

УДК 338.4

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКОГО И СУБАРКТИЧЕСКОГО ПОЯСОВ

© 2025 С.Б. Ермаков

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 04.08.2025

В последние десятилетия основными регионами нефте- и газодобычи стали северные – наиболее удаленные регионы страны, отличающиеся экстремальными климатическими условиями – низкими температурами, высоким уровнем влажности, засоленности и кислотности грунтов с практически отсутствующей транспортной инфраструктурой, что привело к резкому удорожанию доставки, монтажа, эксплуатации и ремонтов основного и вспомогательного оборудования месторождений, что выдвигает новые – повышенные требования к качеству и надёжности используемых в условиях Арктического и Субарктического регионов машин, механизмов и строительных конструкций. Требования по повышению надёжности строительных конструкций, снижению затрат по их транспортировке, монтажу и обслуживанию делают крайне привлекательным использование при обустройстве месторождений свай, балок, труб из полимерных композиционных материалов (ПКМ), однако к настоящему времени практически полностью отсутствует нормативно-техническая база, регламентирующая эксплуатацию изделий из ПКМ в северных регионах. В первую очередь это связано с недостаточной изученностью проблем надёжности, работоспособности и долговечности ПКМ в условиях агрессивного внешнего воздействия климатических факторов, что не позволяет определить показатели качества строительной продукции из ПКМ. В настоящей работе проведены исследования снижения показателей качества фундаментных свай, изготовленных из ПКМ под воздействием низких климатических температур в зимние месяцы, многократных переходов температуры через ноль, повышенного уровня соли в воздухе и грунте. Измерительными методами определения показателей качества продукции проведена оценка снижения уровня качества продукции под воздействием внешних гео-климатических факторов и показано, что наиболее значимыми факторами, влияющими на снижение качества строительных конструкций из ПКМ, являются повышенная концентрация соли и термоциклическое воздействие перехода температуры окружающей среды через ноль.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, гео-климатические факторы, буропускные сваи, механические свойства,

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-82-96

EDN: ENARHF

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSEG-2024-0009 Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах).

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание объемов добычи нефтегазовым комплексом страны осуществляется за счет постепенной миграции добывающих предприятий в регионы, расположенные на территории Арктического и Субарктического климатических поясов. Особенностью этих регионов являются наличие длительного – от двухсот и более суток снежного покрова, экстремально низкие климатические температуры, достигающие минус 60°C, сложный геологический состав почв – верхний сезонно-талый слой отличается повышенным уровнем засоленности и кислотности, нижний – многолетне-мерзлые грунты, что резко снижает число методов строительства в этих регионах. Минимальная численность населения еще более усугубляет сложности строительных работ при обустройстве новых месторождений. Работа нефтедобывающих компаний в этих регионах, направленная на поиск и разработку новых перспективных месторождений, ограничивается логистическими и экологическими особенностями – отсутствием транспортной инфраструктуры и необходимостью бережного отношения к трудно возобновимым природным ресурсам Севера при прокладке новых постоянных и временных дорог к новым месторождениям, финансово-экономическими проблемами – резким увеличением расходов на логистику и обустройство новых месторождений, отсутствием местных квалифицированных кадров [1,2].

*Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив.
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru*

Сложность и трудоемкость доставки оборудования и строительных конструкций к местам обустройства месторождений выдвигает ряд жёстких требований к материалам, из которых оно изготавливается. К этим требованиям относятся - срок службы, который должен достигать 30 и более лет, высокая надежность и работоспособность при экстремально низких температурах, ремонтно-пригодность, высокая коррозионная стойкость в условиях добычи коррозионно-агрессивного сырья, минимизация массы доставляемых сборочных единиц [3,4].

Решение данной проблемы может быть получено при постепенном замещении металлических материалов и конструкций на полимерные композиционные материалы (ПКМ) и конструкции. Однако до настоящего времени практически полностью отсутствует нормативно-техническая документация, которая бы регламентировала условия использования ПКМ в строительных конструкциях, размещенных в зоне холодного климата Арктической и Субарктической зон. Отсутствие нормативной базы связано, в том числе, с недостаточным объемом данных об изменении свойств и деградации структуры ПКМ в ходе длительной эксплуатации в условиях низких температур, при многократных переходах температуры через точку замерзания воды, что характерно для условий Арктики [5]. В соответствии с «Руководством по инженерно-техническому обследованию, оценке качества и надежности строительных конструкций зданий и сооружений (РТМ 1652-9-89)» для решения возможности использования ПКМ необходимо получить информацию по ряду вопросов, к числу которых относятся анализ состояния и несущей способности конструкций в ходе эксплуатации, выявление причин, которые могут привести к их повреждению и деформации, определить ресурс конструкций и условия, которые могут привести к его снижению, оценить возможность увеличения эксплуатационных нагрузок от различного технологического оборудования и изменения конструкции сооружения.

Ответы на данные вопросы могут быть получены при разработке системы управления качеством ПКМ-конструкций – то есть действий, осуществляемых при создании и эксплуатации или потреблении продукции, в целях установления, обеспечения и поддержания необходимого уровня ее качества (ГОСТ 15467–79). Обычно, процесс управления качеством таких конструкций осуществляется путем обоснования сроков и условий безопасной эксплуатации используемых в конструкциях материалов методом климатической квалификации [3,6]. Этот метод представляет собой комплексное исследование материалов в лабораторных условиях и на климатических полигонах, расположенных в тех климатических зонах, где планируется их эксплуатация и включает в себя исследования деградации комплекса механических свойств под воздействием внешних факторов, в том числе длительных климатических воздействий влажного и соленого воздуха, низких и повышенных температур, коррозионно-агрессивных сред и т.п.

В представленном исследовании показаны результаты климатической квалификации ПКМ, используемых в строительных конструкциях, предназначенных для обустройства месторождений нефти и газа в зоне ММГ, где к настоящему времени добывается большая часть нефти и газа. В Российской Федерации зона ММГ занимает значительные территории, распространяющиеся от берегов Белого моря до Тихого океана, и располагается на глубине от 0,5 до 4,5 м, при толщине слоя от нескольких метров до 1,5 км. Главными факторами, определяющими надежность эксплуатации оборудования в условиях ММГ, которые должны учитываться при их проектировании являются глубина, соленость и закисленность деятельного (сезонно-талого) слоя грунта – то есть грунта, который расположен у поверхности земли – выше зоны ММГ и ежегодно оттаивает в летние месяцы года [7,8].

