам соответственно; поверхностная энергия для исследуемых микроволокон рассчитывается согласно «теории дробной полярности» по формуле Фаукса: $\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p$.

Полярность материалов определяли как долю полярной компоненты в суммарной поверхностной энергии: $p = \gamma_s^p / \gamma_s$.

Измерения краевых углов на поверхности кварцевого микроволокна проводили «методом проекции капли» [23]. Исследуемый образец наполнителя массой ~ 5 г уплотняли в небольшую емкость. Капли формировали на открытом воздухе при температуре 25 ± 2 °С и проводили замеры их высот h и диаметра d . В качестве тестовых жидкостей применяли соединения с разной полярностью: глицерин и дистиллированную воду. Для одной капли краевой угол определяли как среднее из пяти измерений; капли формировали на пяти разных участках образца. Полученные значения усредняли. Полученные данные подставляли в формулу (2) и вычисляли краевой угол смачивания θ . Точность расчета угла по данной методике оценивается в 1–5 градусов.

$$\theta < 90^\circ \quad \cos \theta = \frac{(d/2)^2 - h^2}{(d/2)^2 + h^2}, \quad (2)$$

$$\theta > 90^\circ \quad \cos \theta = 1 - \frac{h}{(d/2)}.$$

Значения поверхностной энергии γ_s , ее дисперсионной γ_s^d и полярной γ_s^p составляющих для кварцевых микроволокон без обработки и с разными режимами обработки неравновесной низкотемпературной плазмой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения поверхностной энергии γ_s и ее дисперсионной (γ_s^d) и полярной (γ_s^p) составляющих кварцевых волокон в зависимости от режима их обработки низкотемпературной плазмой

Режим обработки		γ_s , мДж/м ²	γ_s^d , мДж/м ²	γ_s^p , мДж/м ²	Полярность	Источник
Без обработки		70.3	12.7	57.5	0.82	Расчетные данные
1 минута	100 Вт	120.0	3.8	116.2	0.97	
	200 Вт	100.8	0.4	100.4	1.00	
	300 Вт	127.6	3.6	124.0	0.97	
	400 Вт	103.9	0.5	103.5	1.00	
	500 Вт	44.9	6.8	38.1	0.85	
	600 Вт	66.1	0.2	65.9	1.00	
3 минуты	100 Вт	116.1	2.3	113.8	0.98	
	200 Вт	132.4	5.2	127.2	0.96	
	300 Вт	79.5	2.4	77.1	0.97	
	400 Вт	63.3	14.1	49.1	0.78	
	500 Вт	96.3	0.04	96.3	1.00	
	600 Вт	145.6	8.8	136.8	0.94	
5 минут	100 Вт	74.0	12.6	61.4	0.83	
	200 Вт	71.9	11.7	60.3	0.84	
	300 Вт	49.3	8.9	40.4	0.82	
	400 Вт	71.5	13.5	58.1	0.81	
	500 Вт	86.0	2.0	84.0	0.98	
	600 Вт	94.1	0.05	94.0	1.00	
7 минут	100 Вт	41.5	8.2	33.4	0.80	
	200 Вт	62.2	1.1	61.1	0.98	
	300 Вт	88.6	1.3	87.3	0.99	
	400 Вт	88.2	1.7	86.6	0.98	
	500 Вт	80.4	0.2	80.2	1.00	
	600 Вт	80.5	2.4	78.1	0.97	
9 минут	100 Вт	56.7	5.7	51.0	0.90	
	200 Вт	75.7	0.2	75.5	1.00	
	300 Вт	74.5	0.04	74.4	1.00	
	400 Вт	88.6	0.04	88.5	1.00	
	500 Вт	64.8	0.4	64.4	0.99	
	600 Вт	72.1	0.03	72.1	1.00	
СКЭПТ-40		34.8	34.1	0.7	0.02	[24]

Как видно из данных табл. 1, кварцевое микроволокно относится к классу сильнополярных материалов (полярность составляет 0,82). Плазменная обработка приводит к тому, что поверхность кварцевых микроволокон остается сильнополярной, в зависимости от режима обработки полярность варьируется в интервале от 0,78 до 1,00. Следует отметить, что с увеличением мощности воздействия плазмы и времени обработки микроволокон полярность их поверхности

также возрастает (табл. 1). Кроме того, следует отметить, что плазменная обработка, как и ожидалось, способствует увеличению поверхностной энергии микроволокон. Однако данный эффект наблюдается не во всех режимах обработки. В связи с этим целесообразно провести расширенное экспериментальное исследование, включающее большее количество параллельных опытов одного образца, для обеспечения точности и надежности полученных результатов.

