



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 678.742

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014



СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ БУТАДИЕНОВЫМ ЭЛАСТОМЕРОМ И БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНЬЮ

Михаил Михайлович Копырин¹, Айтал Еремеевич Марков²,
Афанасий Алексеевич Дьяконов³, Сахаяна Николаевна Данилова⁴,
Михаил Петрович Лебедев⁵, Алексей Геннадьевич Туисов⁶,
Айталиа Алексеевна Охлопкова⁷, Надежда Николаевна Лазарева⁸,
Анатолий Константинович Кычкин⁹

^{1, 2, 3, 5, 6} Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия

¹ mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>

² aital.markov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>

³ afonya71185@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>

⁵ m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

⁶ tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>

^{3, 4, 7, 8} Северо-Восточный федеральный университет им.М.К. Аммосова, Якутск, Россия

⁴ dns.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

⁷ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

⁸ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутск, Россия

⁹ kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

Аннотация. Актуальной задачей при создании высококомодульных композитов на основе разных по своей химической природе материалов является надежность их соединения между собой. При введении армирующих наполнителей в эластомерную матрицу также встает вопрос о прочности соединения между материалами, которое отвечает за надежность изделия при эксплуатации. В работе рассматриваются два способа повышения адгезионного соединения между армирующей базальтовой тканью и эластомерной матрицей: нанесение растворенной резиновой смеси в фенилметане (толуол) и нанесение праймера с адгезивом Хемосил 211/411 на поверхность базальтовой ткани. Полученные образцы армированных эластомеров с предварительно обработанной поверхностью базальтовой ткани показали повышение высококомодульных свойств – значения пределов прочности на растяжение составила $38,1 \pm 2,3$ МПа при первом методе и $36,4 \pm 2,2$ МПа – при втором, тогда как у исходного армированного эластомера данное значение составило $29,0 \pm 1,5$ МПа. Нанесение слоя растворенной резиновой смеси позволило повысить показатель адгезии на 16 % по сравнению с исходным армированным образцом. Обработка праймером и адгезивом Хемосил 211/411 улучшило сцепление армирующей ткани с эластомерной матрицей в 10 раз. При испытании прочности соединения образцов обработанных Хемосилом, разрушение происходило по резине и носило когезионный характер, что свидетельствует о прочном взаимодействии субстрата с адгезивом, превышающим прочность эластомера.

Ключевые слова: композитный эластомер, адгезия, прочность, обработка поверхности, высококомодульный материал, армированная резина, базальтовая ткань.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке МОН РФ по Государственным заданиям № FSRG - 2020-0017 и № FWRS-2022-0001.

Для цитирования: Сравнение способов повышения адгезии между бутадиеновым эластомером и базальтовой тканью / М. М. Копырин [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 109–117. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014. EDN: <https://elibrary.ru/HENCAI>.

© Копырин М. М., Марков А. Е., Дьяконов А. А., Данилова С. Н., Лебедев М. П., Туисов А. Г., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н., Кычкин А. К., 2022

Original article

COMPARISON OF METHODS TO INCREASE ADHESION BETWEEN BUTADIENE ELASTOMER AND BASALT FABRIC

Mikhail M. Kopyrin ¹, Aital E. Markov ², Afanasii A. Dyakonov ³,
Sakhayana N. Danilova ⁴, Mikhail P. Lebedev ⁵, Aleksei G. Tuisov ⁶,
Aitalina A. Okhlopkova ⁷, Nadezhda N. Lazareva ⁸, Anatoly K. Kychkin ⁹

^{1, 2, 3, 5, 6} The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

¹ mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>

² aital.markov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>

³ afonya71185@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>

⁵ m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

⁶ tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>

^{3, 4, 7, 8} M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

⁴ dns.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

⁷ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

⁸ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁹ V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Yakutsk, Russia

⁹ kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

Abstract. An actual issue of materials science in the creation of elastomeric high-modulus composites based on materials of different chemical nature is the reliability of their connection to each other. With the introduction of reinforcing fillers into the elastomeric matrix, the question arises of the adhesion between the adhesive and the substrate, which is responsible for the reliability of the products during operation. The article proposes two methods for treating the surface of basalt fabric to increase contact with the rubber matrix: applying a dissolved rubber mixture in phenylmethane (toluene) and treating with layers of Chemosil 211/411. The obtained samples of reinforced elastomers with processing showed an increase in high-modulus properties - the tensile strength values were 38.1 ± 2.3 MPa in the first method and 36.4 ± 2.2 MPa in the second, while for the original reinforced elastomer this value was 29.0 ± 1.5 MPa. The application of a layer of dissolved rubber compound increased the adhesion index by ~16% compared to the original reinforced sample. Treatment with Chemosil 211/411 layers improved the adhesion of the reinforcing fabric with the rubber matrix by 10 times. The test for delamination between materials showed that the destruction occurred along the rubber and was of a cohesive nature. This indicates a strong interaction of the substrate with the adhesive, which exceeds the strength of the elastomer.

