



Оригинальная статья

Влияние поверхностной обработки армирующих тканей на физико-механические свойства эластомерных композитов

А. Е. Марков^{✉,1}, А. А. Дьяконов^{1,2}, А. Г. Туисов¹, А. А. Охлопкова²

¹Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉aital.markov@gmail.com

Аннотация

При создании композиционных материалов одной из проблем является слабое адгезионное взаимодействие между матрицей и наполнителем, что резко снижает надежность и долговечность изделия. Для ее решения применяют химическую и физическую модификацию поверхности наполнителя, чтобы создать прочную связь на границе раздела фаз. В работе рассматривается взаимодействие модифицированных высокомолекулярных волокон и эластомерной матрицы. Исследовано влияние поверхностной обработки базальтовых (БТ) и углеродных (УТ) тканей на свойства эластомерных композитов на основе бутадиенового каучука. Изучалось два метода поверхностной обработки: раствором резиновой смеси в толуоле (РС) и адгезивом Хемосил 411. Микроструктурный анализ выявил, что необработанные образцы расслаиваются на границе контакта БТ с УТ из-за плохой адгезии между тканями, тогда как обработанные образцы характеризуются высокой адгезией между армирующими волокнами. Зарегистрировано формирование плотного контакта БТ и УТ с эластомерной матрицей за счет диффузии макромолекул каучука, происходящей в процессе вулканизации. Упругопрочностные испытания свидетельствуют о том, что комбинированное армирование БТ совместно с УТ повышает прочность композитов в 4,9 раза по сравнению с исходным эластомером в связи с распределением нагрузки на волокна. Нанесение на поверхность армирующих тканей РС обеспечивает наибольшую прочность, а обработка Хемосилом – высокую устойчивость в среде гидравлического масла. Адгезионные испытания подтвердили, что Хемосил сохраняет прочность сцепления между БТ и УТ после воздействия углеводородной среды благодаря защитному барьерному эффекту каркаса из адгезива. При длительном термическом воздействии происходит снижение адгезионной прочности всех образцов вследствие деструкции полимерной матрицы и клеевого слоя, а также увеличивается их твердость за счет образования дополнительных связей между макромолекулами каучука из-за довулканизации. Полученные результаты доказывают, что предварительная обработка базальтовых и углеродных волокон адгезивами эффективна при создании композитов на основе эластомерной матрицы и высокомолекулярных волокон.

Ключевые слова: базальтовая ткань, углеродная ткань, эластомер, адгезия, растворенная резиновая смесь, Хемосил

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (код научной темы: № FWRS-2025-0027 и № FSRG-2023-0026).

Для цитирования: Марков А.Е., Дьяконов А.А., Туисов А.Г., Охлопкова А.А. Влияние поверхностной обработки армирующих тканей на физико-механические свойства эластомерных композитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):673–682. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-673-682>

Original article

Effect of reinforcement surface treatment on the physico-mechanical properties of elastomeric composites

Aital E. Markov^{✉,1}, Afanasiy A. Dyakonov^{1,2}, Aleksei G. Tuisov¹, Aitalina A. Okhlopko²

¹Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉aital.markov@gmail.com

Abstract

A fundamental challenge in composite materials engineering is insufficient adhesive bonding between the matrix and the filler, which significantly reduces product reliability and durability. To address this problem, chemical and physical

surface modification of the filler is employed so that a strong bond can be created at the phase interface. This study examines the interaction between modified high-modulus fibers and an elastomeric matrix, specifically investigating the influence of surface treatment for basalt (BF) and carbon (CF) fabrics on the properties of elastomeric composites based on butadiene rubber. Two surface treatment methods were studied: a rubber compound solution in toluene (RCS) and Chemosil 411 adhesive. Microstructural analysis revealed that untreated samples delaminate at the BF/CF interface due to poor adhesion between the fabrics, whereas treated samples exhibit strong adhesion between the reinforcing fibers. Furthermore, the formation of a dense contact between the fibers and the elastomeric matrix was registered, which is attributed to the diffusion of rubber macromolecules during vulcanization. Mechanical testing demonstrates that combined reinforcement with BF and CF increases composite strength by 4.9 times compared to the original elastomer, as this is related to effective load distribution across the fibers. While applying RCS to the fabric surface provides the highest strength, treatment with Chemosil ensures high stability in a hydraulic oil environment. Adhesion tests confirmed that Chemosil maintains the bond strength between BF and CF after hydrocarbon exposure because the adhesive layer acts as a protective barrier. However, under prolonged thermal exposure, all samples show reduced adhesive strength due to the degradation of both the polymer matrix and the adhesive layer; additionally, their hardness increases since additional cross-linking between rubber macromolecules occurs via post-vulcanization. In conclusion, the results prove that pre-treating basalt and carbon fibers with adhesives is effective for creating composites based on an elastomeric matrix and high-modulus fibers.

