

На правах рукописи



Лукачевская Ирина Григорьевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОГО  
БАЗАЛТОПЛАСТИКОВОГО КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ  
ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ НАВОДНЕНИЙ**

Специальность 2.6.17 - Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2022

Работа выполнена в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель:

**Лебедев Михаил Петрович**,  
член-корреспондент РАН, доктор  
технических наук, генеральный директор  
ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск

Официальные оппоненты:

**Кондрашов Станислав Владимирович**,  
доктор технических наук, заместитель  
начальника по науке лаборатории «ПКМ со  
специальными свойствами» ФГУП ВИАМ  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва  
**Ананьева Елена Сергеевна**, кандидат  
технических наук, доцент, начальник  
научного управления ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Ведущая организация:

ФГБУН Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН, г. Томск

Защита диссертации состоится «20» января 2023 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд.201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте организации [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/177](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/177).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту: [diss.material@yandex.ru](mailto:diss.material@yandex.ru)

Автореферат разослан «26» ноября 2022 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета,



к.т.н Проценко Александр Евгеньевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность диссертационной работы.**

В связи с увеличением числа катастрофических наводнений во всем мире, создание эффективной системы защиты от стихийного бедствия приобрело в последнее время особую актуальность. По площади распространения, повторяемости и общему среднегодовому материальному ущербу наводнения на территории России являются лидером среди всех стихийных бедствий, а по удельному материальному ущербу и числу жертв среди людей занимают второе место после землетрясений.

Территория Якутии по своим природным условиям относится к регионам резко континентальным климатом и с высокой вероятностью наводнений, угроза которых существует почти для всех населенных пунктов, расположенных на реках. В 2001, 2007–2010, 2012–2014, 2018 годах здесь произошли самые крупные наводнения в России, такие как наводнения на реках Лена, Алдан, Яна, Алазея, Колыма, Амга, Таатта, Суола, Матта, Баяга, Мархинка. По величине подъема уровней воды, масштабам затопления и суммарному ущербу данные наводнения превысили все крупнейшие наводнения предыдущих лет, и по существующей классификации относятся к разряду катастрофических, причем с очень редкой повторяемостью. При этом максимальное пребывание воды в затопленных зонах достигает от 15 до 30 суток. Для предотвращения подтопления населенных пунктов и объектов экономики, сельскохозяйственных земель необходимо усовершенствовать системы противопаводковых гидротехнических сооружений, тем самым, сократить причиняемые наводнениями ущербы.

При устройстве различных ограждений береговых линий, а также гидротехнических сооружений, котлованов широко используются шпунты, которые еще недавно изготавливались преимущественно из металлических материалов. Вместе с тем, важным фактором в интенсификации технологических процессов в строительном производстве и снижении их металлоемкости, уменьшении расхода электроэнергии и трудозатрат является более широкое использование полимерных материалов. Полимерные материалы задают новые пути решения проблем, в том числе и проблем усовершенствования ограждений. В значительной степени это обусловлено тем, что их использование вместо традиционных материалов позволяет уменьшить вес изделий, повысить коррозионную и химическую стойкость, не снижая при этом эксплуатационные свойства.

Основные свойства полимерных материалов напрямую зависят от состава компонентов, их количественного соотношения и прочности связи между ними. В российской и зарубежной практике по производству композитных шпунтов в качестве армирующего материала используется стекловолокно (СВ). СВ экономичны и поэтому наиболее привлекательны для применения в различных отраслях промышленности.

Однако, в течение двух последних десятилетий в нашей стране и за рубежом расширяется применение базальтовых волокон (БВ) как альтернативы СВ. По многим показателям БВ превосходят СВ и сопоставимы со свойствами

углеродных волокон (УВ). Сырьевая база для производства БВ доступна и практически не ограничена. Замена имеющихся стандартных шпунтов Ларсена на базальтопластиковый композитный шпунт приведет не только к улучшению физико-механических свойств, а также и экономической эффективности.

Если в настоящее время имеется подробный анализ изменения механических показателей стеклопластиков (СП), экспонированных в различных климатических районах земного шара, то таких развернутых исследований для базальтопластиков (БП) пока не существует. Поэтому требуется изучение эффектов старения этого класса композитных материалов в сопоставлении с имеющимися надежными данными для СП.

Таким образом, информация о климатической стойкости БП приобретает особую актуальность. В связи с этим представляет интерес получение новой информации, раскрывающей возможности применения базальтового волокна как армирующего материала для композитного шпунта.

**Степень разработанности темы исследования.** В ходе работы над литературным обзором установлено, что вопросы берегоукрепления шпунтовыми ограждениями рассматриваются в работах авторов Седрисева Д.Н., Яковенко В.Г., Бабкиной И.В. Заметный вклад в исследовании воздействия климатических факторов на композитные материалы внесли Старцев О.В., Каблов Е.Н., Belec L., Nguyen T.H., Bazli, M., Wang, Z. Исследование композитных материалов на основе базальтового волокна проведено в работах Wang J., GangaRao H., Fiore V., Scalici T, Sheikh S.A., Tam S., Оснос С.П., Sasaki I., Nishizaki I. Тем не менее, несмотря на весьма значительное количество публикаций, остаются недостаточно изученными изменения механических показателей базальтопластиков, экспонированных в климатических условиях Севера. Не проводились исследования в области применения полимерного базальтопластикового конструкционного материала для шпунтового ограждения.

Диссертационные исследования выполнены в рамках: проекта по программе фундаментальных исследований СО РАН III.28.1. «Разработка междисциплинарных научных основ создания новых материалов и применения перспективных технологий для экстремальных условий эксплуатации (№НИОКТР АААА-А17-117030910068-4), «Многофакторное исследование синергизма процессов деструкции и биокоррозии полимерных композиционных материалов под воздействием экстремально холодного климата» (№НИОКТР 0297–2021-0041). Грант программы «УМНИК-2015» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

**Цель работы.** Разработка и исследование полимерного базальтопластикового конструкционного материала для шпунтового ограждения с повышенными физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой.

**Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:**

1. Провести аналитическое исследование существующих защитных сооружений от наводнений; обосновать выбор армирующего материала для композитного шпунта.
2. Экспериментально исследовать и провести сравнительный анализ упруго-прочностных свойств стекло-базальтопластиков
3. Провести оценку влияния климатических факторов Севера на физико-механические свойства стекло-базальтопластиков.
4. Экспериментально исследовать влагонасыщение при длительном термовлажностном режиме 23 °С/68 RH образцов стекло-базальтопластиков.
5. Провести сравнительный анализ влияния различных типов среды воды на упруго-прочностные свойства стекло-базальтопластиков при максимальном пребывании до 70 суток.
6. Изготовить экспериментальные образцы шпунтовых ограждений на основе базальтового волокна.

**Объект исследования:** структура и свойства полимерного базальтопластикового конструкционного материала на основе эпоксиангидридного связующего горячего отверждения.

**Предмет исследования:** упруго-прочностные свойства, влияние влаги, температуры, воды и климатических факторов Севера на свойства базальтопластикового материала для шпунта, применяемого для защитных сооружений от наводнений.