Keywords: composite elastomer, adhesion, strength, surface treatment, high-modulus material, reinforced rubber, basalt fabric.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the State Assignments No. FSRG-2020-0017 and No. FWRS-2022-0001.

For citation: Kopyrin, M. M., Markov, A. E., Dyakonov, A. A., Danilova, S. N., Lebedev, M. P., Tuisov, A. G., Okhlopkova, A. A., Kychkin, A. K., Lazareva, N. N. & Kychkin, A. A. (2022). Comparison of methods to increase adhesion between butadiene elastomer and basalt fabric. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 109-117. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014. EDN: <https://elibrary.ru/HEHCAI>.

ВВЕДЕНИЕ

Эластомеры и композиты на их основе показывают возрастающий интерес в производстве и повседневной жизни, что связано с их уникальным свойством – высокой способностью к многократным обратимым деформациям. Одним из важных факторов надежности при эксплуатации гибридных компози-

тов на основе эластомера и армирующего наполнителя является прочность соединения между адгезивом и субстратом. Также важным фактором при эксплуатации высокомодульных гибридных эластомерных композитов в климатических условиях Арктики и Субарктики является показатель морозостойкости составляющих материалов. Для создания гибридного эластомерного композита, спо-

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ БУТАДИЕНОВЫМ ЭЛАСТОМЕРОМ И БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНЬЮ

собного эксплуатироваться при отрицательных и положительных температурах, возможно применение морозостойких бутадиеновых, изопреновых, силиконовых, бутадиен-нитрильных каучуков с низким содержанием акрилонитрильной кислоты и т. д. [1, 2]. При этом добавление волокон в эластомерную матрицу позволяет повысить срок службы за счет повышения трещиностойкости изделия и придать требуемые свойства изделию (высокие значения прочности, стойкости к циклическим деформациям, модуля упругости и т.д.) [3–5].

Наиболее распространенными по применению высокомодульными армирующими наполнителями являются арамидные, углерод-, стекло- и базальтовые волокна. Данные материалы обладают высокими значениями предела прочности (до 6–7 ГПа) и модуля упругости (до 300 ГПа) и сохраняют стабильность физико-механических свойств в широком диапазоне температур [6–8]. При этом применение базальтового волокна в качестве наполнителя эластомерной матрицы вызывает больший интерес, так как по прочностным свойствам не уступают остальным типам волокон при относительно доступной цене [9]. Особенностью данного материала является высокая химическая стойкость к сильным кислотам и щелочам, что объясняется образованием защитной пленки на поверхности из-за подверженности базальта быстрой адсорбции и частичному растворению, что также приводит к замедлению старения материала [10].

При введении армирующих наполнителей встает вопрос об их адгезионном взаимодействии с эластомерной матрицей. Например, в работе [11] рассматривали применение армирующих волокон для зубчатых ремней. Резорцин-формальдегидлатекс для сравнения армировали поверхностно-окисленным углеродным волокном марки T700GC-31E и стекловолокном AGY-S2. Авторами была показана взаимосвязь повышения адгезии углеродного волокна с резиной за счет более высокого содержания кислорода на поверхности волокна и, следовательно, более высокой поверхностной энергии. В работе [12] рассматривали долговечность композитного эластомера на основе натурального каучука, наполненного порошком из ротанга, и влияние силанового связующего агента. Было установлено, что добавление связующего агента позволило улучшить показатели усталостной долговечности и свойств старения материала за счет повышения адгезии между матрицей и субстратом. Как показал литературный анализ, наиболее доступным

способом повышения адгезионных показателей при армировании полимерных материалов является предварительная поверхностная обработка наполнителей. В работе [13] показано повышение адгезии полипропилена со стекловолокном за счет поверхностной обработки волокна метилалюмоксаном и гидроксидом α-олефином (9-децен-1-ол). В работе [14] установлено, что плазменное окисление и полимеризация поверхности субстрата приводят к повышению адгезии между стекловолокном и полиэфирной смолой. В патенте [15] представлен способ повышения сцепления между стекловолокном и стирол-бутадиенвинилпиридиновым эластомером за счет поверхностной обработки наполнителя раствором γ-аминопропилтриэтоксисилана, глицерина и воды. Таким образом, разработка альтернативных методов и способов повышения адгезионного сцепления между слоями высокомодульных изделий без усложнения технологического процесса является актуальным вопросом в полимерном материаловедении.

Целью работы является повышение адгезии между базальтовой тканью и эластомерной матрицей на основе бутадиенового каучука марки СКД-В путем нанесения растворенной резиновой смеси в фенилметане (толуол) и праймера с адгезивом Хемосил 211/411 на поверхность базальтовых волокон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе в качестве объектов исследования выступают высокомодульные гибридные эластомерные материалы, армированные усиливающей тканью методом послойной укладки.

В роли армирующего наполнителя использовалась ткань из базальтового волокна (БТ) марки БТ-11 (100) (Фабрика технических тканей, Россия) с поверхностной плотностью 351 г/м² и саржевым переплетением 5/3. Микрофотография ткани приведена на рисунке 1.