К числу основных строительных объектов, возводимых при обустройстве месторождений наиболее ответственными являются промышленные газо- и нефтепроводы, компрессорные и насосные станции, которые при обустройстве площадок добычи и первичной переработки добываемого сырья месторождений монтируются в наземном исполнении и устанавливаются на свайные фундаменты [9]. К числу преимуществ использования свайных фундаментов относятся относительно небольшая стоимость их строительства, значительная глубина установки свай, что предотвращает процессы морозного пучения и возникающей при этом неравномерной осадки зданий и сооружений, возможность ведения строительных работ в зимние месяцы. Ежегодно в строительных работах при обустройстве новых месторождений нефти и газа используется от нескольких десятков до сотни тысяч штук свай различного типа [10,11], поэтому, в работе, в качестве базовой строительной конструкции была выбрана буроопускная ПКМ-свая, возможность использования которых при обустройстве месторождений в настоящее время активно обсуждается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Первой решаемой задачей в работе стал анализ видов и последствий потенциальных несоответствий или FMEA-анализ. Для отработки всех возможных факторов риска и их последствий были построены таблицы FMEA-анализа (они же протоколы исследования) [20]. При этом метод FMEA-

анализа был доработан, а именно потребовалось учитывать дополнительный параметр влияющий на расчет приоритетного числа риска – опасность разрушения. Считаю, что данный параметр необходимо учитывать при любых исследованиях рисков, связанных с внедрением новых материалов. Результаты проведенных исследований сведем в таблицы 1-4.

Таблица 1. Оценка значимости последствий

Фактор риска	Время (часы)							
	1	100	1000	2500	10 000	21 000	100 000	235 000 ⁵⁾
	Оценка (метод)							
	По результатам испытаний материалов и конструкций				Полигонные испытания		Статистические наблюдения	
Низкие температуры	1	1	2	3	3	4	5	6
Переходы через «0» ¹⁾	1	1	3	4	5	7	9	10
Засоленность	1	6	7	7	7	8	8	8
Суммарное воздействие факторов	1	7	8	8	9	10	10	10
Суммарное воздействие факторов при нанесении на поверхность защитных покрытий	1	1	1	2	2	3	3	3
Механическое повреждение покрытия ²⁾ Над уровнем земли ³⁾	1	6	8	9	10	10	10	10
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – сезонно-талый слой	1	1	7 / 2 ⁴⁾	9 / 2	10 / 3	10 / 3	10 / 4	10 / 4
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – ММГ	1	1	1	1	1	1	1	1

Примечания к таблице 1.

Из расчета 50 циклов в год 7800 час:50 = один цикл в 156 часов

Механический дефект - риски, царапины и забоин при транспортировке, обрезка, сверловка и подгонка при монтаже, повреждения при установке свай, случайные механические повреждения, абразивное изнашивание от снега, частиц льда, песка и т. п. Механические дефекты покрытия должны отслеживаться и устраняться в ходе ежегодного планового технического диагностирования состояния свай или немедленно, если дефект был обнаружен в ходе эксплуатации. Доступно только для надземных частей. Ниже уровня грунта – диагностирование невозможно

Над уровнем грунта и в сезонно-талом слое – действуют все факторы риска (для сезонно-талого слоя соль и циклы только в летние месяцы – 3-4 месяца в году); ММГ – температура ММГ – примерно постоянна и обычно не опускается ниже минус 10 град, термоциклов нет, солёность грунтов влияет минимально

Числитель – летние месяцы, знаменатель – температура грунта ниже 0 град.

Регламентный (максимальный) срок службы свайного фундамента на нефтегазовом месторождении определяется в 30 лет – 30x7800 ~ 235 000 часов

Таблица 2. Оценка вероятности возникновения
(вероятность появления дефекта от фактора риска; для механического дефекта –
развитие процессов, связанных с факторами риска в зоне повреждения)

Фактор риска	Время (часы)							
	1	100	1000	2500	10 000	21 000	100 000	235 000
Низкие температуры	1 ¹⁾ / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 2	2 / 10	3 / 10
Переходы через «0» ²⁾	1 / 1	1 / 1	1 / 4	1 / 6	2 / 8	6 / 9	9 / 10	10 / 10
Засоленность	1 / 1	1 / 6	1 / 7	1 / 7	1 / 7	1 / 8	3 / 8	4 / 8
Суммарное воздействие факторов	1 / 1	1 / 6	1 / 8	1 / 9	3 / 10	7 / 9	9 / 10	10 / 10
Суммарное воздействие факторов при нанесении на поверхность защитных покрытий	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 2	1 / 2	1 / 3	2 / 3	2 / 3
Механическое повреждение покрытия Над уровнем земли ³⁾	1 / 1	1 / 6	1 / 8	1 / 9	3 / 10	4 / 10	5 / 10	5 / 10
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – сезонно-талый слой ⁴⁾	1 / 2 ⁵⁾	1 / 7	2 / 7	2 / 9	3 / 10	3 / 10	4 / 10	6 / 10
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – ММГ	1 / 2 ⁵⁾	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2	1 / 2

В числителе – разрушение (для свай при статическом воздействии от нормальных напряжений конструкции и касательных напряжений морозного пучения, опирающейся на фундамент; в знаменателе – деградация (потеря прочности в диапазоне до 25%)

Из расчета 50 циклов в год 7800 час:50 = один цикл в 156 часов

Над уровнем грунта и в сезонно-талом слое – действуют все факторы риска (для сезонно-талого слоя соль и циклы только в летние месяцы – 3–4 месяца в году); ММГ – температура ММГ – примерно постоянна и обычно не опускается ниже минус 10 град, термоциклов нет, солёность грунтов влияет минимально. Оценка ведется на случай – если повреждение покрытия не устранено

Вероятность возникновения повреждения при установке свай

Факторы риска, не обсуждаемые в статье: качество исходных компонентов; технология производства труб и других конструкций; водопоглощение ПКМ; воздействие ультрафиолета; циклические воздействия от оборудования, установленного на фундаменты; растепление грунтов, связанное с глобальным потеплением.

Второй решаемой задачей стало комплексное исследование материалов. Образцами для исследований были выбраны макеты ПКМ-труб, полученных методом мокрой намотки. В качестве исходных материалов для их изготовления использованы конструкционные базальтовые ткани, основа - эпоксидная смола SR 1710 INJ. Технология намотки была основана на одновременной подаче наполнителя, смолы и отвердителя на вращающуюся металлическую оправку. Число слоев макетной трубы обеспечивалась возвратно-поступательным движением каретки с рулоном наполнителя. Этот метод обеспечивает достаточно высокую производительность процесса. Для проведения испытаний были получены макетные трубные заготовки диаметром 219 мм.

Таблица 3. Оценка возможности обнаружения дефекта, возникшего под действием фактора риска

Фактор риска	Время (часы)							
	1	100	1000	2500	10 000	21 000	100 000	235 000
Низкие температуры	10 ¹⁾	10	10	10	10	10	10	10
Переходы через «0» ²⁾	10 ¹⁾	10	10	10	10	10	10	10
Засоленность	10	10	7	6	5	5	4	4 ²⁾
Суммарное воздействие факторов	10 ¹⁾	10	10	10	10	10	9	8 ³⁾
Суммарное воздействие факторов при нанесении на поверхность защитных покрытий	10 ¹⁾	10	10	10	10	10	10	10
Механическое повреждение покрытия Над уровнем земли ³⁾	3	3	3	3	3	3	3	3
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – сезонно-талый слой ⁴⁾	10	10	10	10	10	10	10	10
Механическое повреждение покрытия Ниже уровня земли – ММГ	10	10	10	10	10	10	10	10

Внешних изменений в конструкции от деградации свойств под действием низких температур и термоциклических воздействий определить визуальным методом – невозможно. Для этой цели могут быть использованы легкосъёмные образцы-свидетели, установленные на сваю и исследования по изменению их свойств в специализированной лаборатории

Возникновение на поверхности белесых отложений на поверхности сваи

Сложность снижается за счет видимых следов солевых отложений

Полученные образцы были испытаны в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации оборудования из ПКМ, эксплуатация которого планируется в климатических условиях Арктического и Субарктического региона – то есть в диапазоне температур 20 - минус 60 °С. Методика испытаний ПКМ достаточно подробно описана в работах [7,8,12-14]. Испытания заключались в исследовании статических механических свойств в соответствии с требованиями ГОСТ 56785–2015 и ГОСТ 32656–2017, ударной вязкости по Шарпи (ГОСТ 4647-2015) и определении механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке (ГОСТ Р 56812-2015).