**Научная новизна.**

1. Установлено влияние типа переплетения армирующих волокон на характер разрушения пластиков. Характер разрушения образцов БП с саржевым переплетением армирующих волокон (3/2) носит вязко-хрупкое с вытаскиванием волокон, что говорит о более высокой связи «волокно-матрица». Разрушение образцов СП с полотняным переплетением армирующих волокон носит характер, обусловленный сдвигом матрицы между волокнами и расслоением, свидетельствующее о нарушении адгезионного взаимодействия «волокно-матрица».

2. Впервые проведены исследования прочностных характеристик образцов базальто- и стеклопластиков при климатических испытаниях в условиях экстремально холодного климата в течение 4 лет. Установлено, что изменение таких величин, как параметры шероховатости линейного профиля поверхности, открытой пористости, сорбции и диффузии влаги, микроскопии чувствительны к деструкции поверхностного слоя пластиков и могут применены для оценки начальной стадии влияния климатических факторов при натурных испытаниях.

3. Выявлены закономерности изменения физико-механических характеристик, экспериментально доказан процесс доотверждения полимерной матрицы и повышения упруго-прочностных характеристик: на растяжение до 10%, на изгиб – до 50%. Результаты работ доказывают, что БП проявляют более высокую климатическую устойчивость: после процесса

доотверждения, прочностные характеристики относительно 2 года, при растяжении у БП снижаются на 15%, у СП – на 22%, предел прочности при изгибе: у БП снижаются на 12%, у СП – на 47%.

4. Экспериментально показано, что при длительном стационарном термовлажностном воздействии 23°C/68RH на базальто- и стеклопластики наблюдается диффузия, состоящая из двух стадий: первая стадия имеет удовлетворительную статистическую погрешность и адекватно аппроксимируется моделью диффузии Фика и релаксационной моделью. Вторая стадия имеет неудовлетворительную статистическую погрешность для аппроксимации и носит скачкообразный характер, при этом скачок у СП наибольший, что указывает, на то, что СП подвержен большему разрушению под воздействием длительного термовлажностного режима 23 °C/68 RH.

**Теоретическая значимость:** Полученные данные расширяют научные представления в области разработки полимерных конструкционных материалов на основе базальтового волокна. Результаты проведенных исследований вносят вклад в развитие изучения базальтового волокна как армирующего материала для шпунтового ограждения.

**Практическая значимость:** Получена композитная шпунтовая свая на основе базальтового волокна (патент РФ №187377). Выпущены опытные образцы базальто- и стеклопластика, проведены испытания свойств разработанных материалов. Результаты проведенных испытаний подтвердили положительный эффект от применения базальтового волокна для армирования композитов: базальтопластик обладает наиболее высокими физико-механическими свойствами и устойчивостью к климатическим испытаниям по сравнению со стеклопластиком. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для разработки конструкционных материалов, используемых в климатических условиях Севера. Получены акты о внедрении результатов диссертационной работы в ГКУ РС (Я) «Исполнительная дирекция по водному хозяйству и организации восстановительных работ по ликвидации последствий паводков в Республике Саха (Якутия)» и ГБУ РС (Я) «Служба спасения Республики Саха (Якутия)».

**Методология и методы исследования.** Методология диссертационного исследования заключается в использовании общенаучных методов исследований: теоретических и практических. Теоретические исследования основаны на анализе требований к полимерным шпунтам, в том числе влияния наполнителя на свойства полимерных шпунтовых ограждений. Структура, морфология образцов исследовались методами оптической и растровой (сканирующей) электронной микроскопии (РЭМ).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты аналитического исследования защитных сооружений от наводнений и обоснование требований к материалу для защитных сооружений от наводнений. Обоснование выбора базальтового волокна в качестве армирующего наполнителя для материала защитного сооружения.

2. Результаты экспериментальных исследований упруго-прочностных характеристик базальто- и стеклопластиков с различным переплетением ткани до и после климатических испытаний в условиях экстремально холодного климата в течение 2 и 4 лет.

3. Результаты сравнительного анализа исследований упруго-прочностных характеристик образцов базальто- и стеклопластиков при климатических испытаниях

4. Результаты экспериментальных исследований влагопоглощения образцов базальто- и стеклопластиков при длительном стационарном термовлажностном режиме 23 °С/68 RH.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния различных типов воды на упруго-прочностные свойства базальто- и стеклопластиков.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается системным подходом к исследованиям, привлечением современных, преимущественно стандартных и взаимно дополняющих друг друга экспериментально-аналитических методов и испытаний на современном сертифицированном оборудовании, согласованием результатов испытаний с данными многих исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих научных семинарах, симпозиумах и конференциях: V Международная конференция-школа по химической технологии (г. Волгоград, 2016), Всероссийская конференция научной молодежи ЭРЭЛ–2016 (г. Якутск, 2016), VIII и IX Евразийский симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур (г. Якутск, 2018, 2020), Всероссийская молодежная конференция ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (г. Якутск, 2021).

**Личный вклад автора** заключается в анализе литературных данных, подготовке и проведении экспериментальных работ, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и подготовке к публикации докладов и статей.

**Публикация результатов исследований.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, входящие в базы данных Web of Science и Scopus, 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 130 наименований. Работа изложена на 121 странице, содержит 48 рисунков, 24 таблицы и 2 приложения.

Автор выражает признательность и благодарность научному руководителю чл.-корр. РАН д.т.н. М.П. Лебедеву и к.т.н. А.К. Кычкину, за поддержку оказанную на всех этапах выполнения диссертационного исследования. Автор признателен за научные советы и помощь, оказанные при выполнении над диссертационной работой к.т.н. А.Г. Туисову, А.А. Гаврильевой, А.А. Кычкину.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определяется актуальность исследования, степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена информация об объекте и предмете исследования, изложена методология исследования, раскрывается научная новизна, содержатся сведения о теоретической и практической значимости работы, приводится информация об апробации результатов работы.

**В первой главе** приведен анализ климатических характеристик региона и происшедших наводнений в Республике Саха (Якутия). Представлен обзор берегоукрепительных сооружений, сравнительный анализ существующих на рынке шпунтовых ограждений, технология производства композитных шпунтов. Приведен анализ основных принципов формирования волокнистых композиционных материалов с полимерной матрицей, а также современного состояния исследований полимерных композитных материалов на основе непрерывных базальтовых волокон. На основании анализа по результатам обзора современного состояния изучения композитных шпунтов разработаны основные требования композитным шпунтам: материалоемкость для снижения веса изделия, коррозионная стойкость, максимальное сохранение физико-механических свойств при длительных сроках хранения и при прерывании в водной среде при максимально допустимом времени до 70 суток, низкое влагопоглощение, возможность длительного хранения независимо от среды, изготовление любой длины в зависимости от требований, возможность установки и демонтажа без применения спецтехники. По теме диссертации изложена цель работы, сформулированы основные задачи исследования, необходимость выполнения практических исследований и анализа результатов работы.

**Во второй главе** приведены свойства, составы и основные параметры объектов исследования. Дано описание методов исследования, приборов и другого оборудования, использованного в экспериментальной части работы.