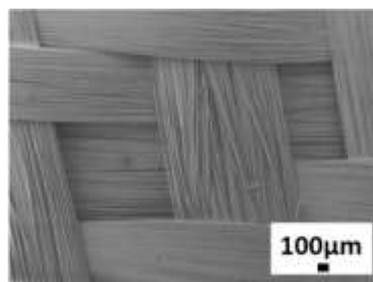


Рисунок 1 – Микрофотография ткани БТ

Figure 1 - Micrograph of tissue BF

На микрофотографии видно, что базальтовая ткань имеет плотное переплетение между пучками волокон, что обусловлено соотношением количества межучочных переплетений волокон базальтовой ткани – 5 : 3.

В качестве эластомерной матрицы использовалась резиновая смесь на основе морозостойкого бутадиенового каучука марки СКД-В с содержанием цис-1,4-звеньев не менее 90 %, являющейся продуктом полимеризации бутадиена в растворе [16] (Сибур, Россия). Смешение ингредиентов резиновой смеси производили на лабораторных вальцах открытого типа Plastograph EC Plus (Brabender, Германия) в течение 20 мин при начальной температуре валков 40 °С. Рецепт и время введения ингредиентов в резиновую смесь приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Рецепт резиновой смеси на основе СКД-В и время введения

Table 1 - The formulation of the rubber compound based on SKD-V and the time of injection

| № | Ингредиенты | Масс. ч. | Время введения, мин |
|---|--------------------------|----------|---------------------|
| 1 | СКД-В | 100,0 | 0 |
| 2 | Стеариновая кислота | 2,0 | 0 |
| 3 | Технический углерод N550 | 50,0 | 2 |
| 4 | Оксид цинка | 3,0 | 5 |
| 5 | Сульфенамид Ц | 0,9 | 10 |
| 6 | Сера | 1,5 | 12 |

Для повышения сцепления волокна с полимерной матрицей использовали два способа. В первом способе на поверхности армирующих наполнителей наносили слой растворенной смеси (РС), которая состояла из резиновой смеси СКД-В и растворителя – толуол. Массовое соотношение резиновой смеси СКД-В и растворителя составляла 1 : 2. Данную РС наносили на ткань и высушивали в сушильном шкафу в течение 15 мин при температуре 45 °С. Во втором способе на поверхность БТ наносили послойно праймер и клей Хемосил 211/411 (Henkel, Германия). При этом после каждого нанесения ткань

просушивали в сушильном шкафу в течение 15 мин при температуре 45 °С.

Изготовление опытных образцов осуществлялось методом послойной укладки: резиновая смесь – армирующий слой ткани – резиновая смесь. Схематическое изображение укладки образцов приведено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Изображение армированного материала: слой эластомера – слой базальтовой ткани – слой эластомера

Figure 2 - Image of reinforced material: elastomer layer - basalt fabric layer - elastomer layer

Вулканизацию резиновых смесей и эластомерных композитов осуществляли в гидравлическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Россия) при температуре 155 °С и давлении 10 МПа в течение 20 мин.

Определение упруго-прочностных свойств эластомерных образцов проводили на испытательной машине Autograph AGS-JSTD (Shimadzu, Япония) согласно стандарту ISO 37-2020. Износостойкость образцов определяли на машине трения МИ-2 (Полимермаш групп, Россия) при использовании абразивной поверхности с зернистостью 150 согласно ISO 4649-85, при этом время проведения испытания составило 5 мин. Твердость композиционных материалов определяли по методу Шор А согласно стандарту ISO 7619-1-2009. Исследование микроструктуры низкотемпературных сколов и поверхности трения образцов проводили на растровом электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония) при низком ускоряющем напряжении в режиме вторичных электронов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 приведена диаграмма сравнения относительного удлинения и предела прочности резины и армированных композиционных материалов.

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ БУТАДИЕНОВЫМ ЭЛАСТОМЕРОМ И БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНЬЮ

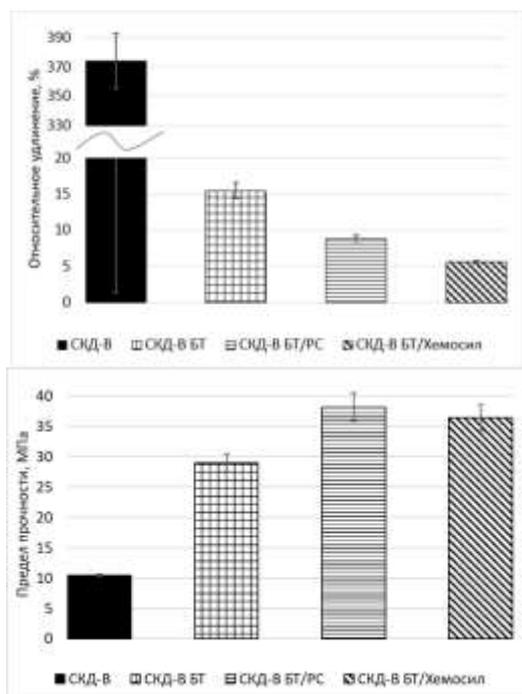


Рисунок 3 – Диаграммы упруго-прочностных свойств эластомеров на основе каучука СКД-В, СКД-В БТ, СКД-В БТ/РС, СКД-В БТ/Хемосил