Keywords: basalt fabric, carbon fabric, elastomer, adhesion, dissolved rubber compound, Chemosil

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRS-2025-0027 and FSRG-2023-0026).

For citation: Markov A.E., Dyakonov A.A., Tuisov A.G., Okhlopko A.A. Effect of reinforcement surface treatment on the physico-mechanical properties of elastomeric composites. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):673–682. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-673-682>

Введение

Исследование и разработка новых полимерных композиционных материалов составляют одну из основ современного материаловедения. Полимерные композиты обладают рядом уникальных свойств в зависимости от используемых компонентов. В настоящее время существует множество вариантов и методов создания подобных материалов [1–5].

Наиболее востребованными для армирования различных полимерных матриц являются ткани из базальто-, стекло- и углеволокон [6–10]. Их использование в качестве армирующих ингредиентов полимерных материалов существенно повышает прочностные характеристики композитов. Также эти ткани характеризуются хорошей химической стойкостью вследствие образования защитной пленки на поверхности базальтового волокна за счет частичного растворения последнего [11], а углеволокно при стандартных условиях проявляет химическую инертность [12, 13]. Главной проблемой таких материалов является надежность адгезионного взаимодействия с полимерным связующим.

Армированный эластомерный композит представляет собой ткань, обрешеченную с двух сторон. Прочность их соединения может зависеть от состава замасливателя, который препятствует адгезионному взаимодействию. Поверхностная обработка может улучшить адгезию между ар-

мирующими наполнителями и полимерной матрицей, что в свою очередь повышает надежность соединения [14, 15]. Также существует способ модификации поверхности волокон путем прямого фторирования [16]. Данный способ в основном подходит для фенольных смол, где важна смачиваемость волокон. Таким образом увеличивается химическая активность поверхности волокна и повышается адгезионная прочность на границе раздела фаз между материалами.

В исследовании [17] поверхностную пропитку волокон производили раствором резиновой смеси (РС) в толуоле. Данный способ позволил повысить прочность соединения на 24 % за счет улучшения адгезии между базальтовой тканью (БТ) и эластомерной матрицей, которая составила 0,85 Н/мм. Также в работах [18–20] приводится обработка волокон клеем Хемосил, что увеличивает адгезионную прочность соединения до 9 Н/мм, а это в 10,6 раза больше по сравнению с обработкой РС. Улучшение адгезионных характеристик двух и более материалов является актуальной проблемой.

Целью данного исследования является изучение влияния растворенной резиновой смеси и клея Хемосил на адгезионную прочность между базальтовыми и углеродными волокнами в эластомерной матрице, а также оценка их воздействия на физико-механические свойства композита.

Материалы и методы

Объектом исследования является эластомер, армированный базальтовой и углеродной тканями. В качестве армирующего наполнителя применялись базальтовая ткань (БТ) марки БТ-11 (Фабрика технических тканей, Россия) с поверхностной плотностью 351 г/м² и саржевым переплетением 5/3, углеродная ткань (УТ) марки 2/2–1000–12К-400 (Препрег-СКМ, Россия) с плотностью 407 г/м² и саржевым переплетением 2/2. В качестве полимерного связующего использовали резиновую смесь на основе бутадиенового каучука марки СКД-В (СИБУР, Россия), содержащую не менее 90 % 1,4 цис-звеньев. Рецепт-ура резиновой смеси и процесс смешения: сначала вводится 100 мас.ч. каучука СКД-В с 2 мас.ч. стеариновой кислоты; на 2-й минуте добавляется 50 мас.ч. технического углерода N550; на 5-й минуте вводится 3 мас.ч. оксида цинка; на 10-й минуте добавляется 0,9 мас.ч. сульфенамида Ц; на 12-й минуте вводится 1,5 мас.ч. серы. Смешение ингредиентов производили в лабораторном резиносмесителе закрытого типа PL-2200 (Brabender, Германия), общее время смешения 20 мин при начальной температуре валков 40 °С.