В качестве объектов исследования рассматривались образцы на основе эпоксидных связующих базальтопластика из базальтовой ткани БТ-11/1 П с плетением «саржа» и стеклопластик из стеклоткани Ортекс 560 с полотняным плетением.

Упруго-прочностные характеристики базальтопластиков исследовались на растяжение (ГОСТ 32656–2014), трехточечный изгиб (ГОСТ 25.604) и ударную вязкость по Шарпи (ГОСТ 4647–80). Для исследования влияния водопоглощения на физико-механические свойства был поставлен модельный эксперимент погружением образцов материала в различные типы воды с выдержкой до 70 суток. Исследования влагопоглощения в базальто- и стеклопластике до и после климатических испытаний проводились при стационарном термовлажностном режиме 23 °С/68 RH. Экспериментальные данные по влагопоглощению были обработаны в соответствии ГОСТа 4650–2014. Пластмассы. Методы определения водопоглощения и



ASTM D5229/D5229M-2020 «Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials». Для количественной оценки изменения морфологии поверхности образцов до и после климатических испытаний использовали профилометр SurfTest-201P. Характер разрушения образцов были исследованы на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000-C». Анализ структуры композиционных материалов проведен на растровом электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония). Определение открытой пористости производилось гидростатическим методом. Натурные климатические испытания проводились на открытых площадках в свободном состоянии в условиях экстремально холодного климата по ГОСТ 9.708–83, на испытательном полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске Республики Саха (Якутия).

**В третьей главе** приведены результаты исследования упруго-прочностных свойств образцов из базальто- и стеклопластика, влияние климатического старения на образцы в условиях экстремально холодного климата, а также исследование упруго-прочностных свойств образцов в контакте с водой.

Из полученных экспериментальных данных следует, что образцы базальтопластика имеют значение предела прочности при растяжении  $\sigma_p=503,05\pm 15$  МПа, у стеклопластика –  $\sigma_p=488,15\pm 15$  МПа. Образцы БП и СП также имеют одинаковые прочностные значения при испытаниях на трехточечный изгиб. Предел прочности при изгибе БП составил  $\sigma_{и}=233,4\pm 10$  МПа, СП  $\sigma_{и}=238,5\pm 10$  МПа.

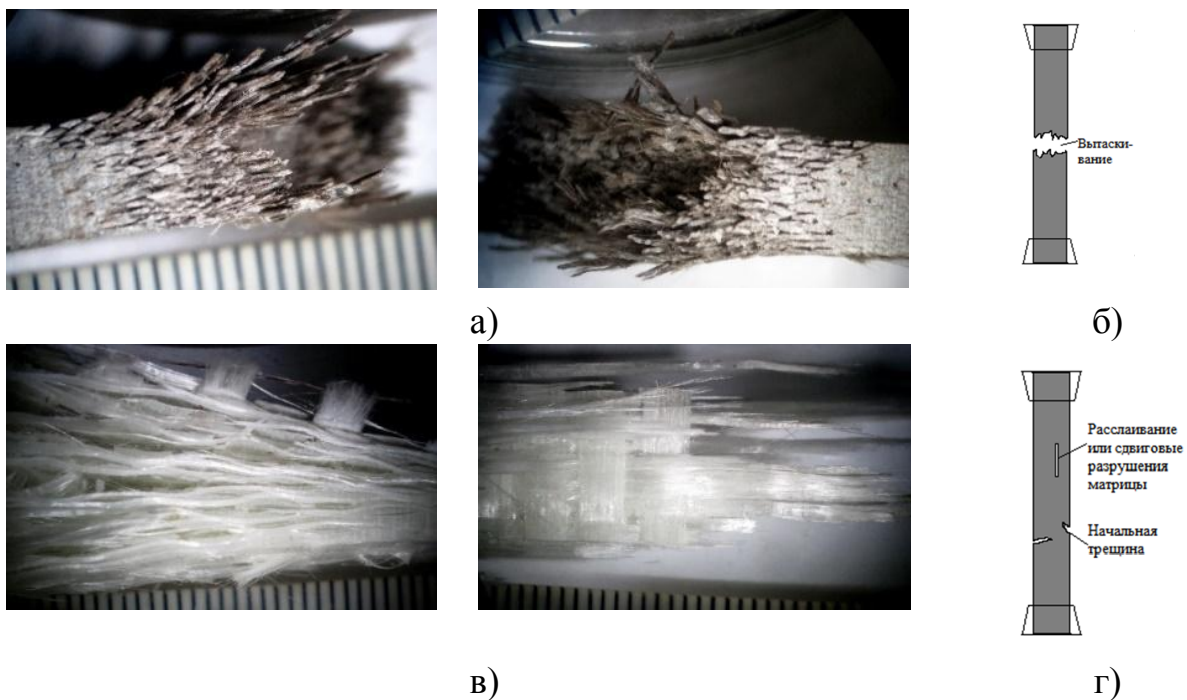


Рисунок – 1 Снимки разрушенных образцов при продольном растяжении: образцов БП (а), схема разрушения БП (б), образцов СП (в), схема разрушения СП (г). Указанный масштаб соответствует 1000 мкм

На снимках, полученных на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000-C», разрушенных при растяжении образцов БП и СП (рис. 1) видно, что разрушение происходит в результате процесса обрыва волокон, сдвига матрицы и расслоения тканей в зависимости от способа плетения.

Процесс разрушения образцов базальтопластика с саржевым переплетением армирующих волокон (3/2) носит характер вязко-хрупкого разрушения, обрыва волокон и сдвига матрицы, без расслоения тканей, что говорит о более высокой связи «волокно-матрица» (рис1., а,б). Разрушение образцов стеклопластика с полотняным переплетением армирующих волокон носит характер сдвига с расслоением. Происходит разрушение армирующих волокон, направленных перпендикулярно направлению удара, и рост магистральных трещин вдоль осей уложения слоев (рис.1., в,г). На этом основании формально можно сделать вывод об отсутствии адгезионного разрушения у базальтопластиков, а у стеклопластиков о присутствии адгезионного разрушения.

Для оценки климатического воздействия экстремально холодного климата на упруго-прочностные свойства пластиков определяли пределы прочности при растяжении и изгибе исходных образцов и образцов после экспонирования, полученные данные представлены в таблице 1. Изменение механических свойств отражает обобщенный показатель – относительный коэффициент сохраняемости  $k_R=R_t/R_0$ , где  $R_t$  принимает пределы прочности при растяжении, изгибе, измеренные после различных сроков экспонирования,  $R_0$  принимает соответствующие пределы в исходном состоянии.

Таблица 1 Показатели сохраняемости  $k_R$  пластиков после 2 и 4 лет экспонирования на открытых атмосферных стендах в г. Якутске

Марка ПКМ	Состояние*	Механические показатели, $R$	Значение коэффициента сохраняемости, $k_R$
БП	К-2	предел прочности при растяжении	1,04
	К-4		0,89
СП	К-2	предел прочности при растяжении	1,11
	К-4		0,89
БП	К-2	предел прочности при изгибе	1,43
	К-4		1,31
СП	К-2	предел прочности при изгибе	1,56
	К-4		1,09

\*И - исходное состояние, К-2 - после 2 лет экспонирования, К-4 - после 4 лет экспонирования

Анализ результатов экспериментов показывает увеличение механических свойств пластиков после 2 лет экспозиции, связанной доотверждением полимерной матрицы и согласуется с результатами работ других исследователей. После 4 лет экспонирования коэффициенты сохраняемости предела прочности при растяжении у пластиков одинаковые, значения

коэффициента сохраняемости предела прочности при изгибе у образцов БП выше, чем у СП на 20%. При этом относительно 2 года экспонирования, прочностные характеристики при растяжении у БП снижаются на 15%, у СП – на 22%, предел прочности при изгибе: у БП снижаются на 12%, у СП – на 47%.