Figure 3 - Diagrams of physical and mechanical properties of elastomers based on rubber SKD-V, SKD-V BF, SKD-V BF/DC, SKD-V BF/Chemosil

Из диаграммы относительного удлинения видно, что введение армирующего слоя БТ снизило данный показатель с $374,1 \pm 18,7\%$ до $15,5 \pm 0,9\%$. У образца СКД-В БТ/РС данный показатель имеет значение в $8,9 \pm 0,4\%$, а у образца СКД-В БТ/Хемосил – $5,6 \pm 0,2\%$. В первом случае снижение относительного удлинения связано с сопротивлением базальтовых волокон. В то же время снижение относительного удлинения у образца с нанесением РС может быть связано с появлением резинового каркаса на поверхностном слое ткани и, соответственно, повышению сопротивления при деформации композита. У образца СКД-В БТ/Хемосил зафиксировано максимальное снижение показателя относительного удлинения, что объясняется образованием жесткого каркаса клея и более заметного снижения эластичных свойств композита.

Введение базальтовой ткани существенно повлияло на показатели прочности композитного эластомера. Исходный армированный композит СКД-В БТ показал повышение предела прочности в $\sim 2,8$ раза по сравнению с резиной СКД-В и составил $29,0 \pm 1,5$ МПа.

Образцы с нанесением слоев праймера и клея Хемосил 211/411 показали повышение предела прочности до $36,4 \pm 2,2$ МПа. Максимальное повышение предела прочности наблюдается у образца СКД-В БТ/РС, которая составила $38,1 \pm 2,3$ МПа. Таким образом, армирование эластомеров базальтовой тканью приводит к снижению относительного удлинения и повышению предела прочности, что придает композитам высокомолекулярные свойства.

На рисунке 4 представлены микрофотографии образцов, полученных методом “хрупкого” скола в жидком азоте.

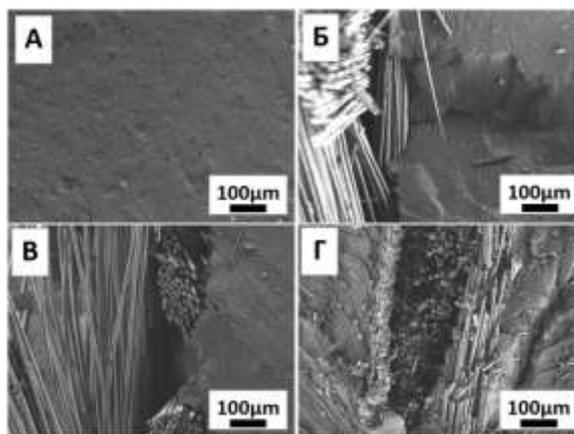


Рисунок 4 – Микрофотографии сколов образцов: а) СКД-В; б) СКД-В БТ; в) СКД-В БТ/РС; г) СКД-В БТ/Хемосил

Figure 4 - Micrographs of chipped samples: а) SKD-V BF; б) SKD-V BF; в) SKD-V BF/DC; г) SKD-V BF/Chemosil

По представленным фотографиям на рисунке 4, б видно, что у образцов СКД-В БТ низкое сцепление ткани с резиной по сравнению с образцами с базальтовой тканью после обработки растворенной смесью (рис. 4, в) и Хемосилом (рис. 4, г). Исходя из рисунка 4, в можно сделать вывод, что растворенная резиновая смесь после нанесения проникает в свободное пространство между волокнами и свулканизировалась во время горячего прессования. На рисунке 4, г видно, что не наблюдается отслоения между компонентами армированного композита, так как Хемосил в процессе вулканизации химически взаимодействует с базальтовой тканью, с одной стороны, и эластомерной матрицей – с другой (перекрестные реакции) [17].

В таблице 2 приведены значения твердости по Шор А исходных армированных резин и композитных эластомеров с обработанными базальтовыми тканями.

Таблица 2 – Твердость по Шор А эластомеров на основе каучука СКД-В, СКД-В БТ, СКД-В БТ/РС, СКД-В БТ/Хемосил

Table 2 - Shore A hardness of elastomers based on rubber SKD-V, SKD-V BF, SKD-V BF/DC, SKD-V BF/Chemosil

| Образец | Шор А, усл.ед. |
|------------------|----------------|
| СКД-В | 65,6±2,6 |
| СКД-В БТ | 66,4±2,7 |
| СКД-В БТ/РС | 69,5±3,5 |
| СКД-В БТ/Хемосил | 73,5±4,4 |

По представленным в таблице результатам видно, что армирование базальтовой тканью СКД-В не вызывает изменение показателя твердости и находится на одном уровне с исходной резиной СКД-В. Модифицирование ткани РС повысило значение твердости на 4,7 %, а Хемосилом – 10,7 % по сравнению с СКД-В БТ. Как и было предположено выше, это связано с появлением жесткого каркаса на поверхности модифицированных армирующих наполнителей с проникновением РС в свободное пространство ткани и химически сшитой структуры между слоями с Хемосилом.