Одним из ключевых параметров, позволяющих прогнозировать степень взаимодействия на границе раздела между наполнителем и каучуком, является межфазное натяжение. Это явление обусловлено различием в полярности двух фаз. Сила дисперсионного взаимодействия между фазами в различных системах демонстрирует относительную устойчивость, в то время как сила взаимодействия, обусловленная полярностью, может подвергаться значительным колебаниям. Следовательно, межфазное натяжение в значительной степени определяется полярными взаимодействиями. Чем ниже межфазное натяжение на границе раздела, тем выше прочность связи микроволокон с каучуком и тем легче происходит их смачивание (уменьшается краевой угол смачивания).

Смачиваемость поверхности микроволокон исследовалась посредством определения краевого угла смачивания и межфазного натяжения на границе системы «волокно – каучук» (табл. 2 и 3).

Значения межфазного натяжения на границе раздела фаз полимер-наполнитель (γ_{12}) определяли с использованием уравнения геометрического среднего Оуэнса-Вендта (3), где индексы 1 и 2 обозначают каучук и микроволокно соответственно [21]:

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2(\gamma_1^d \gamma_2^d)^{1/2} - 2(\gamma_1^p \gamma_2^p)^{1/2}. \quad (3)$$

Для определения оптимального режима плазменной модификации применялась методика математического моделирования с использованием композиционного ортогонального плана, предусматривающего варьирование мощности воздействия низкотемпературной плазмы. В рамках настоящего исследования были проанализированы зависимости краевого угла смачивания микроволокон и межфазного натяжения на границе раздела системы «волокно – каучук» от мощности плазменного воздействия. Результаты данного анализа представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 2

Влияние мощности разряда и продолжительности воздействия низкотемпературной плазмы на значения контактного угла смачивания θ кварцевого микроволокна каучуком

Режим обработки	Контактный угол смачивания (θ), градусы				
Без обработки	55,9				
Время обработки	1 минута	3 минуты	5 минут	7 минут	9 минут
100 Вт	80,2	88,8	55,4	76,3	81,6
200 Вт	80,0	72,1	58,7	105,7	100,0
300 Вт	79,9	93,4	53,2	99,9	121,0
400 Вт	80,0	53,3	72,3	97,0	117,0
500 Вт	80,1	117,4	95,1	114,0	113,7
600 Вт	81,0	56,0	117,4	93,0	112,0

Таблица 3

Влияние мощности разряда и продолжительности воздействия низкотемпературной плазмы на значения межфазного натяжения γ_{12} на границе раздела кварцевое микроволокно/каучук

Режим обработки	Межфазное натяжение (γ_{12}), мДж/м ²				
Без обработки	50,7				
Время обработки	1 минута	3 минуты	5 минут	7 минут	9 минут
100 Вт	114,1	115,4	54,2	33,3	51,6
200 Вт	117,8	121,7	43,9	71,7	79,1
300 Вт	121,5	110,4	38,7	94,5	92,4
400 Вт	119,5	107,9	50,7	96,2	88,7
500 Вт	114,6	112,3	89,1	94,6	78,8
600 Вт	110,9	126,1	110,1	82,3	68,4

На основании полученных данных установлено, что оптимальным временным интервалом

для обработки кварцевых микроволокон низкотемпературной плазмой является 5 минут при

мощности в 300 Вт: краевой угол смачивания системы «ТКВ – СКЭПТ-40» уменьшается на 5 % по сравнению с исходным образцом и составил 53,2°, а межфазное натяжение снижается на 30 % и составило 38,7 мДж/м².