Для усиления адгезионного взаимодействия между связующим и армирующими тканями проводили поверхностную обработку волокон, так как исходная поверхность армирующих волокон не образует прочного соединения с эластомерной матрицей:

- растворенной резиновой смесью (РС) в толуоле (Протон, Россия) в соотношении 1:2. Раствор резиновой смеси наносили на БТ и УТ с последующей сушкой в термошкафу при температуре 45 °С в течение 15 мин.;

- адгезивом Хемосил 411 (Henkel, Германия), представляющим собой смесь для склеивания резины к металлу. Адгезив Хемосил 411 наносили на БТ и УТ с сушкой в термошкафу при температуре 45 °С в течение 15 мин.

На рис. 1 приведены схемы укладки армирующих наполнителей в эластомерную матрицу. Для исследования влияния различных методов обработки тканей на адгезионную прочность соединения БТ с УТ сравнивали три варианта укладки: исходная базальто-углеродная ткань между слоями эластомера без обработки (рис. 1, а) (СКД-БТ/УТ); ткань, предварительно обработанная растворенной резиновой смесью, размещенная между эластомерными слоями (рис. 1, б) (СКД-БТ/УТ(РС)); ткань с нанесенным адгези-



Рис. 1. Схема укладки армирующего наполнителя в эластомер: а – исходная БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера; б – обработанные растворенной смесью БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера; в – обработанные адгезивом Хемосил БТ с УТ, уложенные между слоями эластомера

Fig. 1. Schematic layout of the reinforcing filler in the elastomer: а) untreated basalt (BF) and carbon fiber (CF) layers embedded between elastomer; б) BF and CF treated with a dissolved mixture and embedded; в) BF and CF treated with Xemosil adhesive and embedded

вом Хемосил, уложенная между слоями эластомера (рис. 1, в) (СКД-БТ/УТ(Хем)).

Вулканизацию эластомеров (СКД) и эластомерных композитов проводили в термогидрав-

лическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Россия) при 155 °С в течение 20 мин под давлением 10 МПа.

Упругопрочностные и адгезионные свойства исходных образцов после выдержки в течение 72 ч в гидравлическом масле АМГ-10 при комнатной температуре и в термощкафу при температуре 100 °С определяли на универсальной испытательной машине Autograph (Shimadzu, Япония). Упругопрочностные свойства исследовали в соответствии со стандартом ISO 37-2020 при комнатной температуре со скоростью растяжения 500 мм/мин. Прочность адгезионного соединения определяли по стандарту ISO 36-2017 при скорости передвижения захватов 50 мм/мин. Определение твердости Шор А эластомеров и композитов осуществляли по стандарту ISO 7619-1-2009. Исследование надмолекулярной структуры среза образцов проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-7800F (JEOL, Япония) в режиме вторичных электронов.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлен снимок образца СКД-БТ/УТ без предварительной поверхностной обработки. Как видно из фотографии, между слоями БТ и УТ не произошло взаимодействия, вследствие чего расслоение проявилось на границе контакта при минимальном механическом воздействии. Это свидетельствует о крайне низкой адгезионной прочности соединения. Учитывая отсутствие сцепления между материалами, дальнейшее исследование свойств данного композита не проводилось.

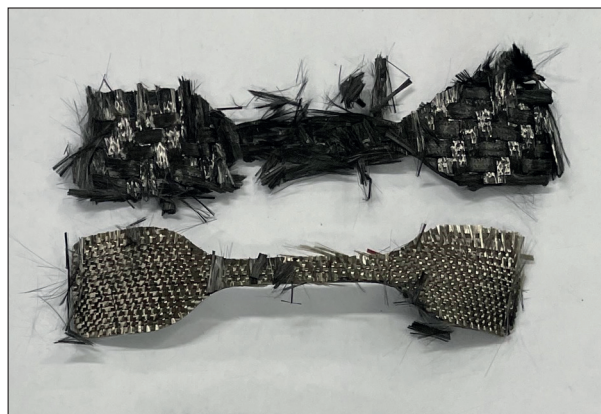


Рис. 2. Расслоившийся образец СКД-БТ/УТ без предварительной поверхностной обработки волокон

Fig. 2. Delamination in a specimen of hybrid SKD-BF/CF composite without prior fiber surface treatment