Для количественной оценки деструкции поверхности образцов исследуемых материалов были сняты линейные профили поверхности СП (рис. 2) и БП (рис. 3) до и после климатических испытаний в течение 2 лет.

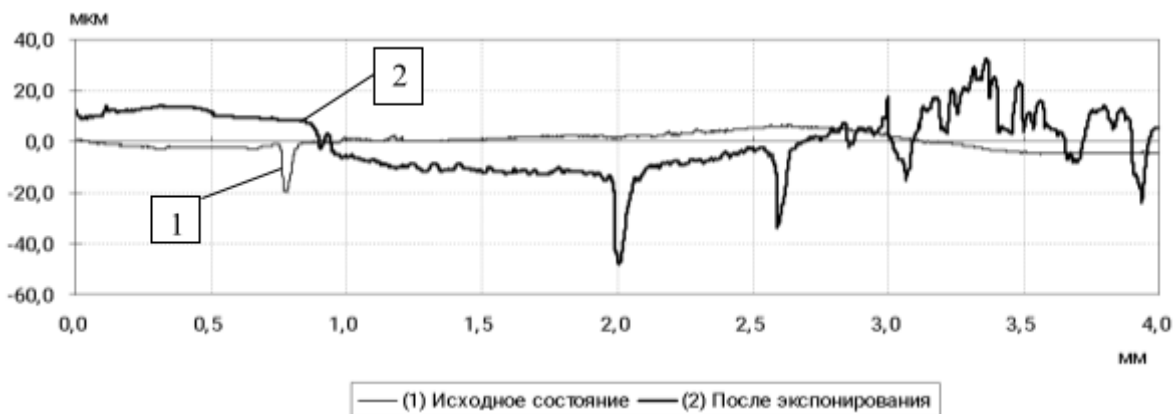


Рисунок 2 – Линейный профиль поверхности СП: (1) – хранившийся на складе; (2) – после 2 лет экспонирования в экстремально холодном климате г. Якутска

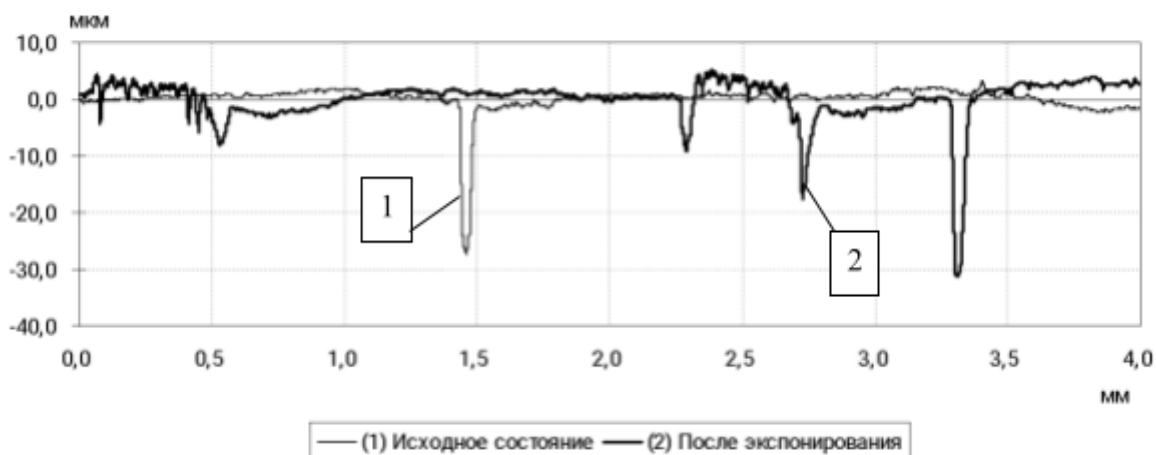


Рисунок 3 – Линейный профиль поверхности БП: (1) – хранившийся на складе; (2) – после 2 лет экспонирования в экстремально холодном климате г. Якутска

Поверхность СП (рис. 2) в исходном состоянии имеет относительно ровный профиль с единичными углублениями не более 25 мкм. После климатических испытаний профиль имеет более шероховатый характер с более частыми углублениями не более 30 мкм. При этом средняя линия профиля поверхности СП носит плавный характер. Морфология поверхности БП до и после климатических испытаний носит подобный характер, только в более меньших масштабах. Изменение линейного размера поверхностной деструкции полимерной матрицы пластиков можно оценить изменением значения средней шероховатости профиля.

Таблица 2 Средние значения показателей рельефа поверхности базальтопластика и стеклопластика

Марка ПКМ	Состояние*	Характеристики шероховатости поверхностей композитных плит, мкм**	
		Средняя шероховатость (Ra)	Среднеквадратичное отклонение (Rq)
БП	И	0,70 / 9,98	1,06 / 12,79
	К-2	1,18 / 9,70	1,9 / 11,1
	К-4	9,02 / 18,73	12,11 / 23,71
СП	И	1,03 / 5,50	1,7 / 6,67
	К-2	4,08 / 5,64	4,52 / 6,65
	К-4	9,89 / 14,03	12,2 / 17,33

\*И - исходное состояние, К-2 - после 2 лет экспонирования, К-4 - после 4 лет экспонирования;

\*\*Числитель - солнечная сторона, знаменатель - теневая сторона экспонированных образцов ПКМ.

В таблице 2 представлены значения средней шероховатости. Деструктивные процессы затронули менее 10 мкм (0,2 % от толщины экспонированных плит) после 2 лет, а после 4 лет - 20 мкм (0,4 % от толщины плит). С другой стороны, оценить изменение объема поверхностной деструкции пластиков можно изменением значения открытой пористости поверхности образцов. В таблице 3 приведены результаты измерения открытой пористости.

Таблица 3 Значения открытой пористости пластиков

Марка ПКМ	Состояние*	$P_o$
БП	И	0,13
	К-2	0,21
	К-4	0,58
СП	И	0,27
	К-2	0,44
	К-4	0,62

\*И - исходное состояние, К-2 - после 2 лет экспонирования, К-4 - после 4 лет экспонирования

На рисунках 4 и 5 представлены микроснимки, полученные на растровом электронном микроскопе JSM-7800F. На рисунке 4 представлены поверхности, лицевой, обращенной к солнцу, и обратной стороны пластиков после 2 лет экспонирования.

Анализ микроснимков поверхностей показывает, что образование пор (черные точки) и оголение армирующей ткани (в виде штрихов) в лицевой и обратной сторон у БП значительно меньше, чем у СП.

Несмотря на то, что для черной поверхности БП величина локального перегрева больше, деструкция поверхностного слоя в исследуемом СП идет быстрее.