На рисунке 5 приведена диаграмма сравнения показателей износостойкости образцов резины СКД-В и гибридных эластомерных композитов.

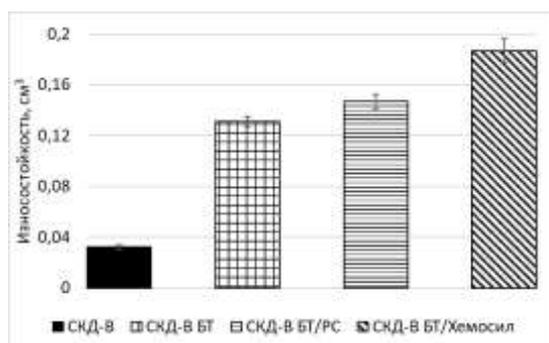


Рисунок 5 – Диаграмма износостойкости эластомеров на основе каучука СКД-В, СКД-В БТ, СКД-В БТ/РС, СКД-В БТ/Хемосил

Figure 5 - Diagram of wear resistance of elastomers based on rubber SKD-V, SKD-V BF, SKD-V BF/DC, SKD-V BF/Chemosil

Из диаграммы видно, что введение базальтовой ткани значительно повлияло на показатели износостойкости. Образец СКД-В БТ показал снижение показателя на износ в

4,1 раза по сравнению с исходной резиной, при этом добавление БТ, модифицированной РС, снизило в 4,6 раза, а обработка БТ Хемосилом – в 5,8 раза. Известно, что показатель износостойкости напрямую зависит от плотности и объема образца, и данная корреляция показателей может быть связана с повышением плотности исследуемых материалов за счет добавления армирующих слоев с обработкой и без.

На рисунке 6 представлены микрофотографии поверхности образцов после испытаний на абразивостойкость.

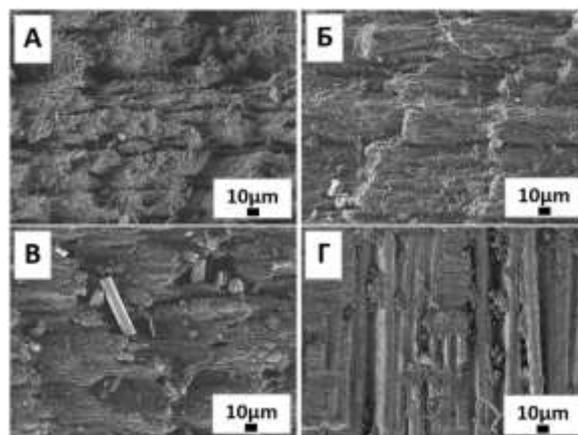


Рисунок 6 – Микрофотографии образцов: а) СКД-В; б) СКД-В БТ; в) СКД-В БТ/РС; г) СКД-В БТ/Хемосил

Figure 6 - Micrographs of samples: a) SKD-V; b) SKD-V BF; c) SKD-V BF/DC; d) SKD-V BF/Chemosil

Из приведенных микрофотографий видно, что армированный образец СКД-В БТ обладает более гладкой и волнообразной поверхностью (рис. 6, б) по сравнению с исходной резиной (рис. 6, а). Это может быть связано с тем, что ткань проявляет себя как регулятор напряжения. В случае армированного композита, обработанной РС, поверхность характеризуется как более гладкая, при этом видны заломы волокон (рис. 6, в). Это может быть обусловлено тем, что обработка с РС способствует к проникновению эластомерной матрицы в ткань между волокнами и, следовательно, часть волокон сильнее истирается. На рисунке 6, г видны волокна на поверхности материала, что указывает на повышенное сцепление между волокном и эластомером.

На рисунке 7 представлена диаграмма результатов испытаний когезионного расслоения резины СКД-В, адгезионного расслоения между эластомером и БТ в зависимости от обработки.

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ БУТАДИЕНОВЫМ ЭЛАСТОМЕРОМ И БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНЬЮ

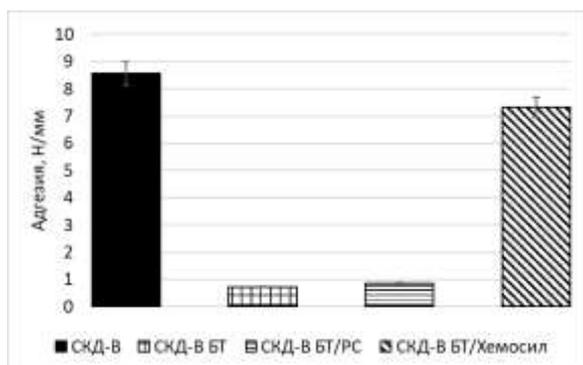


Рисунок 7 – Диаграмма расслоения эластомеров на основе каучука СКД-В, СКД-В БТ, СКД-В БТ/РС, СКД-В БТ/Хемосил

Figure 7 - Diagram of delamination of elastomers based on rubber SKD-V, SKD-V BF, SKD-V BF/DC, SKD-V BF/Chemosil

Из диаграммы видно, что адгезия эластомерной матрицы с БТ существенно ниже когезионной прочности исходной резины. Это связано с тем, что базальтовая ткань термодинамически не совместима с резиновой матрицей. При этом по схеме укладки армированная ткань находится между двумя слоями резины, и в процессе вулканизации не дает им прореагировать.