На рис. 3 приведены результаты исследования предела прочности эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. Анализ механических свойств композитных материалов выявил, что исходный образец СКД-БТ/УТ(РС) демонстрирует максимальную прочность при растяжении, превышающую показатели эластомера СКД в 4,9 раза благодаря армирующему эффекту базальтовых и углеродных волокон. Сравнение образцов СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) свидетельствует о сопоставимых значениях прочности с незначительным разбросом, обусловленным погрешностью измерений. Воздействие гидравлического масла приводит к снижению прочности всех образцов вследствие набухания и частичной деструкции эластомерной матрицы [21], при этом наименьшее снижение наблюдается у образца СКД-БТ/УТ(Хем) благодаря защитному действию клея Хемосил, препятствующего проникновению масла. Термическое воздействие на образцы приводит к разным изменениям: снижению прочности эластомера из-за термоокислительной деструкции, увеличению прочности СКД-БТ/УТ(РС) вследствие перераспределения нагрузки на армирующие волокна при уменьшении подвижности матрицы и сохранению стабильных характеристик СКД-БТ/УТ(Хем).

На рис. 4 приведены результаты исследования относительного удлинения эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. В результате армирования эластомерной матрицы БТ и УТ происходит снижение относительного удлинения композитов в 23,5 и 63 раза из-за ограничения деформационной способности высокомодульными волокнами по сравнению с исходной резиной. При этом у образца СКД-БТ/УТ(РС) зарегистрировано большее удлинение благодаря высокой подвижности эластомера по сравнению с жесткой структурой образца СКД-БТ/УТ(Хем). Воздействие гидравлического масла АМГ-10 приводит к пластификации и набуханию эластомера, что создает внутренние напряжения, вследствие чего снижается относительное удлинение [22]. При термическом старении происходит дополнительная вулканизация, которая снижает подвижность макромолекул, из-за чего уменьшаются показатели относительного удлинения.

На рис. 5 приведены результаты исследования твердости по Шор А эластомера и композитов до,

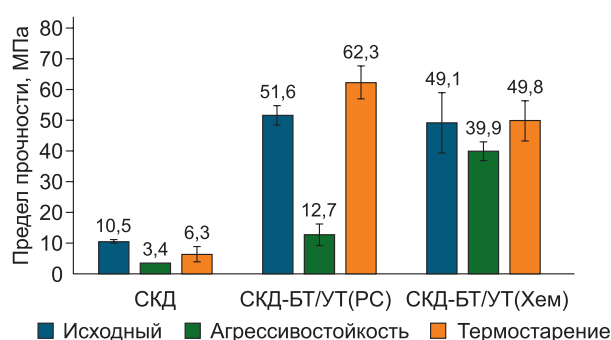


Рис. 3. Диаграмма предела прочности эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 3. Diagram of the tensile strength of elastomers and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

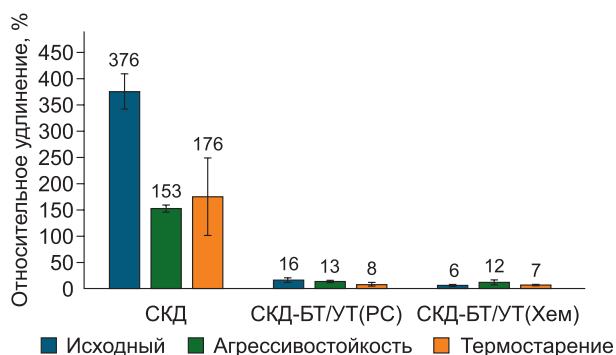


Рис. 4. Диаграмма относительного удлинения эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 4. Diagram of relative elongation of elastomer and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

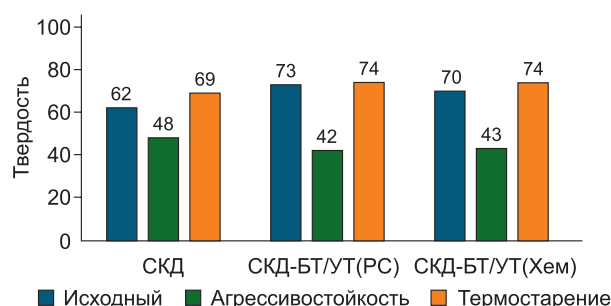


Рис. 5. Диаграмма твердости по Шор А эластомера и композитов до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 5. Diagram of the shore A hardness of elastomer and composites before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения. Твердость исходных образцов СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) увеличилась на 12–15 % за счет армирования эластомерной матрицы БТ и УТ по сравнению с эластомерным образцом СКД. Углеводородная среда гидравлического масла вызывает размягчение резины вследствие пластифицирующего действия масла [23]. Термическое воздействие приводит к дополнительной вулканизации эластомерной матрицы, что снижает подвижность макромолекул каучука и, как следствие, увеличивает твердость по сравнению с исходными образцами [24]. При этом образцы СКД-БТ/УТ(РС) и СКД-БТ/УТ(Хем) продемонстрировали одинаковые значения твердости.