Полученные расчетные значения краевого угла смачивания и межфазного натяжения на поверхности раздела системы «волокно – кау-

чук» согласуются с экспериментальными данными. Так как оптимальным является мощность воздействия 300 Вт, то дальнейшую модификацию микроволокон плазмой проводили при данной мощности в течение 3–9 минут. Результаты влияния времени обработки микроволокон плазмой на свойства огнетеплозащитных эластомерных материалов представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Влияния продолжительности обработки микроволокон
низкотемпературной плазмой на свойства ОТЗМ**

Показатели	Контрольный образец	3'	5'	7'	9'
Время обработки, мин	0	3	5	7	9
Характеристики резиновых смесей					
Показатель скорости вулканизации, мин ⁻¹	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Эффект Пейна, кПа	85,87	87,8	82,62	98,43	222,21
Условная прочность при растяжении, МПа	10,3	10,9	16,5	13,9	13,0
Плотность, кг/м ³	1036	1069	1074	1075	1074
Время прогрева необогреваемой поверхности образца до 100 °С, с	200	300	430	–	460
Скорость линейного горения, мм/с	0,688	0,423	0,374	0,310	0,335
Коксовый остаток (КО)	19,68	26,48	25,74	26,82	28,14
Время начала отслаивания кокса, с	22	30	40	46	35
Прочность кокса на отрыв, МПа	37,3	40,5	42,8	67,92	38,1

Согласно данным, представленным в табл. 3, изменение временного интервала обработки микроволокон низкотемпературной плазмой от 3 до 10 минут не оказывает значительного влияния на вулканизационные свойства резиновых смесей. Однако при увеличении времени воздействия наблюдается резкое повышение эффекта Пейна, что является нежелательным явлением, так как указывает на интенсификацию процессов взаимодействия между наполнителями.

Влияние обработанных микроволокон на упруго-прочностные свойства носит экстремальный характер, и наилучшие значения достигаются при обработке в течение 5 минут.

Плазменная модификация микроволокон оказывает значительное влияние на параметры коксового остатка и устойчивость кокса к эрозийным воздействиям. В частности, наблюдается увеличение коксового остатка на 30–40 % и повышение прочности коксовой структуры на 10–80 % по сравнению с контрольными образцами.

Таким образом, в ходе исследования изучено влияние режимов обработки кварцевых мик-

роволокон низкотемпературной плазмой на свойства эластомерных огнетеплозащитных материалов на основе этиленпропилендиенового каучука. Установлено, что оптимальным является обработка в течение 5 минут при мощности воздействия 300 Вт. Данный режим модификации позволяет максимизировать величину коксового остатка материала при высокотемпературном воздействии и повысить прочность кокса, что позволит увеличить эффективность работы ОТЗМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов, В. Ф. Огнетеплозащитные полимерные материалы с функционально-активными компонентами (часть 1): монография / В. Ф. Каблов, Н. А. Кейбал, О. М. Новопольцева. – Волгоград, 2016. – 208 с.
2. Шадрин, Н. В. Структура и свойства бутадиенитрильной резины, наполненной углеродными и базальтовыми волокнами / Н. В. Шадрин, С. И. Нартова // Материаловедение. – 016. – № 8. – С. 40.
3. Elastomeric Fire and Heat-Protective Materials Containing Functionally Active Microheterogeneous Systems / V. G. Kochetkov, D. A. Kryukova, D. A. Urzhumov, O. M. Novopoltseva, N. A. Keibal, V. V. Burmistrov, V. F. Kablov //

Polymers. 2024. Vol. 16, Issue 15 (August-1). Article 2163. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16152163>.

4. Семенова, С. Н. Этиленпропилендиеновый каучук и его применение в резинотехнических материалах специального назначения (обзор) / С. Н. Семенова, А. М. Чайкун, Р. Р. Сулейманов. // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 3 (56). – С. 23.

5. Влияние модифицированного каолинового микро-волокна на свойства огнестеплозащитных эластомерных материалов / В. Ф. Каблов, О. М. Новопольцева, Н. А. Кейбал, В. Г. Кочетков, Д. А. Крюкова, Е. В. Гордеева, С. А. Егорова // Каучук и резина. – 2018. – № 5.

6. Влияние модификации минеральных микроволокон на свойства огнестеплозащитных покрытий / В. Ф. Каблов, О. М. Новопольцева, Н. А. Кейбал, В. Г. Кочетков, Д. А. Крюкова, В. Ю. Фоменко, А. Д. Мальнева // Известия ВолГТУ : научный журнал № 5 (252) / ВолГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 42.

7. Шастин, Д. А. Силанмодифицированный этиленпропилендиеновый каучук и адгезионные композиции на его основе : диссертация ... кандидата технических наук : 05.17.06 / Шастин Дмитрий Алексеевич; [Место защиты: Казан. нац. исслед. технол. ун-т]. Казань, 2011. – 120 с.

