

Статья поступила в редакцию: 14.07.2026

Статья принята к публикации: 24.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 628.94+667.2+629.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23233

Разработка и оптимизация базальтосиликонового покрытия на основе местного сырья для противопожарной защиты транспортных средств

Сиддиков Икромжон Иминжонович

д-р техн. наук, проф.

Ташкентский архитектурно-строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Соттикулов Элёр Сотимбоевич

вед. науч. сотр., ООО Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: elyorrr5@gmail.com

Эшматов Бобиржон Мамиржонович

соискатель

Академия Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Development and optimization of a basalt-silicone coating based on local raw materials for fire protection of vehicles

Siddikov Ikromjon

doctor of Technical Sciences, Professor

Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sottikulov Elyor

Leading Researcher

LLC Tashkent Research Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Eshmatov Bobirjon

postgraduate Student

Academy of the Ministry of Emergency Situations of the

Republic of Uzbekistan; Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования пяти вариантов базальтосиликоновых огнезащитных полотен, изготовленных на основе базальтовой ткани из местного сырья и кремнийорганического связующего с антипиреновой добавкой.

Исследованы контрольный образец без покрытия, образцы с односторонним однослойным и утолщённым покрытием, а также с двухсторонним однослойным и двухслойным покрытием. Испытания проведены в аккредитованной лаборатории Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.044 (раздел 7) и ГОСТ Р 50810. Установлено, что все исследованные материалы относятся к трудногорючим и трудновоспламеняемым. Выявлена устойчивая зависимость пожарно-технических характеристик от массы кремнийорганического связующего: с увеличением его количества потеря массы возрастает с 4,51 до 18,27 %, а максимальная температура в реакционной камере увеличивается с 239,3 до 254,0 °C ($r = 0,93-0,94$). Наилучшие результаты показал вариант с односторонним однослойным покрытием, для которого потеря массы составила 4,51 %, что ниже значения контрольного образца (5,83 %). Показано, что чрезмерное увеличение толщины силиконового покрытия не улучшает, а ухудшает пожарно-технические характеристики материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных противопожарных покрытий для транспортных средств на основе местного базальтового сырья.

Abstract

The paper presents the results of testing five variants of basalt-silicone fire-protective fabrics based on locally produced basalt fabric and an organosilicon binder containing a flame-retardant additive. The investigated variants included an uncoated control sample, a single-sided single-layer coating, a single-sided thickened coating, a double-sided single-layer coating, and a double-sided two-layer coating. The tests were carried out in the accredited laboratory of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan in accordance with GOST 12.1.044 (Section 7) and GOST R 50810. All tested materials were classified as low-combustible and hardly ignitable. A monotonic relationship between the amount of applied binder and the fire hazard indicators was established: mass loss increased from 4.51 % to 18.27 %, while the maximum temperature in the reaction chamber increased from 239.3 to 254.0 °C ($r = 0.93$ and 0.94 , respectively). The specimen with a single-sided single-layer coating demonstrated the best overall performance, with a mass loss of 4.51 %, which was lower than that of the uncoated control sample (5.83 %). The results indicate that excessive application of the silicone binder deteriorates the fire-performance characteristics of the fabric. The obtained findings may be used to optimize the design of fire-protective fabrics for vehicle fire safety applications.

Ключевые слова: базальтовая ткань, кремнийорганическое покрытие, антипирен, группа горючести, воспламеняемость, потеря массы, транспортные средства.

Keywords: basalt fabric, organosilicon coating, flame retardant, combustibility group, ignitability, mass loss, vehicles.

Библиографическое описание: Сиддигов И.И., Соттикулов Э.С., Эшматов Б.М. Разработка и оптимизация базальтосиликонового покрытия на основе местного сырья для противопожарной защиты транспортных средств // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23233>

Введение

Пожары на транспорте — одна из наиболее тяжёлых по последствиям категорий аварий: очаг в моторном отсеке или в зоне тяговых батарей развивается за десятки секунд и сопровождается выделением токсичных продуктов горения. Электрификация транспорта обострила проблему: литий-ионные накопители способны переходить в тепловой разгон с локальными температурами свыше 800 °С, при котором традиционные средства пожаротушения малоэффективны [8, 3].