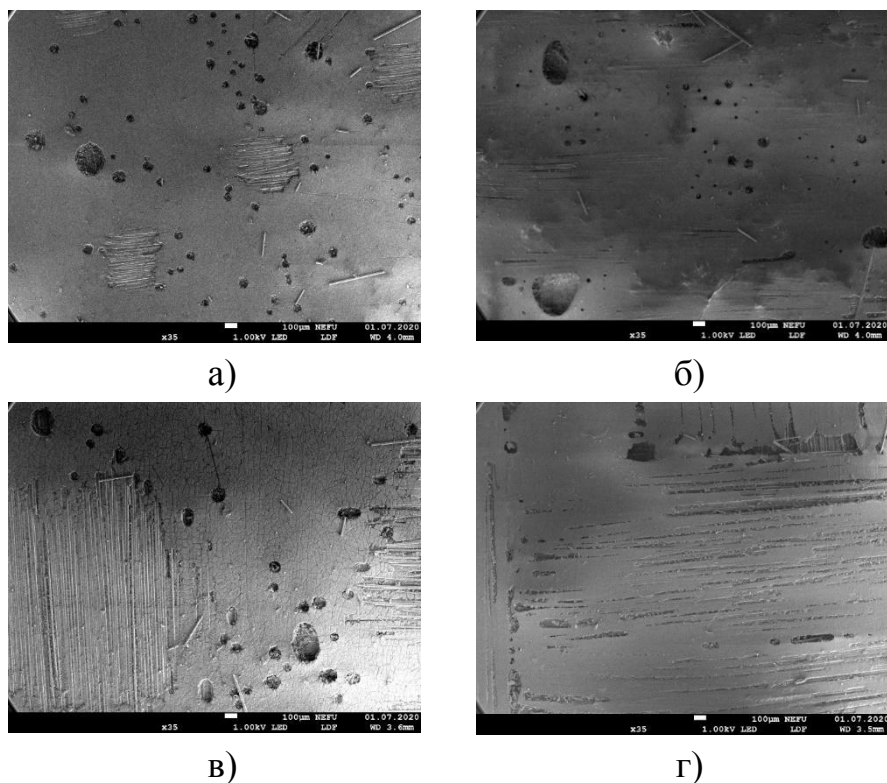


Рисунок 4 – Поверхность образцов текстолитов после 2 лет экспозиции: БП- а) лицевая сторона, б)- оборотная сторона; СП – в) лицевая сторона, г)- оборотная сторона (x35)

У образцов после выдержки в течение 48 месяцев на поверхности наблюдаются оголение волокон, появление пор размерами от 45 мкм до 1,08 мм, образования микротрещин шириной от 0,26 мкм до 1,29 мкм. Таким образом, величины показателей рельефа и открытой пористости могут рассматриваться в качестве чувствительной количественной характеристикой при начальной деградации поверхности полимерных композитов при климатических испытаниях.

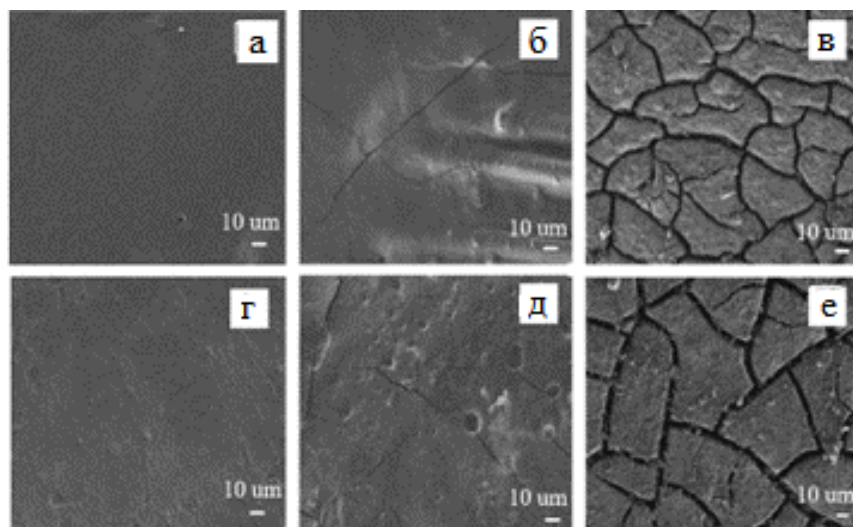


Рисунок 5 – Фотографии поверхности образцов БП (а, б, в) и СП (г, д, е): исходный, после 2 и 4 лет экспозиции слева направо (x500)

Важным показателем для композитного шпунта является влаго- и водопоглощение.

Проведены исследования упруго-прочностных свойств образцов БП и СП в исходном состоянии, подвергнутые контакту с морской (модельный раствор, рН=8,22) и речной водой (из р. Лена, рН=6,83) при комнатной температуре, а также после экспонирования при погружении в речную воду (ледяная вода) в течение 70 суток (3.11.2020 г – 12.01.2021 г).

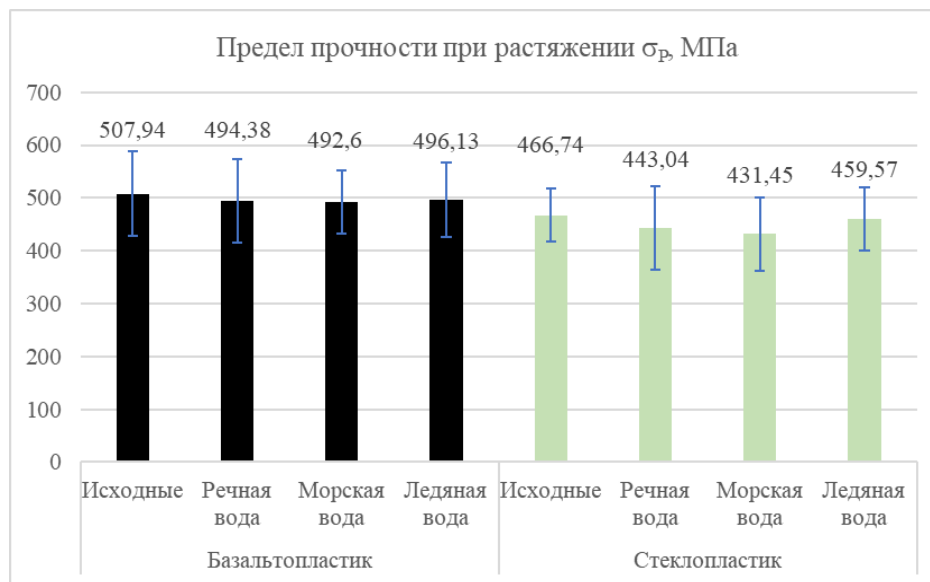


Рисунок 6 – Результаты испытаний образцов на растяжение

На рисунке 6 приведена гистограмма значений предела прочности при растяжении испытуемых образцов. По результатам испытаний видно, что значения предела прочности при растяжении у БП остаются практически неизменными в различных водных средах, что нельзя сказать про образцы СП. Предел прочности при растяжении СП в речной воде снизился на 5,1 %, а в морской воде на 7,6 %. Однако, показатели предела прочности экспонированных в ледяной воде образцов, снизились у БП на 2,3 %, а у СП на 1,5 %. Результаты испытаний композитных пластиков на ударную вязкость методом Шарпи приведены на рисунке 7.