Образец с БТ, обработанный растворенной смесью, показал повышение адгезии на ~16 % – от 0,73 до 0,85 Н/мм. Значительное повышение адгезии наблюдается у образца СКД-В с БТ предварительно обработанного Хемосилом, адгезия увеличивается в 10 раз по сравнению с исходным армированным образцом и составляет 7,33 Н/мм. При испытании на расслоение, разрушение носит когезионный характер. Это свидетельствует о том, что адгезия между наполнителем и матрицей превышает когезионную прочность резины.

На рисунке 8 представлены микрофотографии образцов после испытания на прочность адгезии.

На рисунках 8, а и б зафиксировано наличие остаточных волокон на поверхности эластомера после расслоения. На рисунке 8, б наблюдаются волокна непосредственно на поверхности эластомера, когда как на рисунке 8, а они лежат хаотично. Предположительно, это связано с увеличением взаимодействия между материалами за счет поверхностной обработки РС. Наибольший интерес вызывает микрофотография образца СКД-В БТ/Хемосил (рис. 8, в). Показано, что пучки волокон хорошо сохранили свое расположение на поверхности резины и при этом наблюдается когезионный тип разрушения. Такие результаты анализа микроструктуры

свидетельствуют о повышении взаимодействия ткани с эластомерной матрицей и коррелируют с выводами испытаний на адгезию.

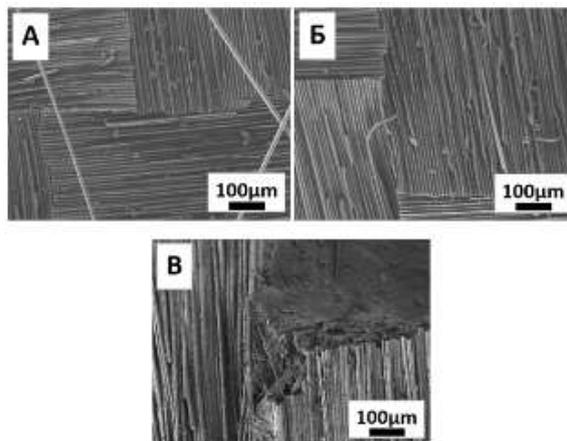


Рисунок 8 – Микрофотографии армированных образцов со стороны слоя эластомера после расслоения: а) СКД-В БТ; б) СКД-В БТ/РС; в) СКД-В БТ/Хемосил

Figure 8 - Micrographs of samples: a) SKD-V BF; b) SKD-V BF/DC; c) SKD-V BF/Chemosil. from the side of the elastomer layer after tests to determine the adhesive characteristics.

ВЫВОДЫ

В данной работе поверхность наполнителя из базальтовой ткани обрабатывали двумя способами: растворенной в толуоле резиновой смесью и смесью праймера и адгезива Хемосил 211/411. В последующем исследуемые образцы были уложены путем послойной укладки и вулканизированы с резиной на основе каучука СКД-В. На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- армирование эластомера БТ придает эластомерному композиту высокоэластичные свойства за счет повышения деформационной прочности и устойчивости к сдвиговым разрушениям. Обработка РС наполнителя повысило максимальное значение предела прочности – 38,1 МПа. У образцов с нанесением слоев Хемосил 211/411 данный показатель составил 36,4 МПа. При этом показатели относительного удлинения снизились в 24–67 раз по сравнению с резиной СКД-В;
- нанесение на поверхность армирующей ткани РС и Хемосила повышает показатели твердости на 4,7 % и 10,7 % соответственно по сравнению с исходной армированной резиной, что связано в первом случае с проникновением резины в свободное про-

странство ткани и во втором – с образованием жесткого каркаса клея;

- армированный образец СКД-В БТ показал снижение показателя износостойкости в 4,1 раза по сравнению с исходной резиной. У образца с обработанной поверхностью ткани РС данное значение снизилось в 4,6 раза, а у образца с обработкой Хемосилом – в 5,8 раза.

- введение БТ в эластомерную матрицу показало низкое взаимодействие. По сравнению с исходным армированным материалом обработка ткани РС позволила повысить показатель адгезии на 16 %, а нанесение на наполнитель слоев Хемосила – в 10 раз. Разрушение образца в последнем случае носит когезионный характер.