Одним из решений является применение гибких огнезащитных полотен, экранирующих пожароопасные узлы. К ним предъявляются противоречивые требования: негорючесть, целостность при контакте с пламенем и одновременно эластичность, стойкость к истиранию и вибрации.

Базальтовое волокно как армирующая основа отвечает большинству этих требований благодаря температуре размягчения около 900–1000 °С, химической стойкости и низкой теплопроводности [1]. Однако исходная ткань осыпается по краям и не держит форму, поэтому её пропитывают кремнийорганическим связующим, которое придаёт эластичность, водостойкость и адгезию к металлу [6, 10]. При этом само связующее органично и способно к термодеструкции: полидиметилсилоксановые матрицы при нагреве выше 300 °С разлагаются с образованием летучих продуктов и кремнезёмистого остатка [9]. Введение силиконового покрытия имеет, таким образом, двойственный характер, и вопрос о допустимом расходе связующего без ухудшения пожарно-технических показателей в литературе количественно не рассматривался.

Актуальность работы усиливается сырьевым фактором: Узбекистан располагает собственными месторождениями базальтовых пород, что позволяет наладить выпуск огнезащитных полотен на местной сырьевой базе.

Цель исследования — установить влияние схемы и расхода кремнийорганического покрытия на пожарно-технические характеристики базальтового полотна и определить оптимальный вариант нанесения для средств противопожарной защиты транспортных средств.

Для этого изготовлена серия образцов с разной схемой покрытия, для каждого определена группа горючести (ГОСТ 12.1.044) и показатели воспламеняемости (ГОСТ Р 50810), установлен характер зависимости этих показателей от массы связующего.

Материалы и методы исследования

Материалы и изготовление образцов. Армирующая основа — базальтовая ткань полотняного переплетения из базальтового сырья Узбекистана. Связующее — кремнийорганическая композиция на основе полидиметилсилоксанового каучука холодного отверждения с антипиреном хлорпарафином ХП-470 (12 мас. %). Ткань высушивали при 105 °С 2 ч, композицию наносили пропиткой с ракельным разравниванием и отверждали при комнатной температуре 24 ч с термообработкой при 140 ± 10 °С 1 ч. Изготовлено пять вариантов полотна (табл. 1).

Таблица 1.

Характеристика исследованных вариантов противопожарного полотна

Полотно	Схема нанесения покрытия	Средняя масса образца 150×60 мм, г	Прирост массы относительно контроля, %
№ 1	Без покрытия (контроль)	51,3	—
№ 5	Одностороннее, 1 слой	59,0	14,9
№ 2	Одностороннее утолщённое, 1 слой	65,7	27,9
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	65,7	27,9
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	76,7	49,4

Методы испытаний. Испытания проведены 18.03.2026 г. в лаборатории Научно-исследовательского института проблем пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Узбекистан (г. Ташкент, ул. Шарафа Рашидова, 17) при температуре воздуха 21 °С, давлении 718 мм рт. ст. и влажности 35 %.

Группа горючести определялась по разделу 7 ГОСТ 12.1.044: образцы 150×60 мм (n = 3 на вариант) вводились в реакционную камеру установки ОТМ, нагретую до 200 °С, продолжительность испытания 300 с; регистрировались максимальная температура и потеря массы.

Воспламеняемость определялась по ГОСТ Р 50810: образцы 220×170 мм (n = 16 на вариант) испытывались на установке ОВТ при зажигании с поверхности и с кромки; регистрировались время остаточного горения, прогорание, размер поверхностной вспышки, длина обугливающегося участка, загорание ваты под образцом.

Статистическая обработка включала среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации и линейную корреляцию Пирсона между массой образца и показателями пожарной опасности.

Результаты исследования

Группа горючести по ГОСТ 12.1.044. Первичные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Первичные результаты определения группы горючести (ГОСТ 12.1.044, р. 7)

Полотно	№ обр.	Максимальная температура, °С	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, %
№ 1	1	219	51	49	3,92
	2	221	52	48	7,69
	3	217	51	48	5,88
№ 5	1	239	58	56	3,45
	2	241	60	57	5,00
	3	238	59	56	5,08
№ 2	1	247	65	57	12,31
	2	245	65	58	10,77
	3	248	67	59	11,94
№ 4	1	246	67	60	10,45
	2	243	64	56	12,50

Полотно	№ обр.	Максимальная температура, °C	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, %
	3	245	66	58	12,12
№ 3	1	255	78	65	16,67
	2	253	75	61	18,67
	3	254	77	62	19,48

Обобщённая статистика приведена в табл. 3. Время достижения максимальной температуры для всех образцов составило 300 с, то есть совпало с продолжительностью испытания — самостоятельного экзотермического пика не наблюдалось ни у одного варианта.