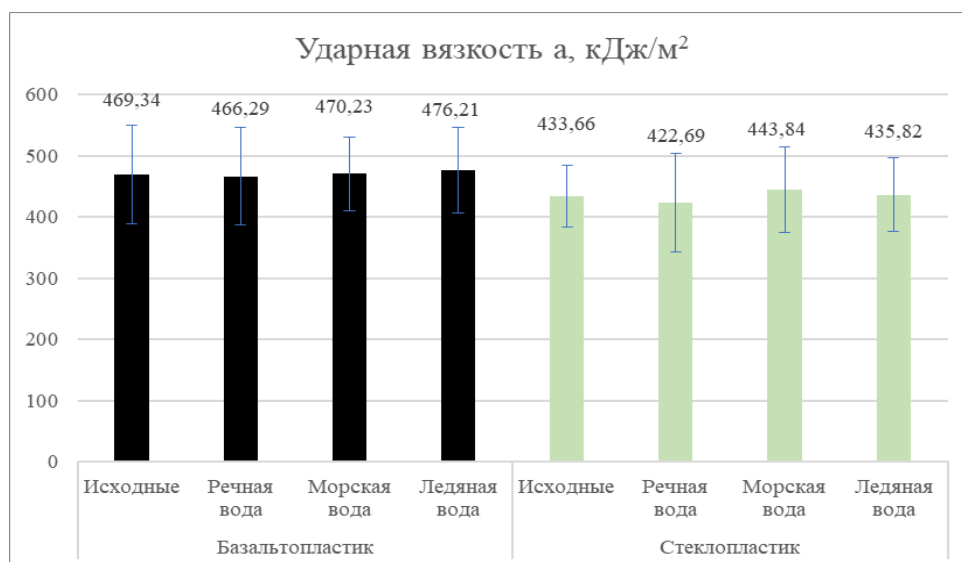


Рисунок 7 – Результаты испытаний образцов на ударную вязкость

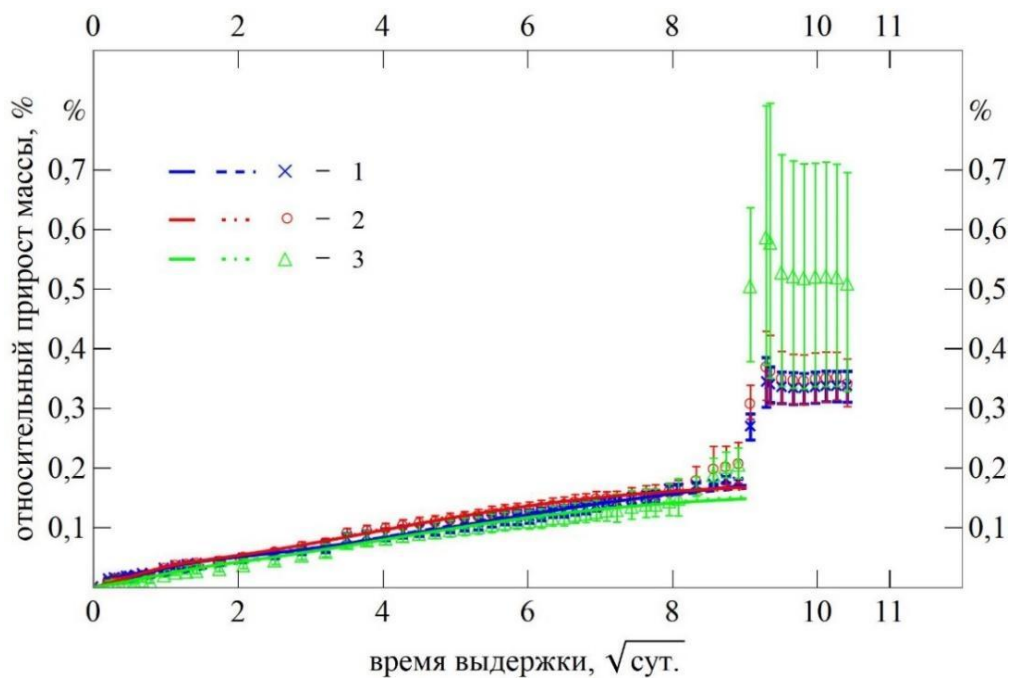
После произведенных испытаний композитных пластиков было выявлено, что у экспонированных в ледяной воде образцов ударная вязкость увеличивается у БП на 1,5 %, у СП на 0,5 %, также повышаются значения у образцов в морской воде: БП– 0,2 %, СП – 2,3 %.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования влагопоглощения в базальто- и стеклопластике при стационарном термовлажностном режиме 23 °C/68 RH.

Экспериментальные данные по влагопоглощению образцов были обработаны в соответствии с ГОСТ 4650–2014.

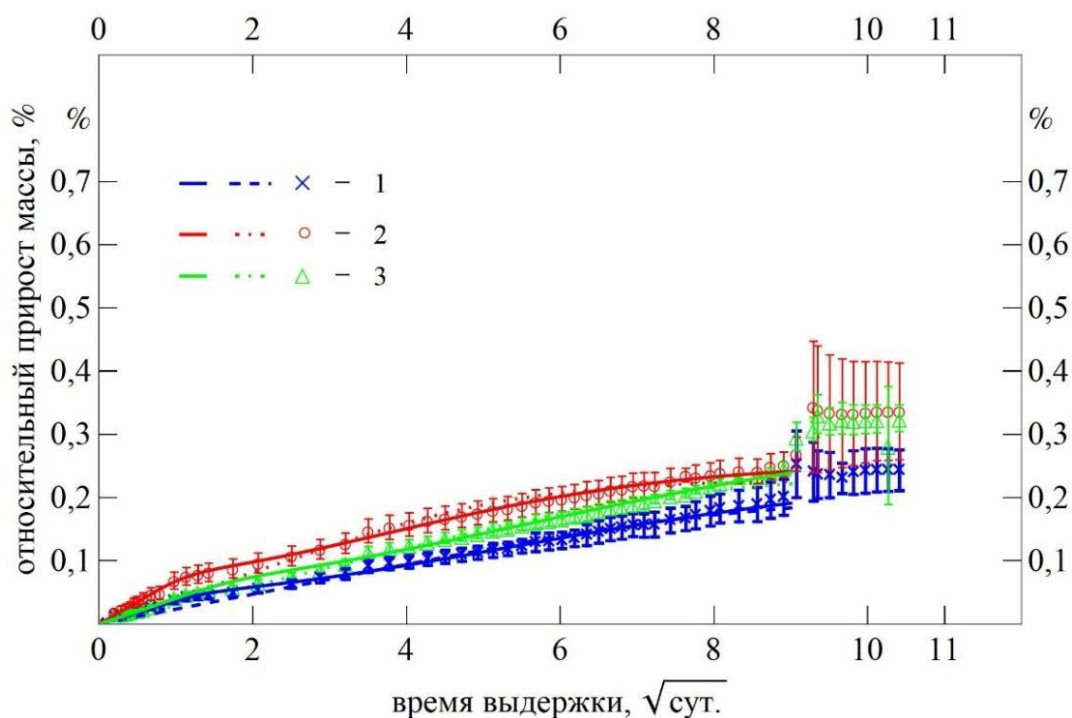
На рисунке 8 представлена экспериментальная кинетика поглощения влаги исходных образцов СП и образцах СП, после экспонирования в течение 24 и 48 месяцев на открытом атмосферном стенде в г. Якутске. В течение первых 63 дней влагонасыщения наблюдается непрерывная кинетика с достаточно хорошей статической выборочной погрешностью (1 стадия). После 63 дней влагонасыщения наблюдается рост со скачком влагосодержания до 86 дней, затем в течение 4 дней убыль – до постоянной массы (2 стадия). Таким образом, наблюдается аномальная диффузия влаги, состоящая из двух стадий.