8. Сергеева, Е. А. Влияние плазменной обработки на физико-механические свойства волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Е. А. Сергеева, Ю. А. Букина, А. Р. Ибатуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 17.

9. Research on Elastomeric Fire- and Heat-Protection Materials Containing Plasma-Treated Microspheres / V. F. Kablov, N. A. Keibal, V. G. Kochetkov, O. M. Novopol'tseva, D. A. Kryukova, D. A. Urzhumov, V. P. Tokar // Polymer Science, Series D. 2024. Vol. 17, Issue 2 (June). – P. 286-290. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421224700473>.

10. Токарев, А. В. Модификация поверхности изделий из полимерных материалов в плазме барьерного разряда / А. В. Токарев // Вестник КРСУ. – 2012. – Т. 12. – № 10.

11. ГОСТ 30263-96. Смеси резиновые для испытания. Приготовление, смешение и вулканизация. Оборудование и методы : Межгосударственный стандарт : дата введения 1998-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Изд. официальное. – Минск : ИПК Издательство стандартов, 1997. – 20 с.

12. ГОСТ Р 54547-2011. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безртотных реометров : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2011-11-29 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 19 с.

13. Потапов, Е. Э. Использование маточных смесей шунгита в рецептурах протекторных и каркасных шинных резин / Е. Э. Потапов, Ю. П. Мирошников, А. П. Бобров, В. А. Смаль // Каучук и резина. – 2017. – Т. 76, № 1. – С. 22.

14. Мохнаткин, А. М. Изучение совместного использования технического углерода и диоксида кремния в протекторе шин. Сообщение 5. Эффект Пейна / А. М. Мохнаткин, А. Л. Зотов, В. П. Дорожкин, Е. Г. Мохнаткина // Каучук и резина. – 2014. – № 4. – С. 36.

15. Чиркова, Ю. Н. Влияние новых антиоксидантов на технологические свойства резиновых смесей / Ю. Н. Чиркова, Д. Н. Земский // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 3. – Т. 17. – С. 115.

16. ГОСТ ISO 37-2020. Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2020-10-27 / Федеральное агентство по техничес-

кому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 32 с.

17. ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2019-05-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 196 с.

18. ОСТ 92-0903-78. Материалы неметаллические теплозащитного и конструкционного назначения. Методы определения технологических и физико-химических характеристик : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1978-10-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов, 1978. – 120 с.

19. Лопанов, А. Н. Расчет свободной энергии поверхности углей Донецкого бассейна и графитов / А. Н. Лопанов, Е. А. Фанина, К. В. Тихомирова // Химия твердого топлива. – 2018. – № 1. – С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0023117718010048>.

20. Данилов, В. Е. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Кьельбле / В. Е. Данилов, Е. В. Королев, А. М. Айзенштадт, В. В. Строкова // Строительные материалы. – 2019. – № 11. – С. 66.

21. Полдушов, М. А. Оценка межфазного взаимодействия на границе раздела шунгит/эластомер / М. А. Полдушов, А. В. Полянин, В. А. Москалев, Е. Э. Потапов, Ш. Прекол, Л. М. Инжинова, А. П. Бобров, В. В. Белковский, Ю. П. Мирошников // Каучук и резина. – 2013. – № 4. – С. 32.

22. Филиппова, Е. О. Воздействия низкотемпературной плазмы и γ -облучения на поверхностные свойства трековых мембран из полиэтилентерефталата / Е. О. Филиппова, Д. А. Карпов, А. В. Градобоев, В. В. Сохорева, В. Ф. Пичугин // Перспективные материалы. – 2016. – № 5. – С. 5.

23. Гусев, К. В. Влияние углеродных нанотрубок на смачиваемость полимерных композитов / К. В. Гусев, И. И. Ильина, С. В. Панькова, В. Г. Соловьев // Вестник Псковского государственного университета. – 2021. – № 17. – С. 90.

24. Ким, К. К. Плазменная установка для повышения гидрофильности бумажных изделий / К. К. Ким, Г. Л. Спичкин, Е. К. Чистов, Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, А. М. Костроминов // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 37–41.