Таблица 3.

Статистическая обработка результатов испытаний по ГОСТ 12.1.044 (n = 3)

Полотно	Схема покрытия	Максимальная температура, °C (M ± SD)	Потеря массы, % (M ± SD)	Кэф. вариации потери массы, %	Группа горючести
№ 1	Без покрытия	219,0 ± 2,0	5,83 ± 1,89	32,3	Трудногорючий
№ 5	Одностороннее, 1 слой	239,3 ± 1,5	4,51 ± 0,92	20,4	Трудногорючий
№ 2	Одностороннее утолщённое	246,7 ± 1,5	11,67 ± 0,80	6,9	Трудногорючий
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	244,7 ± 1,5	11,69 ± 1,09	9,3	Трудногорючий
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	254,0 ± 1,0	18,27 ± 1,45	7,9	Трудногорючий

Все пять вариантов по совокупности показателей отнесены к трудногорючим материалам (п. 7.6.4 ГОСТ 12.1.044), однако внутри этой группы наблюдается отчётливая дифференциация. Максимальная температура монотонно возрастает с ростом массы связующего — от 219,0 до 254,0 °C (на 35,0 °C), потеря массы — от 4,51 до 18,27 % (более чем в четыре раза).

Коэффициент линейной корреляции Пирсона между массой образца и потерей массы составил $r = 0,93$, между массой и максимальной температурой — $r = 0,94$. Это указывает, что оба показателя определяются количеством связующего, подвергающегося термодеструкции, а не схемой его расположения: варианты № 2 и № 4 при одинаковой массе (65,7 г) дали практически совпадающую потерю массы — 11,67 и 11,69 % соответственно.

Отдельного внимания заслуживает вариант № 5 — единственный, у которого потеря массы (4,51 %) ниже, чем у контроля (5,83 %), при массе образца выше на 14,9 %. Контрольный вариант при этом обладает наибольшим разбросом результатов: коэффициент вариации потери массы 32,3 % против 6,9–20,4 % у покрытых вариантов.

Воспламеняемость по ГОСТ Р 50810. Результаты приведены в табл. 4. По четырём из восьми контролируемых параметров все пять вариантов показали отсутствие эффекта; различия проявились только в трёх параметрах, характеризующих размер зоны термического поражения.

Таблица 4.

Результаты испытаний на воспламеняемость (ГОСТ Р 50810, n = 16)

Полотно	Схема покрытия	Поверхностная вспышка, мм (норма ≤ 100)	Длина обугливания при зажигании с поверхности, мм (≤ 150)	Длина обугливания при зажигании с кромки, мм (≤ 150)	Классификация
№ 1	Без покрытия	35	30	40	Трудновоспламеняемый
№ 5	Одностороннее, 1 слой	45	50	70	Трудновоспламеняемый
№ 2	Одностороннее утолщённое	50	60	70	Трудновоспламеняемый
№ 4	Двухстороннее, 1 слой	50	62	68	Трудновоспламеняемый
№ 3	Двухстороннее, 2 слоя	45	55	65	Трудновоспламеняемый

Все варианты классифицированы как трудновоспламеняемые, с запасом по нормативным требованиям от двух до трёх раз (максимум 50 мм при допустимых 100 мм; максимум 70 мм при допустимых 150 мм). Тенденция та же, что и по ГОСТ 12.1.044: контроль показывает наименьшую зону термического поражения (30 мм), варианты с покрытием — 50–62 мм. Совпадение направленности результатов двух независимых методик повышает достоверность наблюдений.

Обсуждение результатов

Основной результат работы: кремнийорганическое покрытие оказывает на пожарно-технические характеристики полотна двойственное влияние, и существует оптимальный расход связующего, при превышении которого характеристики ухудшаются.