Испытания образцов, вырезанных из макетов труб были проведены в исходном состоянии, а для максимального учета климатических факторов были выполнены испытания после длительного (до 1000 час) холодного старения при температурах минус 60°С имитирующего длительное температурное воздействие на материал сваи; после термоциклирования, которое заключалось в воздействии быстроменяющихся максимального и минимального значений температуры (20 – минус 60°С) имитирующих «ночные» и «дневные» температурные воздействия внешней среды (переходы через 0 °С в весенний и осенний периоды). Все испытания были проведены в закрытом помещении при температуре и (23±2) °С относительной влажности окружающего воздуха (50±10)%. Перед про-

Таблица 4. Результаты FMEA-анализа

Фактор риска	Описание последствий		Оценка значимости последствия	Оценка вероятности возникновения	Оценка возможности обнаружения	Оценка опасности разрушения
Низкие климатические температуры	Деградация прочностных свойств в ходе длительной эксплуатации		6	10 (всегда) – скорость деградации до 20% за срок службы 100 тыс. час.	1	3 – при неправильном определении скорости деградации, дефектах структуры ПКМ, комплексном воздействии других факторов
	Разрушение		10	1 крайне редко – при проектировании закладывается запас прочности с учетом возможной деградации	1	
Переходы температуры через ноль	Деградация прочностных свойств в ходе длительной эксплуатации		6	10 (всегда) Самый опасный фактор – т.к. не затухает от времени. Интенсивность зависит от региона в Якутии более 50 переходов за год, на Ямале ~ 50-55	10 – нет видимых изменений, которые можно было бы оценить при техническом обследовании	10 - крайне трудно определяемая зависимость, что связано с местом установки конструкций, климатическими особенностями. Из расчета 50 циклов в год при эксплуатации сваи 30 лет (12 лет) потеря прочности может достигать до 35-40% Частично можно устранить или ослабить защитными покрытиями
	Разрушение		10	10 – часто встречающееся разрушение	1	
Соляной туман, засоление почв	Деградация прочностных свойств в ходе длительной эксплуатации	Охрупчивание. Потеря прочности	6	8 (всегда) Интенсивно развивается в первые 1000 часов, потом по мере засоления поверхности - ослабевает Можно устранить защитными покрытиями,	8 – отложения на поверхности, коробление поверхностного слоя	7 – интенсивность падает от времени воздействия. В первые 100 часов потери могут достигать --20%, – затем интенсивность снижается. Суммарно можно потерять до 30% прочности. Можно устранить водоотталкивающим покрытием. Необходим постоянно-периодический контроль целостности покрытия.
	Разрушение		10	5 – после нарушения целостности покрытия	1	
Механические дефекты	Потеря целостности конструкции,		6	7 – случайные повреждения, риски, царапины с повреждением покрытия. Часто появляются при монтаже конструкций – сверловка, резка, подгонка	1	5 – дефекты наносятся при транспортировке, монтаже, эксплуатации. Должны максимально быстро закрываться защитными лаками при обнаружении. Иначе развитие разрушения при воздействии вышеперечисленных факторов риска. Появление часто связано с неграмотным монтажом и обслуживанием
	Разрушение		10	3 – обычно устраняются при профилактике	1	

ведением испытания была проверена центровка силовой цепочки испытательной машины Zwick/Roell Z100 в соответствии с требованиями ГОСТ 56785–2015 и маятникового копра, Zwick/Roell RKP 450, который полностью соответствовал требованиям ГОСТ 10708–82. При испытаниях в условиях пониженных температур время, необходимое для полного охлаждения образца до его испытания, при заданной температуре было установлено равным 20 мин на 1 мм его толщины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вопрос об интенсивности влияния низких климатических температур на сохранение стабильности механических свойств ПКМ является основным вопросом, который должен уточнить принципиальную возможность использования ПКМ в условиях Арктического и Субарктического регионов РФ, где число дней с отрицательной (ниже 0 °С) температурой может достигать до 200 – 240 дней в году.

Представленные результаты испытаний механических свойств являются средними значениями результатов испытаний серии из пяти образцов. Отклонение результатов испытаний внутри одной серии не превышало 8–10 %. Материал ПКМ практически не имеет площадки текучести, при испытаниях, поэтому, в соответствии с требованиями ГОСТ 56785–2015 при испытаниях на растяжение определялись два основных свойства материалов – предел прочности и относительное удлинение при разрушении.

Как следует из приведенных результатов механическая прочность ПКМ растет при понижении температуры, что связано с повышением уровня деформативности материалов [15], а длительная выдержка образцов в камере холода приводит к незначительному снижению их прочностных характеристик и ударной вязкости (таблица 5).

Таблица 5. Механические свойства ПКМ после длительного пребывания в камере холода.

Время выдержки, Т час	Температура испытания Т, °С	Механические свойства		
		σ _в	δ	KCV
		МПа	%	Дж/см ²
0	20	232	2,0	11,9
	-60	265	2,1	11,6
250	20	230	2,0	11,8
	-60	261	2,0	11,4
500	20	227	1,9	11,2
	-60	257	1,0	11,0
1000	20	224	1,8	11,0
	-60	252	1,9	10,7

Было показано, что отношение предела прочности после 1000 часов холодного старения и в исходном состоянии составили 0,94 при нормальной температуре и 0,93 при минус 60 °С; что соответствует данным ряда авторов, в том числе [16,17].

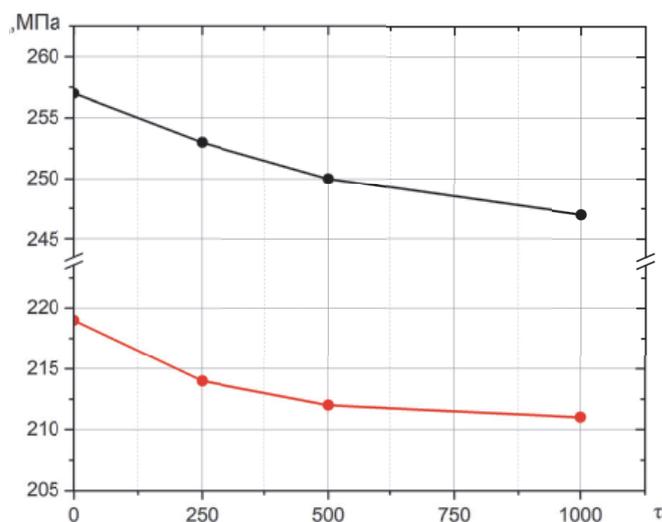


Рисунок 1. Влияние длительного захлаживания (до 100 час) на прочность ПКМ при испытаниях при 20 °С (черная кривая) и минус 60 °С(красная кривая)