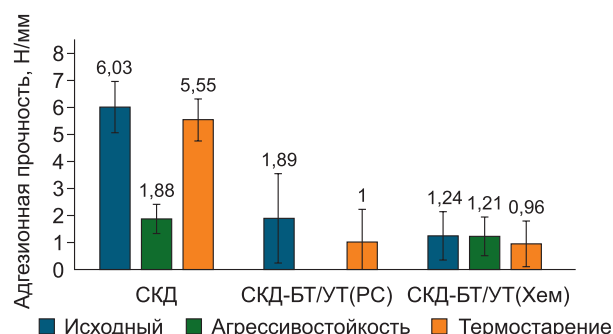


Рис. 6. Диаграмма прочности адгезионного взаимодействия между слоями БТ и УТ в композите до, после выдержки в гидравлическом масле АМГ-10 и термического старения

Fig. 6. Diagram of the adhesive interaction strength between the BF and CF layers in the composite before and after exposure to AMG-10 hydraulic oil and thermal aging

Результаты оценки прочности адгезии между слоями БТ и УТ в эластомерных композитах до и после испытаний представлены на рис. 6. Сравнение адгезионной прочности композитных систем показало, что исходные образцы эластомера обладают в 2,3 и 4,9 раза более высокой устойчивостью к расслоению по сравнению со слоями композитов между БТ с УТ, причем величина различия зависит от способа обработки волокон. Исследование выявило крайне низкую адгезию в системе с базальто- и углетканями, что обусловлено их разной химической природой [25, 26]. Воздействие масла АМГ-10 привело к набуханию эластомера и снижению его когезионной прочности, при этом образец СКД-БТ/УТ(РС) полностью потерял адгезионную связь

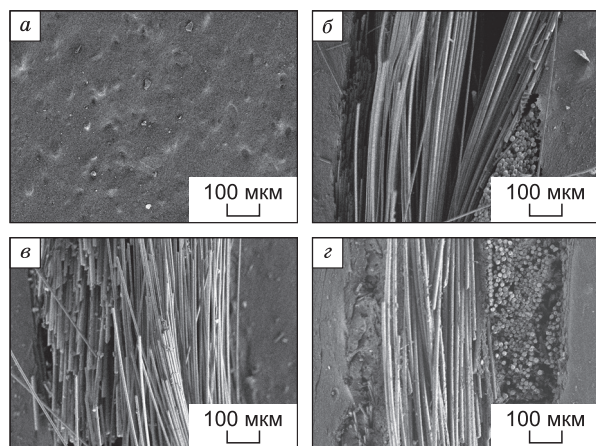


Рис. 7. Микрофотографии структуры срезов эластомера и межфазных границ: *а* – исходного эластомера; *б* – СКД-БТ/УТ; *в* – СКД-БТ/УТ(РС); *г* – СКД-БТ/УТ(Хем)

Fig. 7. Micrographs of the structure of elastomer sections and interphase boundaries: *a*) original elastomer; *б*) SKD- BF/ CF; *в*) SKD- BF/ CF(RS); *г*) SKD- BF/ CF(Chem)

на границе раздела фаз, тогда как система с клеем Хемосил сохранила стабильность благодаря устойчивости адгезива к углеводородам. Термическое воздействие вызвало деструкцию эластомерной матрицы и снижение адгезионных характеристик во всех образцах: в случае СКД-БТ/УТ(РС) за счет термической дестабилизации резинового связующего, а для СКД-БТ/УТ(Хем) вследствие деструкции клеевого слоя.

На рис. 7 приведены микрофотографии структуры срезов исходного эластомера, композитов на границе контакта УТ и БТ в эластомерной матрице. Исходный эластомер (см. рис. 7, *а*) имеет типичную однородную структуру без видимых дефектов или включений, что характерно для однородных резиновых смесей [27, 28]. Микроструктура образца СКД-БТ/УТ без обработки (см. рис. 7, *б*) демонстрирует четко выраженную границу раздела между базальтовыми и углеродными волокнами. При этом со стороны эластомерной матрицы наблюдается плотный контакт с волокнами, что объясняется процессом диффузии макромолекул каучука в поверхностные слои армирующих элементов. Образовавшийся межфазный зазор между БТ и УТ обусловлен различием химической природы волокон и высокой жесткостью их структуры, препятствующей взаимной диффузии. Данный дефект структуры привел к преждевременному отслаиванию уже на этапе подготовки образцов к испытаниям (см. рис. 2). У образца СКД-БТ/УТ(РС) (см.