Базальтовое волокно само по себе негорючее; потеря массы контроля (5,83 %) обусловлена выгоранием технологической аппретуры и удалением влаги, а не горением волокна [5]. Значительный разброс контрольной серии (коэффициент вариации 32,3 %) объясняется неравномерностью распределения аппретуры по площади ткани.

Тонкий односторонний слой связующего (вариант № 5) снижает потерю массы ниже уровня контроля: отверждённая силиконовая плёнка герметизирует поверхность, ограничивая доступ кислорода к межволоконному пространству, а при нагреве образует уплотняющий барьер из кремнезёмистого остатка [9, 12]. Поскольку абсолютное количество связующего невелико, вклад его собственного пиролиза не превышает выигрыша от барьерного эффекта; снижение коэффициента вариации с 32,3 до 20,4 % говорит и о выравнивании свойств материала по площади.

При дальнейшем росте расхода связующего баланс меняется: масса органической фазы растёт быстрее эффективности барьера, которая определяется наличием сплошной плёнки и слабо зависит от её толщины [2]. В результате потеря массы возрастает до 18,27 % при максимальном расходе, а температура в камере — на 35 °С относительно контроля за счёт экзотермического окисления продуктов термодеструкции силикона. Совпадение показателей вариантов № 2 и № 4 при одинаковой массе и разной геометрии нанесения подтверждает, что

определяющим фактором является именно количество связующего, а не схема его распределения — сходная закономерность отмечена и для армирования гибридными базальтовыми структурами, где свойства масштабируются скорее объёмной долей компонента, чем его расположением [7, 4].

Вклад антипирена (хлорпарафина) состоит в замедлении газофазных цепных реакций горения за счёт выделения HCl при термораспаде, что дополнительно способствует раннему самозатуханию [11]; однако при большом расходе связующего этот эффект не компенсирует рост горючей органической массы.

Практический вывод: распространённое представление о том, что увеличение числа слоёв покрытия повышает огнестойкость, для базальтосиликоновых полотен неверно. Рациональна схема одностороннего однослойного нанесения (вариант № 5) — она даёт лучшие пожарно-технические показатели при минимальном расходе связующего и наименьшей массе изделия, что важно для полотен, применяемых в моторных отсеках и зонах аккумуляторных блоков.

Ограничения работы: исследование выполнено на пяти вариантах при трёх параллельных образцах по ГОСТ 12.1.044, что позволяет установить характер зависимости, но не строит точную математическую модель; не исследованы адгезия к металлу, стойкость к перегибам и старению, поведение материала при воздействии свыше 300 с. Это предмет дальнейших исследований.

Заключение

Изготовлены и испытаны пять вариантов огнезащитного полотна на основе базальтовой ткани и кремнийорганического связующего с антипиреном; все варианты отнесены к трудногорючим (ГОСТ 12.1.044, п. 7.6.4) и трудновоспламеняемым (ГОСТ Р 50810) материалам. Установлена монотонная зависимость показателей пожарной опасности от массы связующего: потеря массы возрастает с 4,51 до 18,27 %, максимальная температура — с 239,3 до 254,0 °С ($\gamma = 0,93$ и $0,94$). Определяющим фактором является количество связующего, а не геометрия его нанесения: варианты с разной схемой при одинаковой массе дали практически совпадающие результаты. Оптимальна схема одностороннего однослойного нанесения: потеря массы 4,51 % ниже, чем у контроля (5,83 %), при снижении коэффициента вариации с 32,3 до 20,4 %. Увеличение числа слоёв кремнийорганического покрытия не повышает, а снижает пожарно-технические характеристики полотна — это следует учитывать при разработке технических условий на противопожарные полотна для моторных отсеков, аккумуляторных блоков и других пожароопасных узлов транспорта.

Список литературы

1. De B. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management / B. De [et al.] // Progress in Materials Science. – 2024. – Т. 146.
2. Dong R. Surface modification of carbon fiber by vinyl functionalized silane to enhance the interfacial adhesion with rubber via co-vulcanization / R. Dong, H. Xie, W. Cao // Surfaces and Interfaces. – 2023. – Т. 43.