REFERENCES

1. Kablov, V. F. Ogneteplazashchitnye polimernye materialy s funktsional'no-aktivnymi komponentami (chast' 1): monografiya. / V.F. Kablov, N.A. Keibal, O.M. Novopol'tseva. Volgograd, 2016. 208 s.
2. Shadrinov, N. V. Struktura i svoystva butadien-nitril'noj reziny, napolnennoj uglerodnymi i bazal'tovymi voloknami / N.V. Shadrinov, S.I. Nartahova // Materialovedenie. 2016. №8. S. 40.
3. Elastomeric Fire and Heat-Protective Materials Containing Functionally Active Microheterogeneous Systems / V.G. Kochetkov, D.A. Kryukova, D.A. Urzhumov, O.M. Novopol'tseva, N.A. Keibal, V.V. Burmistrov, V.F. Kablov // Polymers. 2024. Vol. 16, Issue 15 (August-1). Article 2163. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16152163>.
4. Semenova, S. N. Etilenpropilendienovyy kauchuk i ego primeneniye v rezinotekhnicheskikh materialah special'nogo naznacheniya (obzor) / S.N. Semenova, A.M. Chajkun, R.R. Sulejmanov. // Aviacionnye materialy i tekhnologii. 2019. №3 (56). S. 23.