рис. 7, *в*) наблюдается плотный контакт между полимерной матрицей и самими армирующими наполнителями. Эффект достигается за счет активного проникновения РС в поверхностные слои волокон при обработке и последующего надежного сцепления в процессе вулканизации. В результате формируется прочное соединение между БТ и УТ, а также между волокнами и эластомерной матрицей. Применение клеевого состава Хемосил обеспечивает образование качественных межфазных границ в образце СКД-БТ/УТ(Хем) (см.рис. 7, *г*). На микрофотографии видно, что клеевое покрытие образует каркасную структуру равномерно по поверхности волокон. Такая структура способствует эффективному перераспределению нагрузок и обеспечивает надежное соединение всех компонентов композита, а также защиту от воздействия углеводородных сред.

Заключение

Исследование влияния поверхностной обработки базальтовых и углеродных тканей при их комбинированном введении в эластомерную матрицу выявило, что отсутствие предварительной обработки тканей приводит к полному расслоению композита при минимальном механическом воздействии из-за низкой адгезии соединения, в то время как введение армирующего наполнителя значительно увеличивает прочность. Воздействие гидравлического масла АМГ-10 на композиты обусловлено пластификацией и набуханием связующего, что приводит к снижению прочности и удлинения, а термическое старение, напротив, приводит к дополнительной вулканизации с увеличением твердости; при этом адгезионная прочность между БТ и УТ, обработанными клеем Хемосил, стабильна в масле, но происходит снижение адгезии при термическом воздействии. Предварительная обработка обеспечивает плотный контакт БТ с УТ, по сравнению с необработанными образцами с четкой границей раздела, что наглядно доказывает: поверхностная обработка волокон улучшает адгезионное взаимодействие на межфазной границе базальтовых и углеродных волокон.

Список литературы / References

1. Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор). *Труды ВИАМ*. 2021;99(5):56–63. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63>