Предел прочности образцов составил в исходном состоянии при 20 °С – 232 МПа, при минус 60 °С – 265 МПа; после 1000 часов пребывания в камере холода – 224 и 252 МПа соответственно. Относительное удлинение образцов во всем диапазоне времен и температур испытаний находилось на уровне 1,5–2 % (рисунок 2)

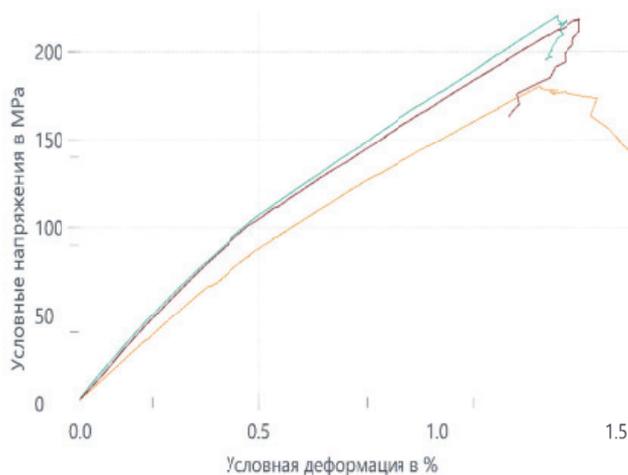


Рисунок 2. Кривые растяжения ПКМ.

Испытания серии из трех образцов в исходном состоянии при температуре 20 °С

Согласно Приложению В СП1613330.2017 буроопускные трубы должны быть отнесены к конструкциям, которые в ходе эксплуатации испытывают сжимающие или сжимающие и изгибающие нагрузки. Поэтому, в ходе выбора материала и технологии изготовления ПКМ-свай и определения их несущей способности ПКМ-свай были проведены испытания на сжатие в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56812–2015. Все испытания были проведены при комнатной температуре. Результатами исследований установлено, что средние значения предела прочности при сжатии в исходном состоянии составляют – 370 МПа, после выдержки 1000 часов при температуре минус 60 °С 352 МПа. Вид диаграмм сжатия образцов приведен на рисунке 3. Для примера, там же приведены кривые сжатия стеклопластиковых образцов, показавших более низкие результаты, средние значения которых составили 272 и 254 МПа.

Анализируя полученные результаты, представляется возможным утверждать, что все испытанные образцы обладают свойством линейной упругости вплоть до разрушения во всем температурном диапазоне испытаний, а длительное нахождение исследуемых ПКМ в зоне критически низких температур незначительно сказывается на их прочностных свойствах, достаточно легко прогнозируются и могут быть с высокой степенью достоверности учтены при проведении прочностных расчетов и проектировании конструкций, эксплуатация которых планируется в зонах с экстремально низкими климатическими температурами.

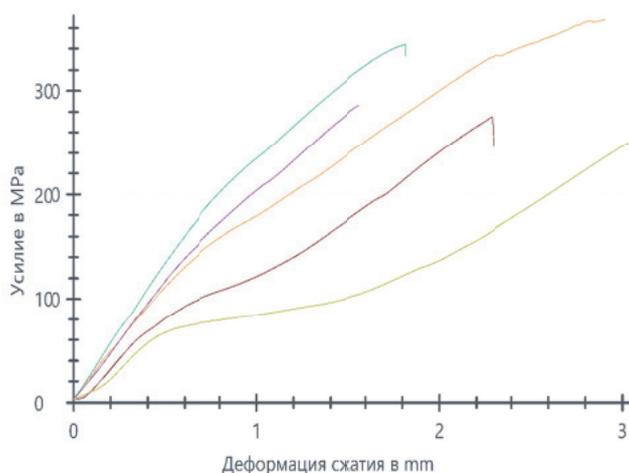


Рисунок 3. Диаграммы сжатия образцов базальтопластика

(коричневая кривая – исходное состояние $\sigma_{в}^c = 368$ МПа и синяя после низкотемпературной выдержки – 344 МПа) и стеклопластика (красная и сиреневая кривые в исходном состоянии – 275 и 286 МПа и желтая кривая после низкотемпературной выдержки – 255 МПа)

Учитывая, что срок эксплуатации оборудования может достигать 100 и более тысяч часов представляется возможным предварительно оценить потери работоспособности ПКМ в ходе их длительного пребывания в условиях низких климатических температур. На рисунке 1 были

приведены кривые изменения предела прочности ПКМ. Как следует из вида кривых – изменение прочности имеет слабовыраженный, приближенный к линейному характер, что позволяет предположить, что потеря прочности материала в течение эксплуатации 100 тыс. час при низких климатических температурах не должна составить более 20–25%. С целью уточнения механизма разрушения образцов после статического и динамического нагружения были проведены фрактрографические исследования изломов. Анализ изломов образцов позволил утверждать, что в ходе разрушения протекают два процесса – собственно разрушение волокон и выкрашивания матрицы, при этом поверхности разрушения волокон, в основном, перпендикулярны оси волокна – разрушение протекает по механизму отрыва. Также были обнаружены отдельные волокна (не более 5% от общего числа в зоне видимости излома) разрушенные по механизму среза)

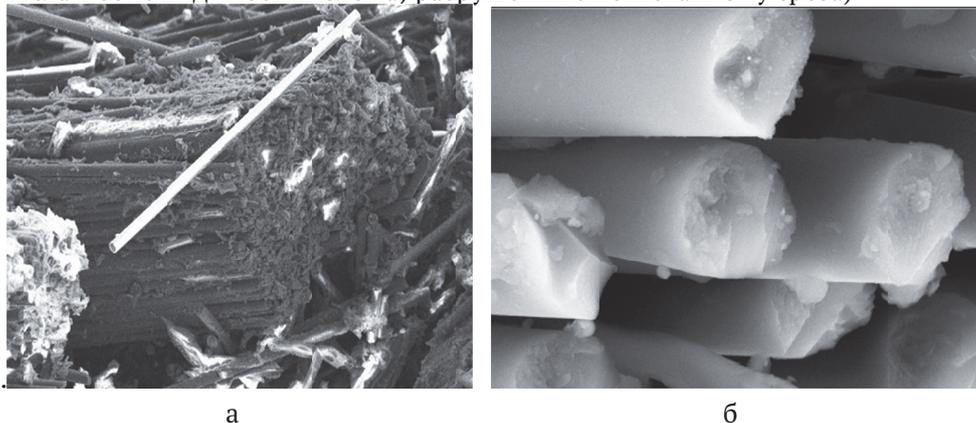


Рисунок 4. Изломы образцов после выдержки при минус 60°C – 1000 часов.
Увеличения: а– х1000; б – х8000.