По результатам физико-механических испытаний и исследования микроструктуры композиционных эластомерных материалов можно сделать вывод, что армирующие ткани лучше контактируют с поверхностью эластомера в случае нанесения праймера и клея Хемосил 211/411.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование неодимовых каучуков в резинах протекторов и боковин шин / А.Е. Корнев [и др.] // Каучук и резина. – 2004. – № 6. – С. 7–10.
2. Большой справочник резинщика. Ч. 1. Резины и резинотехнические изделия / под общ. ред. С.В. Резниченко и Ю.Л. Морозова. – М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. – 735 с.
3. Conway, K.M. & Pataky, G.J. (2022). Aramid Fiber Surface Area Impact on Elastomer Crack Growth. *Exp Mech.* (In Eng). DOI:10.1007/s11340-022-00901-2.
4. Müller, K., Reußmann, T., Lützkendorf, R. & Schmitt, M. (2011). Aramid pulp for the reinforcement of thermoplastic elastomers. *Int Polym Sci Technol*, 38, 1-4. (In Eng). DOI:10.1177/0307174X110380050.
5. Andreopoulos, A.G., Konstantinidou, A.V. & Petsalas, H.J. (1989). Elastomeric polyurethanes reinforced with aramid fibers. *J. Appl. Polym. Sci*, 38, P. 2073-2078. (In Eng). DOI:10.1002/app.1989.070381109.
6. Тростянская, Е.Б. Армированные пластики: справ. пособие / под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. – М.: МАИ, 1997. – 268 с.
7. Newcomb, B.A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 262-282. (In Eng). DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.10.018.
8. Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*, Vol. 2(4), 2369-2403. (In Eng). DOI:10.3390/ma2042369.
9. Ибатуллина, А.Р. Обзор производителей и сравнение свойств сверхпрочных высокомодульных волокон // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 19. – С. 136–139.
10. Dalinkevich, A.A., Gumargalieva, K.Z., Marakhovskiy, S.S. & Soukhanov, A.V. (2009). Modern basalt fibrous materials and basalt fiber-based polymeric composites. *Journal of Natural Fibers*, 6(3), 248-271. (In Eng). DOI: 10.1080/15440470903123173.

11. Bai, S., Jones, M.P., Pech de Laclause, T., Jiang, Q., Mautner, A., Swolfs, Y. & Bismarck, A. (2022). Towards robust synchronous belts: influence of surface characteristics on interfacial adhesion. *Composite Interfaces*, 1-15. (In Eng). DOI: 10.1080/09276440.2022.2029311.

12. Ismail, H., Muniandy, K. & Othman, N. (2012). Fatigue life, morphological studies, and thermal aging of rattan powder-filled natural rubber composites as a function of filler loading and a silane coupling agent. *Bio Resources*, 7(1), 0841-0858. DOI:10.15376/biores.7.1.0841-0858.

13. Etcheverry, M. & Barbosa, S.E. (2012). Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. *Materials*, 5(6), 1084-1113. (In Eng). DOI:10.3390/ma5061084.

14. Cech, V., Knob, A., Hosein, H.A., Babik, A., Lepcio, P., Ondreas, F. & Drzal, L.T. (2014). Enhanced interfacial adhesion of glass fibers by tetra vinylsilane plasma modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 58, 84-89. (In Eng). DOI:10.1016/j.compositesa.2013.12.003.

15. Способ повышения адгезии стекловолнока к резинам: пат. 326775 СССР № 1345942/23-5 : заявл. 07.07.1969 : опубл. 19.01.1972, Бюл. № 4.

16. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков / В.В. Мухин [и др.]. // Вестник СВФУ. 2016. – № 6 (56). – С. 41–50.

17. Crowther, B.G. (ed) Handbook of rubber bonding. UK: iSmithers Rapra Publishing, 2001. – 400 p. (in Eng).

Информация об авторах

М. М. Копырин – м.н.с. «Лаборатории Композитных Материалов Арктики и Субарктики» Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН».

А. Е. Марков – инженер-исследователь «Лаборатории Композитных Материалов Арктики и Субарктики» Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН».

А. А. Дьяконов – к.т.н., с.н.с. «Лаборатории Композитных Материалов Арктики и Субарктики» Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН», с.н.с. УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов» Института естественных наук ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

С. Н. Данилова – м.н.с. лаборатории «Полимерные композиты для Севера» Института естественных наук ФГАОУ ВО «Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова».

М. П. Лебедев – член-корреспондент РАН, д.т.н., генеральный директор ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»

А. Г. Туисов – к.т.н., зав. лабораторией Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН».

А. А. Охлопкова – д.т.н., профессор химического отделения Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

Н. Н. Лазарева – к.т.н., зав. УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов» Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

А. К. Кычкин – к.т.н., в.н.с. ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН».