- Serkova E.A., Hmel'nikskiy V.V., Zastrogina O.B. Polymer materials for antifriction coatings (overview). *Trudi VIAM*. 2021;99(5):56–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63>
2. Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиции и их свойства. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022;12(2):192–207. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
- Lebedeva O.B., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):192–207. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207>
3. Tang S., Li Z., Sun W., et al. Natural rubber/styrene–butadiene rubber blend composites potentially applied in damping bearings. *Polymers (Basel)*. 2024;16(13):1945. <https://doi.org/10.3390/polym16131945>
4. Ismail A., Zubaydi A., Piscesa B., et al. A novel fiber-glass-reinforced polyurethane elastomer as the core sandwich material of the ship–plate system. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023;32(1):20220288. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0288>
5. Anidha S., Mozhuguan Sekar S., Natarajan E., et al. Preliminary Investigations and Support for the Mechanical and Dynamic Characteristics of a Natural Rubber Reinforcement in E-Glass/ CNT/Epoxy Composite. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2024;8:140. <https://doi.org/10.3390/jcs8040140>
6. Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф. Исследование сохранения физико-механических свойств стеклоуглепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):148–161. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>
- Kychkin A.K., Kychkin A.A., Struchkov N.F. The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):148–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>
7. Кычкин А.К., Гаврильева А.А., Васильева Е.Д. и др. Исследование стекло- и базальтотекстолитов по кинетике сорбции и десорбции влаги после экспонирования в условиях холодного климата. *Вестник машиностроения*. 2024;103(4):336–342. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-4-336-342>
- Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Vasileva E.D., et al. Research of fiberglass and basalt textile laminates on the kinetics of sorption and desorption of moisture after exposure to cold climate conditions. *Vestnik mashinostroeniya*. 2024;103(4):336–342. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-4-336-342>
8. Морозов С.В. Влияние физической модификации эпоксидного связующего на физико-механические свойства стеклопластика. *Ползуновский вестник*. 2021;(4):157–162. <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2021.03.024>
- Morozov S.V. Effect of physical modification of epoxy binder on the physical and mechanical properties of fiberglass. *Polzunovskiy Vestnik*. 2021;(4):157–162. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2021.03.024>
9. Кузько А.В., Кузько А.Е., Кузьменко А.П. и др. Состав и физико-механические свойства термореактивных стеклопластиков. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022;12(3):105–117. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>
- Kuzko A.V., Kuzko A.E., Kuzmenko A.P., et al. Composition and physico-mechanical properties of thermosetting fiberglass. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Technika i tehnologii. Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(3):105–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>
10. Селезнев В.А., Какуша В.А., Горбунов И.А. и др. Физико-механические характеристики стеклокомпозитной арматуры. *Вестник Поволжского государственного технического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2022;21(1):15–26. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.1.15>
- Seleznev V.A., Kakusha V.A., Gorbunov I.A., et al. Mechanical properties of fiber-glass composite reinforced polymer bars. *Vestnik of Volga State University of Technology: Series "Materials. Constructions. Technologies"*. (In Russ.) 2022;21(1):15–26. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.1.15>
11. Dalinkevich A.A., Gumargalieva K.Z., Marakhovskii S.S., et al. Temperature–humidity corrosion behavior of basalt epoxy plastics. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2015;51:1176–1184. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2070205115070060>
12. Yang S., Cheng Y., Xiao X., et al. Development and application of carbon fiber in batteries. *Chemical Engineering Journal*. 2020;384:123294. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123294>
13. Сидорина А.И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор). *Труды ВИАМ*. 2022;110(4):61–74. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74>
- Sidorina A.I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review). *Trudi VIAM*. 2022;110(4):61–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74>
14. Чайкун А.М., Сергеев А.В., Правада Е.С. Эластомерно-тканевые материалы для изделий специальной техники (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023;124(6):25–37. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37>
- Chaikun A.M., Sereev A.V., Pravada E.S. Elastomeric-fabric materials for products of special equipment (review). *Trudi VIAM*. 2023;124(6):25–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-6-25-37>
15. Морозов С.В., Ананьин С.В. Влияние модификации поверхности углеродных волокон на физико-механические характеристики углепластиков. *Ползуновский вестник*. 2022;(1):134–138. <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2022.01.018>
- Morozov S.V. The effect of modification of the carbon fiber surface on the physical and mechanical characteristics of carbon fiber plastics. *Polzunovskiy Vestnik*. 2022;(1):134–138. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.20728921.2022.01.018>
16. Zhang B., Jia L., Tian M., et al. Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. *European Polymer Journal*. 2021;147:110352. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110352>
17. Марков А.Е., Копырин М.М., Дьяконов А.А. и др. Поверхностная обработка армирующих наполнителей смесью фенолметана и полибутадиена для повышения адгезии с эластомером. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*.

2022;27(3):439–449. <https://doi.org/0.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

Markov A.E., Kopyrin M.M., Dyakonov A.A., et al. Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene to increase adhesion with elastomer. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):439–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

18. Копырин М.М., Марков А.Е., Дьяконов А.А. и др. Сравнение способов повышения адгезии между бутадиеновым эластомером и базальтовой тканью. *Ползуновский вестник*. 2022;2(4):109–117. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014>

Kopyrin M.M., Markov A.E., Dyakonov A.A., et al. Comparison of methods for improving adhesion between butadiene elastomer and basalt fabric. *Polzunovskiy Vestnik*. 2022;2(4):109–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.014>

19. Manzhosova E.N., Lukina N.F., Isaev A.Y. Adhesives for gluing rubbers to metals during the vulcanization process: A review. *Polymer Science, Series D*. 2024;17:322–328. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1995421224700539>

20. Третьякова Н.А., Пучков А.Ф., Ильичева Т.М. Химическая модификация резин промоторами адгезии, полученными в расплавах ε-капролактама. В кн.: *Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии: Доклады XXVI научно-практической конференции, г. Москва, 24–28 мая 2021 г. М.: ООО «Научно-исследовательский центр “Научно-исследовательский институт шинной промышленности”»; 2021. С. 117–120.*

Tretiakova N.A., Puchkov A.F., Ilyicheva T.M. Chemical modification of rubbers with adhesion promoters synthesized in ε-caprolactam melts. In: *Rubber Industry. Raw Materials. Materials. Technologies: Proceedings of the 26th Scientific and Practical Conference, Moscow, May 24–28, 2021*. Moscow: Scientific Research Center “Research Institute of the Tire Industry”; 2021, pp. 117–120. (In Russ.)

21. Мухин В.В., Петрова Н.Н., Капитонов Е.А. и др. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2016;56(6):41–50.