Было установлено, что поверхности изломов всех исследованных имеют глубоко проработанный рельеф, на котором отчетливо видны участки зарождения и роста трещины, а также участки долома. Между жгутами волокон были обнаружены значительные пустоты (см. например, рисунок 4б), вероятно связанные с выкрашиванием смолы-основы. В поверхностях разрушения значительную долю занимают участки материала наполнителя. Анализ поверхностей разрушения при малых (до 1000 крат увеличениях) позволил определить еще одну особенность разрушения образцов – в зоне разрушения нарушена упорядоченность расположения жгутов волокон ткани, укладка и регулярность волокон, что может быть связано с особенностями их изготовления, что отчетливо видно на рисунке 4а.

Таким образом, показано, что разрушение образцов ПКМ после статических и динамических испытаний зависит только от температуры испытания. При 20 °C разрушение волокон протекает по двум механизмам – отрыва и среза при -60 °C – в основном – по механизму отрыва. Волокна в структуре ПКМ разрушаются без видимых следов деформации, эпоксидная матрица хрупко выкрашивается из зоны разрушения. Влияние холодного старения на механизм разрушения ударных образцов и образцов после статического растяжения – не обнаружено. Разрушение базальтовых волокон – хрупкое, по мере увеличения времени холодного старения отмечается возросшее число сколов на разрушенных волокнах.

К числу особенностей Арктической и Субарктической климатических зон относится длительный период с разнонаправленным температурным фоном в дневное и ночное время. Если в дневные часы температура окружающей среды под воздействием солнечной радиации прогревается до положительных температур, то в ночные часы возможно значительное понижение температуры. Поэтому, для подтверждения работоспособности ПКМ в этих климатических зонах было необходимо провести исследования свойств материалов при многократных знакопеременных тепловых нагрузках. Число циклов перехода через ноль зависит от климатической зоны и в условиях Арктического и Субарктического климатических поясов может достигать в год 50 и более раз. Так, например, в Якутске среднее число годовых переходов через ноль достигает 54 [3].

При проведении исследований, имитирующих влияние циклических изменений температуры эксплуатации - «перехода через ноль» образцы помещали в климатическую камеру (минус 60 °C), выдерживали при этой температуре в течение 150 мин., а затем разогревали на открытом воздухе при комнатной температуре также в течение 150 мин. Число перемещений образцов в климатическую камеру и на открытый воздух всего составило 250 циклов. Лак наносился методом напыления на все поверхности образцов как на рабочие части, так и на головки, так чтобы предотвратить попадание жидкости через любой механический рез. В таблице 6 приведены данные о влиянии теп-

ло-влажностного климатического фактора на механические свойства образцов ПКМ. В ходе испытаний было зарегистрировано значительное снижение прочности и ударной вязкости по мере увеличения числа циклического теплового воздействия. Учитывая, этот факт такие же испытания были повторены на образцах с защитным покрытием - нанесенным на поверхность образцов водоотталкивающим лаком ЭП-730.

Таблица 6. Влияние термоциклирования на механические свойства ПКМ

Число циклов	Механические свойства							
	без защитного покрытия				с водоотталкивающим покрытием			
	20 °С		- 60 °С		20 °С		- 60 °С	
	б _в	δ	KCV		б _в	δ	KCV	
	МПа	%	Дж/см ²		МПа	%	Дж/см ²	
0	232	2,0	11,9	11,6	232	2,0	11,9	11,6
100	207	1,5	8,5	8,0	225	1,9	12,0	11,4
150	174	1,1	5,9	5,4	221	1,7	11,7	11,1
250	156	0,7	4,1	3,9	213	1,4	11,3	10,5

Как следует из приведённых данных переходы через ноль оказывают существенное влияние на прочностные свойства и пластичность и вязкость ПКМ. Установлено, что с увеличением числа циклов переходов через ноль прочностные свойства, пластичность и ударная вязкость ПКМ снижаются. Наиболее вероятной причиной такого воздействия может быть накопление влаги в поверхностных слоях образцов, образование водонасыщенных кластеров, приводящих к появлению дополнительных внутренних напряжений, разрушению полимерной матрицы с разрывом нитей и образованию в поверхностном слое пор, количество и величина которых растет с увеличением числа циклов переходов через ноль (рисунок 5), вызванных различиями в плотности и объеме жидкой и кристаллической водонасыщенных фаз, что, в частности, хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [18,19].

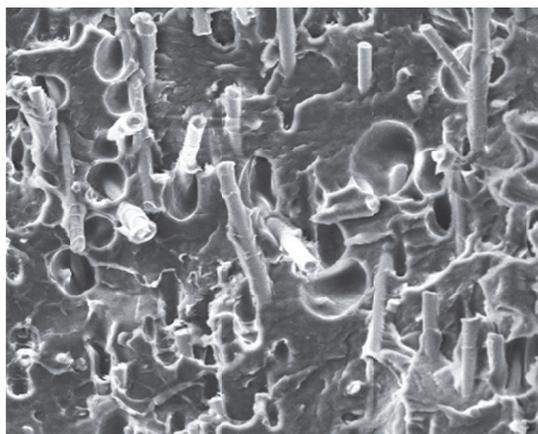


Рисунок 5. Поры в изломе образцов без защитного покрытия. Увеличение x 1000

Таким образом, для обеспечения работоспособности, надежности и долговечности изделий из ПКМ, которые планируется эксплуатировать в условиях Арктического и Субарктического регионов необходимо выполнить операции по защите поверхности конструкций от термо-влажностного воздействия и разработать технологию качественного нанесения защитных лаков и метод неразрушающего контроля качества нанесенного защитного покрытия.

Анализ влияния поверхностных осадков (дождя, инея, росы) на свойства ПКМ, выполненный в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51369–99 не выявил сколь-нибудь значимого влияния этих факторов.

Учитывая, засоленность грунтов Арктического и Субарктического регионов были проведены исследования влияния повышенного уровня солей в воздухе и грунте на качество и работоспособность ПКМ после длительной выдержки образцов в условиях сред с повышенным уровнем NaCl. Испытания были проведены в камере соляного тумана в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.2.5–2013. При испытаниях был использован метод 215–1 — непрерывное воздействие соляного тумана, а именно метод 215-1.2 — испытание стандартных образцов в условиях агрессивности (по осаждению солей), идентичных номинальным эксплуатационным условиям, нормированным для групп условий агрессивности ХОЗ. В соответствии с п. 5.1.2.2 стандарта общая продолжительность испытания составляла 24, 48, 96, 240, 480 и 720 часов, что полностью укладывалось в рекомендуемую линейку длительности испытаний. В качестве испытательной среды был выбран нейтральный соляной туман (метод 215–1.2.1). Результаты испытаний приведены в таблице 7. Было показано, что пребывание в соляном тумане достаточно резко снижает весь комплекс механических свойств ПКМ, однако, в отличие от термоциклического воздействия среды (таблица 6), влияние соляного тумана на механические свойства ПКМ нелинейно и постепенно, по мере увеличения срока воздействия, ослабевает. Так, при нахождении образцов в камере соляного тумана в первые ~100 часов нахождения в агрессивной среде, прочность материала снижается на ~21%. В дальнейшем - при увеличении времени пребывания образцов в соляном тумане до 720 часов снижение прочности составляет около 25 %. Защитное покрытие образцов лаком ЭП-730.значительно снижает негативное влияние соляного тумана

Таблица 7. Влияние времени нахождения в атмосфере соляного тумана на механические свойства ПКМ