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ БУТАДИЕНОВЫМ ЭЛАСТОМЕРОМ И БАЗАЛЬТОВОЙ ТКАНЬЮ

REFERENCES

1. Kornev, A.E., Bobrov, A.P., Kuzin, V.S. & Zvezdnikov, K.A. (2004). Use of neodymium rubbers in tread and sidewall rubbers. *Int Polym Sci Technol*, (6), 7-10. (In Russ.).
2. Reznichenko, S.V. & Morozova, Yu.L. (2012). The Complete Manual of the Rubberman. Part 1. Rubber and rubber products. Moscow: OOO «Izdatel'skij centr «Tekhinform MAI». (In Russ.).
3. Conway, K.M. & Pataky, G.J. (2022). Aramid Fiber Surface Area Impact on Elastomer Crack Growth. *Exp Mech*. (In Eng). DOI:10.1007/s11340-022-00901-2.
4. Müller, K., Reußmann, T., Lützkendorf, R. & Schmitt, M. (2011). Aramid pulp for the reinforcement of thermoplastic elastomers. *Int Polym Sci Technol*, 38, 1-4. (In Eng). DOI:10.1177/0307174X110380050.
5. Andreopoulos, A.G., Konstantinidou, A.V. & Petsalas, H.J. (1989). Elastomeric polyurethanes reinforced with aramid fibers. *J. Appl. Polym. Sci*, 38, P. 2073-2078. (In Eng). DOI:10.1002/app.1989.070381109.
6. Trostyanskaya, E.B. (1997) Reinforced Plastics: Reference Manual / ed. by. G.S. Golovkina, V.I. Semenova. Moscow : MAI. (In Russ.).
7. Newcomb, B.A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 262-282. (In Eng). DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.10.018.
8. Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*, Vol. 2(4), 2369-2403. (In Eng). DOI:10.3390/ma2042369.
9. Ibatullina, A.R. (2014). Review of manufacturers and comparison of properties of ultra high-strength high-modulus fibers. *Bulletin of Kazan Technological University*, 17(19), 136-139. (In Russ.).
10. Dalinkevich, A.A., Gumargalieva, K.Z., Marakhovskiy, S.S. & Soukhanov, A.V. (2009). Modern basalt fibrous materials and basalt fiber-based polymeric composites. *Journal of Natural Fibers*, 6(3), 248-271. (In Eng). DOI: 10.1080/15440470903123173.
11. Bai, S., Jones, M.P., Pech de Laclause, T., Jiang, Q., Mautner, A., Swolfs, Y. & Bismarck, A. (2022). Towards robust synchronous belts: influence of surface characteristics on interfacial adhesion. *Composite Interfaces*, 1-15. (In Eng). DOI: 10.1080/09276440.2022.2029311.
12. Ismail, H., Muniandy, K. & Othman, N. (2012). Fatigue life, morphological studies, and thermal aging of rattan powder-filled natural rubber composites as a function of filler loading and a silane coupling agent. *Bio Resources*, 7(1), 0841-0858. DOI:10.15376/biores.7.1.0841-0858.
13. Etcheverry, M. & Barbosa, S.E. (2012). Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. *Materials*, 5(6), 1084-1113. (In Eng). DOI:10.3390/ma5061084.
14. Cech, V., Knob, A., Hosein, H.A., Babik, A., Lepcio, P., Ondreas, F. & Drzal, L.T. (2014). Enhanced interfacial adhesion of glass fibers by tetravinylsilane plasma modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 58, 84-89. (In Eng). DOI:10.1016/j.compositesa.2013.12.003.
15. Satoru, O., Tokudji, F., Kunio, M., Tomikadju, S., Hiroyaki, H. & Sabure, N. Method for increasing the adhesion of glass fibers to rubbers. Pat. 326775. USSR, published on 19.01.1972. Bull. No. 4. (In Russ.).
16. Mukhin, V.V., Petrova, N.N., Kapitonov, E.A. & Afanasiev, A.V. (2016). Development of rubbers based on mixtures of nitrile and diene rubbers that are resistant to aviation synthetic oils. *Vestnik of NEFU*, 6(56), 41-50. (In Russ.).
17. Crowther, B.G. (ed) Handbook of rubber bonding. UK: iSmithers Rapra Publishing, 2001. 400 p. (In Eng).

Information about the authors

M. M. Kopyrin - Junior Researcher "Laboratory of Composite Materials of Arctic and Subarctic" of the Federal Research Center "The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS".

A. E. Markov - Research Engineer "Laboratory of Composite Materials of Arctic and Subarctic" of the Federal Research Center "The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS".

A. A. Dyakonov - Candidate of Technical Sciences, senior researcher "Laboratory of Composite Materials of Arctic and Subarctic" of the Federal Research Center "The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS", senior researcher of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymer nanocomposites", Institute of Natural Sciences, NEFU.

S. N. Danilova - Junior Researcher of the Laboratory "Polymer Composites for the North", Institute of Natural Sciences, NEFU.

M. P. Lebedev - corresponding member of RAS, Doctor of Technical Sciences, chief researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS.

A. G. Tuisov - Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS".

A. A. Okhlopko - Doctor of Technical Sciences, professor of the Chemical Department, Institute of Natural Sciences, NEFU.

N. N. Lazareva - Candidate of Technical Sciences, Head of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymer nanocomposites", Institute of Natural Sciences, NEFU.

A. K. Kychkin - Candidate of Technical Sciences, leading researcher of the "V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.