На рисунке 9 представлена экспериментальная кинетика поглощения влаги в исходных образцах БП, в образцах БП, после экспонирования в течение 24 и 48 месяцев на открытом атмосферном стенде в г. Якутске. В течение первых 80 дней наблюдается аналогичная 1 стадия и затем 2 стадия. Таким образом, наблюдается аномальная диффузия влаги, состоящая из двух стадий.



1 – исходный; 2 – после экспонирования в течение 2 лет; 3 – после экспонирования в течение 4 лет

Рисунок 8 – Экспериментальные значения содержания влаги и ее аппроксимация (сплошная линия – релаксационная модель, прерывистая – модель Фика) в образцах стеклопластика



1 – исходный; 2 – после экспонирования в течение 2 лет; 3 – после экспонирования в течение 4 лет

Рисунок 9 – Экспериментальные значения содержания влаги и ее аппроксимация (сплошная линия – релаксационная модель, прерывистая – модель Фика) в образцах базальтопластика



Для аппроксимации первой стадии поглощения влаги пластиком была выбрана релаксационная модель аномальной диффузии и модель диффузии Фика. Для определения параметров аппроксимации использовалась методика аппроксимации методом наименьших квадратов. В таблице 4 и 5 представлены параметры аппроксимации релаксационной моделью и моделью Фика кинетики влагопоглощения пластика. Значение предельного влагонасыщения второй стадии определялось как среднее последних шести измерений прироста массы образцов (табл. 5).

Таблица 4 Параметры поглощения влаги согласно релаксационной модели аномальной диффузии

Материал	Срок экспозиции	Коэффициент диффузии, мм <sup>2</sup> /сут.	Предельное влагонасыщение до релаксации, %	Предельное влагонасыщение после релаксации, %	Коэффициент релаксации, 1/сут.	Коэффициент детерминированности
БП	Исх.	2,75	0,04	0,23	0,018	0,997
то же	2 года	3,77	0,08	0,25	0,034	0,997
то же	4 года	1,63	0,07	0,3	0,016	0,995
СП	Исх.	2,9	0,04	0,21	0,018	0,995
то же	2 года	4,04	0,04	0,18	0,035	0,992
то же	4 года	2,3	0,03	0,16	0,032	0,995

Таблица 5 Параметры поглощения влаги согласно модели Фика

Материал	Срок экспозиции	Коэффициент диффузии, мм <sup>2</sup> /сут.	Предельное влагонасыщение (1 стадия)	Коэффициент детерминированности	Предельное влагонасыщение (2 стадия)
БП	Исх.	0,07	0,2	0,997	0,24
то же	2 года	0,16	0,22	0,997	0,34
то же	4 года	0,08	0,24	0,99	0,33
СП	Исх.	0,06	0,19	0,995	0,26
то же	2 года	0,1	0,17	0,992	0,35
то же	4 года	0,07	0,16	0,995	0,52

Согласно шкале Чеддока нижняя граница адекватности аппроксимации достигается, когда коэффициент детерминированности равен 0,81. Таким образом первая стадия адекватно аппроксимируется Фиковской и релаксационной моделью, при этом релаксационная модель имеет лучший коэффициент детерминированности (табл. 4, 5).

На запуск второй стадии необходимо 65–80 дней. Согласно таблице 5 после экспонирования в течение 2 лет значение предельного влагонасыщения увеличивается на 34,7% у стеклопластика и на 41,7% у базальтопластика, а после 4 лет экспонирования на 100% у стеклопластика и на 37,5% у базальтопластика, что указывает на то что СП подвержен большему разрушению под воздействием длительного термовлажного режима 23 °С/68 RH, чем БП.

Коэффициент диффузии согласно двум моделям аппроксимации имеет прирост после 2 лет климатического воздействия (табл. 4, 5), что указывает на деструкцию поверхности пластиков.

**В пятой главе** описывается технология получения полимерного конструкционного материала для шпунтового ограждения на основе базальтового волокна, полученного методом инфузии, путем последовательной укладки армирующего материала на форму, пропиткой трёхкомпонентным эпоксидным связующим, состоящим из ЭД-22, Изо-МТГФА, Агидол 53.

Шпунт с толщиной верхней стенки 9,7 мм и 7,2 мм на боковых стенках состоит из 29 слоев базальтовой ткани БП-11/1. Плетение саржа.

Шпунты из базальтопластика имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными шпунтами из стали и другими полимерными материалами. Их лёгкий вес в сочетании со стойкостью к коррозии приведёт к экономии и устойчивости конструкций. Базальтопластики являются идеальным выбором для морских сооружений, прибрежных строений, парковок, мостов, дорог и строений, весьма чувствительных к коррозии, а также для водопроницаемых бетонных покрытий.



Рисунок 10 – Шпунтовое ограждение на основе базальтовой ткани

Проведены расчёты экономической эффективности использования разработанного шпунта на примере укрепления береговой линии длиной 100 м. Показано, что использование шпунта из базальтопластика позволяет сэкономить до 60 % от стоимости проекта при замене импортного аналога, 25% – при замене классического шпунта из стали. Такая экономия объясняется, невысокой стоимостью, значительным снижением транспортных издержек, и снижением стоимости монтажа. А при учете снижения эксплуатационных расходов и увеличения срока эксплуатации, показатели экономической эффективности будут ещё выше.

Таблица 6 Сравнительные характеристики шпунта типа Ларсен из стали и базальтопластика

Свойства, требования	Шпунт Ларсена из стали	Шпунт из базальтопластика
Ширина профиля по центрам замков В, мм	540	536
Масса 1 м.п, кг	114	12,6 (9 раз легче аналога)
Толщина стенки s, мм	23	7,5
Толщина стенки t, мм	11	9
Электропроводность	проводник	диэлектрик
Коррозионная стойкость	разрушение	коррозионостойкость
Условия хранения	условия среды, в которой не происходит коррозия металла	возможность длительного хранения независимо от среды
Требования к использованию	требуется спец.техника, ограничение от требуемой длины, изготовление до 6 м	не требуется, сокращаются расходы на транспортировку и установку, изготовление любой длины, в зависимости от требований

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из проведенного анализа наводнений на реках Якутии следует, что крупные наводнения происходят с очень редкой повторяемостью и максимальными днями пребывания воды в затопленных зонах от 15 до 30 дней. Установлены основные требования к материалу для шпунтовых ограждений и выявлено, что наиболее отвечающие требованиям коррозионной стойкости, условиям длительного хранения независимо от среды и малыми расходами на транспортировку и их установку, являются композитные шпунтовые стенки.

2. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что характер разрушения образцов базальтопластика с саржевым переплетением армирующих волокон (3/2) имеет вид разрушения «вязко-хрупкий с вытаскиванием волокон», что говорит о более высокой адгезионной прочности между матрицей и волокнами, а разрушение образцов стеклопластика с полотняным переплетением армирующих волокон имеет характер разрушения «обусловленный сдвигом матрицы и расслоением», что говорит о адгезионном разрушении.

3. Коэффициенты сохраняемости механических свойств образцов увеличились после 2 лет экспозиции на открытых стендах в г. Якутске, характеризуемом экстремально холодным климатом ( $k_R$  БП=1,11,  $k_R$  СП = 1,22). После 4 лет экспонирования коэффициенты сохраняемости предела прочности при растяжении у пластиков одинаковые, значения коэффициента сохраняемости предела прочности при изгибе у образцов БП выше, чем у СП на 20%.

4. Степень и глубина деструкции до 0,2% от толщины плит СП и БП за 2 года не влияет на их прочность, при повышении степени деструкции (после 4 лет на 0,4 % от толщины плит) снижение прочностных характеристик у СП проявляется более заметно, при этом относительно 2 года прочностные характеристики при растяжении у БП снижаются на 15%, у СП – на 22%, предел прочности при изгибе: у БП снижаются на 12%, у СП – на 47%, после экспонирования 2 лет значение предельного влагонасыщения увеличивается на 34,7% у стеклопластика и на 41,7% у базальтопластика, а после 4 лет экспонирования на 100% у стеклопластика и на 37,5% у базальтопластика. Полученные результаты работ доказывают, что базальтопластики проявляют более высокую климатическую устойчивость.

5. После пребывания в среде воды с различным рН в течение 70 дней, прочностные характеристики образцов БП претерпели незначительные изменения в отличие от СП, где значение предела прочности при растяжении в речной воде снизилось на 5,1 %, а в морской воде на 7,6 %.

6. Экспериментальная кинетика поглощения влаги исходных и экспонированных пластиков в климате г. Якутска в течение 24 месяцев имеет две стадии поглощения влаги при длительном термовлажностном режиме 23 °С/68 RH в течение 108 дней. Первая стадия (63–80 дней) адекватно аппроксимируется Фиковской и релаксационной моделью, при этом релаксационная модель имеет лучший коэффициент детерминированности. После квазиравновесия первой стадии во второй стадии наблюдается рост со скачком влагосодержания до 86 дней, затем в течение 4 дней убыль – до постоянной массы. На запуск второй стадии необходимо 65–80 дней. Максимальное среднее значение влагопоглощения составляет 0,45 %. Коэффициент диффузии согласно двум моделям аппроксимации имеет прирост после климатического воздействия, что указывает на деструкцию поверхности пластиков.

7. Установлено, что изменение таких величин, как параметры шероховатости линейного профиля поверхности, открытой пористости, сорбции и диффузии влаги, микроскопии чувствительны к деструкции поверхностного слоя пластиков и могут применены для оценки начальной стадии влияния климатических факторов при натуральных испытаниях.

8. Разработано базальтопластиковое шпунтовое ограждение, полученное методом инфузии, обладающее комплексом эксплуатационных свойств и отвечающее требованиям, удельные показатели которого превышают данные показатели аналогов из стали, стекловолокна и ПВХ. Получен патент РФ №187377 на полезную модель композитная шпунтовая свая на основе базальтового волокна. Проведены расчёты экономической эффективности использования разработанного шпунта на примере укрепления береговой линии длиной 100 м. Показано, что использование шпунта из базальтопластика позволяет сэкономить до 60 % от стоимости проекта при замене импортного аналога, 25% – при замене классического шпунта из стали.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Матвеева И. Г. Исследование прочностных свойств текстолита, армированного тканями с прямым переплетением пучков базальтового ровинга / Лебедев М. П., Туисов А. Г., Кычкин А. А. // Вестник СВФУ. – 2015. – № 6(50). – С.80–86.
2. Матвеева И. Г. Исследование прочностных свойств текстолита, армированного тканями с различным типом переплетения / Лебедев М. П. // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – № 5–1. – С. 94–97.
3. Матвеева И. Г. Полимерные композиционные материалы на основе базальта / Лебедев М. П. // Химическая технология. – 2017. – №6. – С.270–272.
4. Лукачевская И.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов на примере текстолитов / Лебедев М. П., Кычкин А.К. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – № 4 (40). – С.69–73.
5. Лукачевская И.Г. Влияние внешней среды на свойства полимерных композиционных материалов / Лебедев М. П., Стручков Н.Ф. // Химическая технология. – 2020. – № 12. – С.543–547. DOI: 10.31044/1684-5811-2020-21-12-543-547
6. Лукачевская И.Г. Оценка начальной стадии климатического старения базальто- и стеклопластиков в условиях экстремально холодного климата / Гаврильева А. А., Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф., Дьяконов А.А. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. –Т. 26. № 2. – С.159–169. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-2-11

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus:

1. Matveeva, I.G. Polymer Composite Materials Based on Basalt / Lebedev M.P. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2018. – № 52(4). – P. 670–672. DOI: 10.1134/S0040579518040206
2. Lukachevkaya, I.G. Effect of the Environment on the Properties of Polymer Composite Materials / Lebedev, M.P., Struchkov, N.F. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – № 55. – P.1041–1044. <https://doi.org/10.1134/S0040579521050109>

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. Матвеева И. Г. Исследование прочностных свойств композиционного материала на основе базальтового ровинга // ЭРЭЛ-2016: материалы Всероссийской конференции научной молодежи, [Редколлегия: А. Г. Федоров и др.]. – Якутск: Издательский дом СВФУ. – 2016. – С. 876.
2. Лукачевская И.Г. Исследование прочностных свойств текстолита, армированного тканями с прямым переплетением пучков базальтового ровинга / Лебедев М. П., Кычкин А.К. // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – 2018. – Т. 2. – С. 557–561.

3. Лукачевская И.Г. Влияние экстремально холодного климата на свойства полимерных композиционных материалов // Материалы III Молодежной конференции ФИЦ ЯНЦ СО РАН. – 2021. – С. 10–11.

4. Лукачевская И.Г. Исследование влияния климатических факторов на физико-механические свойства базальто- и стеклопластиков / Копырин М.М., Кычкин А.К., Туисов А.Г., Иванов А. Н. // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 120-летию открытия синтетического каучука И. Л. Кондаковым (08.10.1857-14.10.1931), уроженцем г. Вилуйска Якутской области. Киров. – 2021. – С. 148–151.

Патент на полезную модель:

1. Пат. 187377 U1 Российская Федерация. Шпунтовая свая композитная / Лукачевская И.Г., Лебедев М. П., Кычкин А.К. – № 2018134258, опубл. 04.03.2019, Бюл. №7. – 4 с.