Время выдержки, Т, час	без защитного покрытия				с водоотталкивающим покрытием					
	стеклопластик, вакуумная инфузия									
	20 °С				- 60 °С		20 °С		- 60 °С	
	Б _в	δ	KCV		Б _в	δ	KCV			
	МПа	%	Дж/см ²		МПа	%	Дж/см ²			
базальтопластик, намотка										
0	232	2,0	11,9	11,6	232	2,0	11,9	11,6		
24	199	1,6	9,7	9,2	231	2,0	11,4	11,1		
96	184	1,3	7,7	7,5	227	1,9	11,3	10,9		
480	180	1,1	7,4	7,0	223	1,9	11,2	10,6		
720	177	0,7	7,0	6,7	221	1,8	11,0	10,6		

Полученные результаты испытаний указывают, что наиболее значимыми факторами снижения механических свойств ПКМ в ходе их длительного пребывания в климатических условиях Арктического и Субарктического климатических поясов являются переходы через ноль, когда влага насыщает поверхностные дефекты (поры, несплошности, риски) на поверхности изделий с образованием влагонасыщенных фаз и образования зон с повышенными внутренними напряжениями и воздействие влажного морского воздуха и грунтов с повышенным содержанием соли. Для защиты ПКМ от действия этих факторов необходимо проводить обработку поверхности изделий гидрофобно-адгезионными составами, отталкивающими воду [19].

Защитное воздействие покрытия наблюдается вплоть до образования на поверхности ПКМ-конструкций механических дефектов покрытий или других видов его повреждений. В ходе исследований был выполнен анализ влияния таких дефектов на механические свойства ПКМ с нанесенным защитным покрытием. С этой целью на рабочую часть образцов были нанесены риски глубиной до основного тела образца (с полным удалением защитного покрытия в зоне риски).

Риски наносились параллельно направлению нагрузки и перпендикулярно ей. Длина параллельной риски была равна длине рабочей части образца тип 2 ГОСТ 32656–2017 и составляла 50 мм, ширина 2 мм; перпендикулярной – через всю ширину рабочей части образца на расстоянии ½ от его обоих концов, ширина – 2 мм, глубина – по тела основного материала. Перпендикулярные риски наносились на обе поверхности b₁ рабочей части образца (рисунок 6).

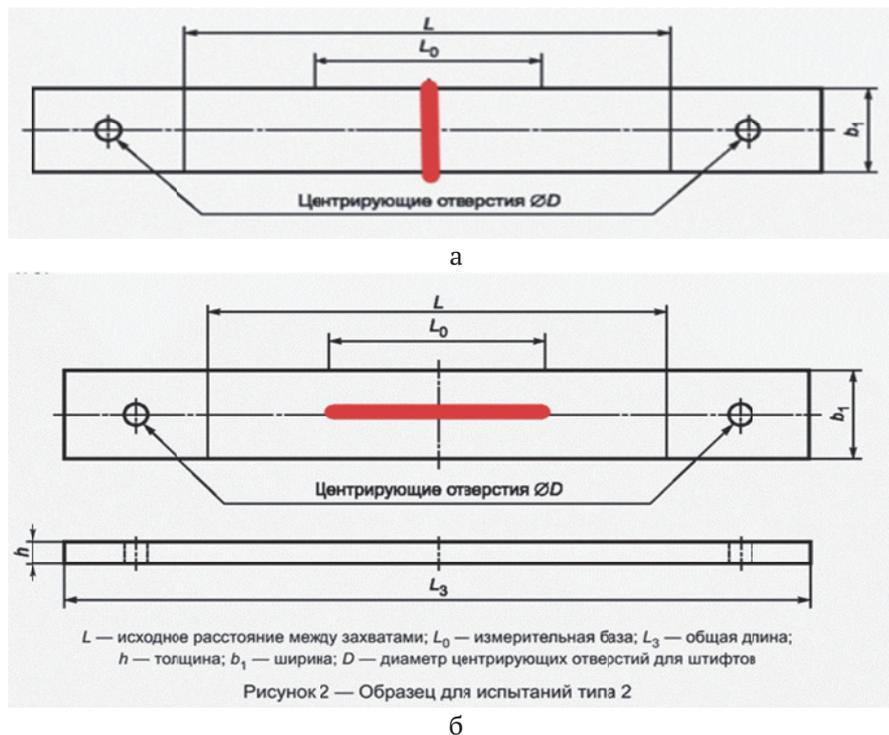


Рисунок 6. Схема нанесения рисков на рабочие части образцов:
а - поперечная риска, б - продольная риска, образцы тип 2 ГОСТ 32656–2017 [6]

Так как целью нанесения рисков являлась имитация нарушения сплошности защитных покрытий в ходе эксплуатации оборудования, риски на рабочие части образцов наносились после того, как образцы с покрытием уже отстояли часть времени (или циклов) в испытательном стенде. Для испытаний на воздействие термоциклических нагрузок – после 100 циклов имитации воздействия; для испытаний в соляном тумане – после 24 часов экспозиции. Результаты испытаний приведены в таблице 8.

Таблица 8. Влияние дефектов покрытий на механические свойства ПКМ

Число циклов / время, час	Температура, °С	Вид воздействия					
		Т/циклы	Соль	Т/циклы	Соль	Т/циклы	Соль
		Без покрытия		Покрытие		Покрытие с риской ¹⁾	
		Предел прочности, МПа					
100/24	20	207	199	232	231	232	231
	-60	242	234	260	257	260	257
		Нанесение риски					
125/48	20	186	194	231	229	205/198	214/211
	-60	234	227	254	255	241/223	243/239
150/120	20	174	181	225	227	201/187	210/207
	-60	219	216	250	254	241/234	238/230
200/480	20	165	180	218	222	189/184	200/204
	-60	207	209	247	251	229/219	228/219
250/720	20	156	169	213	221	167/160	191/184
	-60	174	197	241	250	201/187	220/208

1) В числителе риска параллельно нагрузке, в знаменателе перпендикулярно нагрузке

На основании проведенных исследований было установлено, что возникновение незащищенных покрытием зон приводит к резкому снижению механических свойств под термоциклическим воздействием и воздействием соляного тумана, что должно быть учтено при проектировании ПКМ-конструкций (особенно в местах их соединений) и при проведении ремонтных работ. Также в технологической инструкции об эксплуатации таких объектов необходимо предусмотреть постоянно-периодический визуально-измерительный контроль объектов для своевременного выявления возникающих дефектов и своевременного восстановления защитных покрытий.

ВЫВОДЫ

1. Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий требует учета дополнительного фактора – опасность разрушения. При проведении ФМЕА удалось решить комплексную задачу по описанию факторов риска влияющих на эксплуатацию ПКМ.

2. Показано, что длительное пребывание ПКМ в низкотемпературной области не приводит к катастрофическому снижению их прочности и ударной вязкости. По результатам исследований представляется возможным оценить потери прочности ПКМ на базе 100 тыс. часов низкотемпературной эксплуатации на уровне 20–25%.