3. Ghiji M. A review of lithium-ion battery fire suppression / M. Ghiji, V. Novozhilov, K. Moinuddin, P. Joseph, I. Burch, B. Suendermann, G. Gamble // *Energies*. – 2020. – Т. 13, № 19.
4. Kufel A. Basalt/glass fiber polypropylene hybrid composites: mechanical properties at different temperatures and under cyclic loading, and micromechanical modelling / A. Kufel, S. Praa, S. Kuciel // *Materials*. – 2021. – Т. 14, № 19.
5. P. Rybi. Rybiński P. Impact of basalt filler on thermal and mechanical properties, as well as fire hazard, of silicone rubber composites, including ceramizable composites // *Materials*. – 2019. – Т. 12, № 15.
6. P. Mi. Miśkiewicz P. Experimental research on basalt fabric-based composites for protection against contact heat // *Journal of Natural Fibers*. – 2058. – Т. 21, № 1. – P. 2043–2058.
7. Selcuk S. Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review / S. Selcuk, U. Ahmetoglu, E.C. Gokce // *Materials Today Communications*. – 2023. – Т. 37.
8. Sun J. Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery / J. Sun, B. Mao, Q. Wang // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120.
9. Tang Y.-H. Recent advances in fire-retardant silicone rubber composites / Y.-H. Tang, J. Liu, Z.-Y. Chen, Y. Li, C.-F. Cao, G.-D. Zhang, L.-C. Tang // *Polymers*. – 2024. – Т. 16, № 17.
10. Zhang M. Investigation of heat transfer properties of plasma-treated and silicone-elastomer coated basalt fabric / M. Zhang, R. Denning, Z. Zhong, X. Wang, Y. Shen, M. Naebe // *Coatings*. – 2019. – Т. 9, № 5.
11. Zhang G. Novel triazine-based metal-organic frameworks: Synthesis and multifunctional application of flame retardant, smoke suppression and toxic attenuation on EP / G. Zhang [et al.] // *Materials & Design*. – 2023. – Т. 226.
12. Zimmermann C.A. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications / C.A. Zimmermann, K.N. Amouzou, B. Ung // *Advanced Optical Materials*. – 2025. – Т. 13.

References

1. De B. et al. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management // *Progress in Materials Science*. – 2024. – Т. 146.
2. Dong R., Xie H., Cao W. Surface modification of carbon fiber by vinyl functionalized silane to enhance the interfacial adhesion with rubber via co-vulcanization // *Surfaces and Interfaces*. – 2023. – Т. 43.
3. Ghiji M., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P., Burch I., Suendermann B., Gamble G. A review of lithium-ion battery fire suppression // *Energies*. – 2020. – Т. 13, № 19.
4. Kufel A., Praa S., Kuciel S. Basalt/glass fiber polypropylene hybrid composites: mechanical properties at different temperatures and under cyclic loading, and micromechanical modelling // *Materials*. – 2021. – Т. 14, № 19.

5. Рыбинский П., Сирек Б., Жуковский В., Бради Д., Имиела М., Анышка Р., Блюме А., Вербув В. [Impact of basalt filler on thermal and mechanical properties, as well as fire hazard, of silicone rubber composites, including ceramizable composites] // *Materials*. – 2019. – Т. 12, № 15. (In Russ.)
6. Miśkiewicz P., Tokarska M. Miśkiewicz P., Tokarska M. Experimental research on basalt fabric-based composites for protection against contact heat // *Journal of Natural Fibers*. – 2024. – Т. 21, № 1.
7. Selcuk S., Ahmetoglu U., Gokce E.C. Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review // *Materials Today Communications*. – 2023. – Т. 37.
8. Sun J., Mao B., Wang Q. Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120.
9. Tang Y.-H., Liu J., Chen Z.-Y., Li Y., Cao C.-F., Zhang G.-D., Tang L.-C. Recent advances in fire-retardant silicone rubber composites // *Polymers*. – 2024. – Т. 16, № 17.
10. Zhang M., Denning R., Zhong Z., Wang X., Shen Y., Naebe M. Investigation of heat transfer properties of plasma-treated and silicone-elastomer coated basalt fabric // *Coatings*. – 2019. – Т. 9, № 5.
11. Zhang G. et al. Novel triazine-based metal-organic frameworks: Synthesis and multifunctional application of flame retardant, smoke suppression and toxic attenuation on EP // *Materials & Design*. – 2023. – Т. 226.
12. Zimmermann C.A., Amouzou K.N., Ung B. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications // *Advanced Optical Materials*. – 2025. – Т. 13.