5. Vliyanie modifitsirovannogo kaolinovogo mikrovolokna na svoystva ogneplozashchitnykh elastomernykh materialov / V.F. Kablov, O.M. Novopol'tseva, N.A. Keibal, V.G. Kochetkov, D.A. Kryukova, E.V. Gordeeva, S.A. Egorova // *Kauchuk i rezina*. 2018. №5.
6. Vliyanie modifikatsii mineral'nykh mikrovolokon na svoystva ogneplozashchitnykh pokrytiy / V.F. Kablov, O.M. Novopol'tseva, N.A. Keibal, V.G. Kochetkov, D.A. Kryukova, V.Yu. Fomenko, A.D. Mal'neva // *Izvestiya VolgGTU. Ser. Himiya i tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimernykh materialov*. Volgograd, 2021. № 5 (252). С. 42.
7. *Shastin, D. A.* Silanmodifitsirovannyi etilenpropilendienovyy kauchuk i adgezionnye kompozitsii na ego osnove : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.17.06 / Shastin Dmitriy Alekseevich; [Mesto zashchity: Kazan. nac. issled. tekhnol. un-t]. Kazan', 2011. 120 s.
8. *Sergeeva, E. A., Bukina Yu. A., Ibatullina A. R.* Vliyanie plazmennoy obrabotki na fiziko-mekhanicheskie svoystva volokon iz sverhvysokomolekulyarnogo polietilena // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. №17.
9. Research on Elastomeric Fire- and Heat-Protection Materials Containing Plasma-Treated Microspheres / V.F. Kablov, N.A. Keibal, V.G. Kochetkov, O.M. Novopol'tseva, D.A. Kryukova, D.A. Urzhumov, V.P. Tokar // *Polymer Science, Series D*. 2024. Vol. 17, Issue 2 (June). P. 286-290. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421224700473>.
10. *Tokarev, A. V.* Modifikatsiya poverhnosti izdeliy iz polimernykh materialov v plazme bar'ernogo razryada // *Vestnik KRSU*. 2012. Tom 12. №10.
11. GOST 30263-96. Smesi rezinovykh dlya ispytaniya. Prigotovlenie, smeshenie i vulkanizatsiya. Oborudovanie i metody : Mezhhgosudarstvennyy standart : data vvedeniya 1998-01-01 / Mezhhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. – Izd. oficial'noe. – Minsk : IPK Izdatel'stvo standartov, 1997 – 20 s.
12. GOST R 54547-2011. Smesi rezinovykh. Opredelenie vulkanizacionnykh harakteristik s ispol'zovaniem bezrotornykh reometrov : nacional'nyy standart Rossijskoj Federatsii : data vvedeniya 2011-11-29 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – Izd. oficial'noe. – Moskva : Standartinform, 2018 – 19 s.
13. *Potapov, E. E.* Ispol'zovanie matochnykh smesey shungita v recepturah protekornykh i karkasnykh shinnykh rezin / E.E. Potapov, Yu.P. Miroshnikov, A.P. Bobrov, V.A. Smal' // *Kauchuk i rezina*. 2017. T. 76, №1. S. 22.
14. *Mohnatkin, A. M.* Izuchenie sovmestnogo ispol'zovaniya tekhnicheskogo ugleroda i dioksida kremniya v protektore shin. Soobshchenie 5. Effekt Pejna / A.M. Mohnatkin, A.L. Zotov, V.P. Dorozhkin, E.G. Mohnatkina // *Kauchuk i rezina*. 2014. №4. S. 36.
15. *Chirkova, Yu. N.* Vliyanie novykh antioksidantov na tekhnologicheskie svoystva rezinovykh smesey / Yu.N. Chirkova, D.N. Zemskiy // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. № 3. T. 17. S. 115.
16. GOST ISO 37-2020. Rezina i termoelastoplasty. Opredelenie uprugoprochnostnykh svoystv pri rastyazhenii : nacional'nyy standart Rossijskoj Federatsii : data vvedeniya 2020-10-27 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – Izd. oficial'noe. – Moskva : Standartinform, 2020 – 32 s.
17. GOST 12.1.044-2018. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelej i metody ih opredeleniya : nacional'nyy standart Rossijskoj Federatsii : data vvedeniya 2019-05-01 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – Izd. oficial'noe. – Moskva : Standartinform, 2018 – 196 s.
18. OST 92-0903-78. Materialy nemetallicheskie teplozashchitnogo i konstrukcionnogo naznacheniya. Metody opredeleniya tekhnologicheskikh i fiziko-himicheskikh harakteristik : nacional'nyy standart Rossijskoj Federatsii : data vvedeniya 1978-10-01 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. – Izd. oficial'noe. – Moskva : Izdatel'stvo standartov, 1978 – 120 s.
19. *Loponov, A. N.* Raschet svobodnoj energii poverhnosti uglej Doneckogo bassejna i grafitov1 / A. N. Loponov, E. A. Fanina, K. V. Tihomirova // *Himiya tverdogo topliva*. 2018. № 1. S. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0023117718010048>.
20. *Danilov V.E., Korolev E.V., Ajzenshtadt A.M., Strokova V.V.* Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa-Vendta-Rabelya-K'el'ble // *Construction materials*. 2019. №11.
21. *Poldushov, M. A.* Ocenka mezhfaznogo vzaimodejstviya na granice razdela shungit/elastomer / M.A. Poldushov, A.V. Polyandin, V.A. Moskalev, E.E. Potapov, Sh. Prekol, L.M. Inzhinova, A.P. Bobrov, V.V. Belkovskij, Yu.P. Miroshnikov // *Kauchuk i rezina*. 2013. №4. S. 32.
22. *Filippova, E. O.* Vozdejstviya nizkotemperaturnoj plazmy i γ -oblucheniya na poverhnostnye svoystvatrekovykh membran iz polietilentereftalata / E.O. Filippova, D.A. Karpov, A.V. Gradoboev, V.V. Sohoreva, V.F. Pichugin // *Perspektivnye materialy*. 2016. № 5. S. 5.
23. *Gusev, K. V.* Vliyanie uglerodnykh nanotrubok na smachivaemost' polimernykh kompozitov / K.V. Gusev, I.I. Il'ina, S.V. Pan'kova, V.G. Solov'ev // *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021. №17. S. 90.
24. *Kim, K. K.* Plazmennaya ustanovka dlya povysheniya gidrofil'nosti bumazhnykh izdeliy / K.K. Kim, G.L. Spichkin, E.K. Chistov, G.M. Groshev, A.G. Kotenko, A.M. Kostrominov // *Elektrotekhnika*. 2017. №10. S. 37.

**V. F. Kablov, O. M. Novopol'tseva, N. A. Keibal
D. A. Kryukova, V. G. Kochetkov, M. I. Shesternin**

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF QUARTZ MICROFIBRE PROCESSING MODES WITH LOW-TEMPERATURE PLASMA ON THE PROPERTIES OF ELASTOMERIC FIRE- AND HEAT-PROTECTIVE MATERIALS

**Volzhsy Polytechnic Institute (branch)
Volgograd State Technical University**

Abstract. The effect of the discharge power and the time of surface treatment of quartz microfibres with low-temperature plasma on the amount of interfacial tension and adhesion at the "rubber – microfiber" interface has been studied. It has been established that the introduction of quartz microfibers modified by plasma improves the basic operational properties of materials (vulcanization, elastic strength, fire protection).

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