3. Разрушение образцов ПКМ после статических и динамических испытаний зависит только от температуры испытания. При 20 °С разрушение волокон протекает по двум механизмам – отрыва и среза при -60 °С – в основном – по механизму отрыва. Волокна в структуре ПКМ разрушаются без видимых следов деформации, эпоксидная матрица хрупко выкрашивается из зоны разрушения. Влияния холодного старения на механизм разрушения ударных образцов и образцов после статического растяжения – не обнаружено. Разрушение базальтовых волокон – хрупкое, по мере увеличения времени холодного старения отмечено возросшее число сколов на разрушенных волокнах.

4. Анализ результатов испытаний ПКМ позволяет утверждать, что длительное воздействие внешних климатических факторов таких как переходы через ноль и повышенный уровень соли в грунте и воздухе может существенно снизить надежность и работоспособность ПКМ-конструкций. При старении под действием этих климатических факторов ПКМ наблюдается тенденция прогрессирующего необратимого повреждения.

5. Защитные покрытия позволяют минимизировать поверхностные повреждения ПКМ, и, в целом, значительно снизить влияние климатических факторов на деградацию структуры и свойств ПКМ. Однако, при нарушении целостности покрытия деградация свойств ПКМ резко ускоряется, что указывает на необходимость постоянно-периодического контроля его целостности в ходе эксплуатации конструкций и разработке регламента ремонтных работ по восстановлению его целостности.

6. Для подтверждения возможности использования ПКМ для изготовления буроопускных свай в настоящее время выполняются опытно-промышленные исследования их стойкости в коррозионно-агрессивных грунтах различных уровней pH, проводится оценка надежности и долговечности соединений элементов свай в условиях, максимально приближенных к эксплуатации на климатическом полигоне ЯНЦ СО РАН (г. Якутск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серова, Н.А. Транспортная инфраструктура российской Арктики: специфика функционирования и перспективы развития / Н. А. Серова, В. А. Серова // Проблемы прогнозирования. – 2021. – № 2(185). – С. 142-151.
2. Конторович, А.Э. Пути освоения ресурсов нефти и газа российского сектора Арктики / А.Э. Конторович // Вестник РАН. – 2015. – Т. 85. – № 5-6. – С. 420-430.
3. Старцев, О.В. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата / О.В. Старцев, М.П. Лебедев, А.К. Кычкин // Известия Алтайского государственного университета. – 2020. – № 1(111). – С. 41-51.
4. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях / Н.Н. Павлов. – М.: Химия, 1982. – 224 с
5. Бузник, В.М. Материалы для освоения арктических территорий-вызовы и решения / В.М. Бузник, Н.И. Василевич // Лаборатория и производство. – 2020. – № 1. – С. 98-107.
6. Кириллов, В.Н. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата / В.Н. Кириллов, Ю.М. Вапиров, Е.А. Дрозд // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 4(25). – С. 31-38.
7. Московченко, Д. В. Биогеохимические особенности почв бассейна реки Мессояха (Тазовский район Ямало-ненецкого автономного округа) / Д.В. Московченко // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Экология и природопользование. – 2016. – Т.2. – № 2. – С. 8-21.
8. Хренов, В.Я. Почвы криолитозоны Западной Сибири: морфология, физико-химические свойства, геохимия

- / В.Я. Хренов. – Новосибирск: Наука, 2011. – 211с.
7. Ефимов, В.А. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Т.Г. Коренькова, В.Н. Кириллов // Труды ВИАМ. – 2013. – № 1. – С. 5.
 8. Кириллов, В.Н. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ / В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Е.В. Николаев // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – № 4. – С.41-45.
 9. Преснов, О.М. Свая на вечномёрзлом грунте / О.М. Преснов, Л.А. Иванова, С.И. Бычкова, Д.А. Ломова // Экономика и строительство. – 2022. – № 1. – С. 41-45.
 10. Ялыгин, С.А. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай / С.А. Ялыгин, Б. С. Ермаков, А.В. Столяров, Е.Г. Койнов, О.В. Швецов, Н.О. Шапошников, В.О. Токарев, Н.И. Голиков // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9. – №. 1. – С. 173-182.
 11. Долгих, Г.М. Этапы, проблемы и технические решения по строительству оснований на вечномёрзлых грунтах / Г.М. Долгих, С.Н. Окунев, С.П. Вельчев // Сборник материалов Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению. – 2011. – С. 6.
 12. Ruzek R., Behal J. Certification programme of airframe primary structure composite part with environmental simulation // International journal of fatigue. 2009. Т. 31. №. 6. С. 1073-1080.
 13. Кириллов, В.Н. Методика проведения и обработки результатов натуральных испытаний неметаллических материалов / В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007. – № 1. – С. 26-31.
 14. Кириллов, В.Н. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения / В.Н. Кириллов, О.В. Старцев, В.А. Ефимов // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 412.
 15. Медведский, А.Л. Механика деформирования и разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений произвольной формы под действием динамических нагрузок / А.Л. Медведский, М.И. Мартиросов, А.В. Хомченко // Труды МАИ. – 2022. – № 124. – С. 107-146.
 16. Туйсина, Е.Б. Моделирование работы полимерных композиционных материалов в напряженно-деформированном состоянии под воздействием агрессивных сред. Часть 2. Метод прогнозирования долговечности полимеркомпозитной арматуры / Е.Б. Туйсина, А.М. Сулейманов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 2 (48). – С. 255-262.
 17. Блазнов, А.Н. Влияние температуры на прочность базальто- и стеклопластиков / А.Н. Блазнов, В. Ф. Савин, Е. В. Атясова, Ф. И. Бабенко, Ю. Ю. Федоров // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4-2. – С. 154-158.
 18. Власенко, Ф.С. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях / Ф.С. Власенко, А.Е. Раскутин // Труды ВИАМ. – 2013. – № 8. – С. 3.
 19. Корецкая, Л. Структурные изменения неизбежны. Влияние воды на свойства стеклопластиков / Л. Корецкая, Т. Александрова // Полимерные трубы. – 2011. – № 1. – С. 38-41.
 20. Клочков, Ю.С. Развитие метода развертывания функций качества на этапе проектирования продукции / Ю.С. Клочков, Н.О. Коваль // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 4(3) (120). С. 428-436.

ENSURING THE QUALITY OF CONSTRUCTION STRUCTURES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR CLIMATIC CONDITIONS OF THE ARCTIC AND SUBARCTIC BELT

© 2025 S.B. Ermakov

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

In recent decades, the main regions of oil and gas production have become the northern - the most remote regions of the country, characterized by extreme climatic conditions - low temperatures, high levels of humidity, salinity and acidity of soils with virtually no transport infrastructure, which has led to a sharp increase in the cost of delivery, installation, operation and repairs of the main and auxiliary equipment fields, which brings forward new ones - increased requirements for the quality and reliability of machines, mechanisms, and building structures used in the Arctic and Subarctic regions. The requirements for improving the reliability of building structures, reducing the costs of transportation, installation and maintenance make it extremely attractive to use piles, beams, pipes made of polymer composite materials (PCM) in the development of deposits, however, by now there is almost no regulatory and technical framework regulating the operation of PCM products in the northern regions. First, this is due to the insufficient study of the problems of reliability, operability and durability of PCM in conditions of aggressive external exposure to climatic factors, which does not allow us to determine the quality indicators of PCM construction products. In this work, studies have been conducted to reduce the quality of foundation piles made of PCM under the influence of low climatic temperatures in the winter months, multiple temperature transitions through zero, and elevated salt levels in the air and soil. By measuring methods for determining product quality indicators, an assessment of a decrease in product quality under the influence of external geo-climatic factors was carried out and it was shown that the most significant factors affecting the decrease in the quality of PCM building structures are increased salt concentration and the thermocyclic effects of the transition of ambient temperature through zero.