Muhin V.V., Petrova N.N., Kapitonova E.A., et al. Development of aircraft synthetic oil resistant rubbers based on mixture of nitrile and diene rubbers. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2016;56(6):41–50. (In Russ.)

22. Ушмарин Н.Ф., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И. Влияние микросфер на свойства агрессивностойких резин. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2021;64(2):49–55. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216402.6165>

Ushmarin N.F., Egorov E.N., Kol'tsov N.I. Influence of microspheres on properties of aggressiveresistant rubbers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]*. 2021;64(2):49–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216402.6165>

23. Усс Е.П., Шашок Ж.С., Касперович А.В., Кротова О.А. Влияние природы полимера на свойства эластомерных композиций, модифицированных в олигомерных средах. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2018;205(1):53–60.

Uss E.P., Shashok J.S., Kasperovich A.V., Krotova O.A. The influence of polymer nature on properties of elastomer compositions modified by oligomeric environments. *Proceedings of BSTU: Series 2. Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*. 2018;205(1):53–60. (In Russ.)

24. Илларионова М.С., Ушмарин Н.Ф., Капитонова М.С., Кольцов Н.И. Влияние антиоксидантов на свойства резины на основе бутадиен-нитрильных каучуков. *Бутлеровские сообщения*. 2017;51(7):126–131.

Illarionova M.S., Ushmarin N.F., Kapitonova M.S., Kol'tsov N.I. The influence of antioxidants on the properties of rubber based butadiene-nitrile caoutchouc. *Butlerov Communications*. 2017;51(7):126–131. (In Russ.)

25. Бабиевская И.З., Дробот Н.Ф., Фомичев С.В., Кренев В.А. Расчет минерального состава базальтовых пород. *Неорганические материалы*. 2009;45(8):987–989.

Babievskaya I.Z., Drobot N.F., Fomichev S.V., Krenov V.A. Calculation of the mineral composition of basaltic rocks. *Inorganic Materials*. 2009;45(8):916–918. (In Russ.)

26. Абрамов О.Н., Сидоров Д.В., Апухтина Т.Л. и др. Получение пекового углеродного волокна на основе нефтяного сырья. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015;58(5):86–89.

Abramov O.N., Sidorov D.V., Apuhtina T.L., et al. Production of pitch carbon fiber based on petroleum raw materials. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]*. 2015;58(5):86–89. (In Russ.)

27. Kapitonov E.A., Petrova N.N., Mukhin V.V., et al. Enhanced physical and mechanical properties of nitrile-butadiene rubber composites with n-cetylpyridinium bromide-carbon black. *Molecules*. 2021;26(4):805. <https://doi.org/10.3390/molecules26040805>

28. Иванова С.Ф., Петрова Н.Н. Перспективы модификации бутадиен-нитрильных каучуков гидролизатом коллагена из северных видов рыб. *Каучук и резина*. 2019;78(5):302–307.

Ivanova S.F., Petrova N.N. Prospects for modifications of butadiene acrylonitrile rubbers with collagen hydrolysate from northern fish species. *Kauchuk i Rezina*. 2019;78(5):302–307. (In Russ.)

Об авторах

МАРКОВ Айтал Еремеевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, ResearcherID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

ДЬЯКОНОВ Афанасий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, ResearcherID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

ТУИСОВ Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, ResearcherID: ABA-4930-2020, e-mail: tuisovag@gmail.com

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

Вклад авторов

Марков А.Е. – методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Дьяконов А.А.** – руководство исследованием, редактирование рукописи, методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования; **Туйсов А.Г.** – разработка концепции, редактирование рукописи. проведение статистического анализа; **Охлопкова А.А.** – администрирование проекта, ресурсное обеспечение исследования, получение финансирования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Охлопкова А.А. является членом Редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

MARKOV, Aital Ereemeevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, ResearcherID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

DYAKONOV, Afanasy Alekseevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, ResearcherID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

TUISOV, Aleksei Gennadevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, ResearcherID: ABA-4930-2020, e-mail: tuisovag@gmail.com

OKHLOPKOVA, Aitalina Alekseevna, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

Authors' contribution

Markov A.E. – methodology, validation, investigation, writing – original draft; **Dyakonov A.A.** – writing – review & editing, supervision, methodology, validation, investigation, resources; **Tuisov A.G.** – conceptualization, writing – review & editing, formal analysis; **Okhlopkova A.A.** – data curation, resources, funding acquisition

Conflict of interest

One of the authors, Okhlopkova A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 30.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 20.11.2025