Keywords: polymer composite materials, geo-climatic factors, borehole piles, mechanical properties.

DOI: 10.3713/1990-5378-2025-27-4-82-96

EDN: ENARHF

REFERENCES

1. *Serova, N.A.* Transportnaya infrastruktura rossijskoj Arktiki: specifična funkcionirovaniya i perspektivy razvitiya / *Serova N. A., Serova V. A.* // Problemy pro-gnozirovaniya. – 2021. – № 2(185). – S. 142-151.
2. *Kontorovich, A.E.* Puti osvoeniya resursov nefti i gaza rossijskogo sektora Arktiki / *A.E. Kontorovich* // Vestnik RAN. – 2015. – T. 85. – № 5-6. – S. 420-430.
3. *Starcev, O.V.* Starenie polimernyh kompozicionnyh materialov v usloviyah ekstremal'no holodnogo klimata / *O.V. Starcev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin* // Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2020. – № 1(111). – S. 41-51.
4. *Pavlov N.N.* Starenie plastmass v estestvennyh i iskusstvennyh usloviyah / *N.N. Pavlov*. – M.: Himiya, 1982. – 224 s.
5. *Buznik, V.M.* Materialy dlya osvoeniya arkticheskikh territorij-vyzovy i reshe-niya / *V.M. Buznik, N.I. Vasilevich* // Laboratoriya i proizvodstvo. – 2020. – № 1. – S. 98-107.
6. *Kirillov, V.N.* Issledovanie atmosfernoj stojkosti polimernyh kompozici-onnyh materialov v usloviyah atmosfery teplogo vlazhnogo i umerenno teplogo klimata / *V.N. Kirillov, Yu.M. Vapirov, E.A. Drozd* // Aviacionnye materialy i tekhnologii. – 2012. – № 4(25). – S. 31-38.
7. *Moskovchenko, D.V.* Biogehimicheskie osobennosti pochv bassejna reki Messoyaha (Tazovskij rajon Yamalo-neneckogo avtonomnogo okruga) / *D.V. Moskovchenko* // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekologiya i prirodopol'zovanie. – 2016. – T.2. – № 2. – S. 8-21.
8. *Hrenov, V.Ya.* Pochvy kriolitozony Zapadnoj Sibiri: morfologiya, fiziko-himicheskie svojstva, geohimiya / *V.Ya. Hrenov*. – Novosibirsk: Nauka, 2011. – 211s.
7. *Efimov, V.A.* Issledovanie polimernyh konstrukcionnyh materialov pri voz-dejstvii klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornyh i naturnyh usloviyah / *V.A. Efimov, A.K. Shvedkova, T.G. Koren'kova, V.N. Kirillov* // Trudy VIAM. – 2013. – № 1. – S. 5.
8. *Kirillov, V.N.* Issledovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskie svojstva PKM / *V.N. Kirillov, V.A. Efimov, A.K. Shvedkova, E.V. Nikolaev* // Aviacionnye materialy i tekhnologii. – 2011. – № 4. – S.41-45.
9. *Presnov, O.M.* Svaya na vechnomerzлом grunte / *O.M. Presnov, L.A. Ivanova, S.I. Bychkovskaya, D.A. Lomova* // Ekonomika i stroitel'stvo. – 2022. – № 1. – S. 41-45.
10. *Yalygin, S.A.* Vliyanie poslesvarochnoj termicheskoy obrabotki na ekspluataci-onnye svojstva stali 09G2S, primenyaemoj dlya izgotovleniya buroopusknyh svaj / *S.A. Yalygin, B. S. Ermakov, A.V. Stolyarov, E.G. Kojnov, O.V. Shvecov, N.O. Shaposhnikov, V.O. Tokarev, N.I. Golikov* // PRONEFT. Professional'no o nefti. – 2024. – T. 9. – № 1. – S. 173-182.
11. *Dolgih, G.M.* Etapy, problemy i tekhnicheskie resheniya po stroitel'stvu osno-vanij na vechnomerzlyh gruntah / *G.M. Dolgih, S.N. Okunev, S.P. Vel'chev* // Sbornik ma-terialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii po inzhenernomu merzloto-vedeniyu. – 2011. – S. 6.
12. *Ruzek R., Behal J.* Certification programme of airframe primary structure composite part with environmental simulation // International journal of fatigue. 2009. T. 31. №. 6. S. 1073-1080.
13. *Kirillov, V.N.* Metodika provedeniya i obrabotki rezul'tatov naturnyh ispy-tanij nemetallicheskih materialov / *V.N. Kirillov, V.A. Efimov* // Klei. Germetiki. Tekhnologii. – 2007. – № 1. – S. 26-31.
14. *Kirillov, V.N.* Klimaticheskaya stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti resheniya / *V.N. Kirillov, O.V. Starcev, V.A. Efimov* // Aviacionnye materialy i tekhnologii. – 2012. – № S. – S. 412.
15. *Medvedskij, A.L.* Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya polimernyh kompo-zitov pri nalichii mnozhestvennyh rassloenij proizvol'noj formy pod dejstviem di-namicheskikh nagruzok / *A.L. Medvedskij, M.I. Martirosov, A.V. Homchenko* // Trudy MAI. – 2022. – № 124. – S. 107-146.
16. *Tujsina, E.B.* Modelirovanie raboty polimernyh kompozicionnyh materialov v napryazhenno-deformirovannom sostoyanii pod vozdejstviem aggressivnyh sred. Chast' 2. Metod prognozirovaniya dolgovechnosti polimerkompozitnoj armatury / *E.B. Tujsina, A.M. Sulejmanov* // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2019. – № 2 (48). – S. 255-262.
17. *Blaznov, A.N.* Vliyanie temperatury na prochnost' bazal'to- i stekloplastikov / *A.N. Blaznov, V. F. Savin, E. V. Atyasova, F. I. Babenko, Yu. Yu. Fedorov* // Polzunovskij vestnik. – 2014. – № 4-2. – S. 154-158.
18. *Vlasenko, F.S.* Primenenie polimernyh kompozicionnyh materialov v stroi-tel'nyh konstrukcijah / *F.S. Vlasenko, A.E. Raskutin* // Trudy VIAM. – 2013. – № 8. – S. 3.
19. *Koreckaya, L.* Strukturnye izmeneniya neizbezhny. Vliyanie vody na svojstva stekloplastikov / *L. Koreckaya, T. Aleksandrova* // Polimernye trubyy. – 2011. – № 1. – S. 38-41.
20. *Klochkov, Yu.S.* Razvitie metoda razvertyvaniya funkcij kachestva na etape proektirovaniya produkcii / *Yu.S. Klochkov, N.O. Koval'* // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2024. – T. 26. – № 4(3) (120). S. 428-436.