УДК 539.422.52

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛА ПКМ-СВАЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ГЕО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

© 2026 Д.В. Нечаев[1], Б.С. Ермаков[1], С.Б. Ермаков[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия
[2] Тюменксий индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 11.05.2026

В настоящей работе был проведен анализ наиболее применяемых моделей для прогнозирования усталостной долговечности полимерных композитных материалов с целью оценки изменения предела выносливости материала ПКМ-сваи. Определено, что применение нормализированных кривых усталости позволяет исключить влияние на усталостную долговечность разную прочность волокон и матрицы, их объемную долю и способ производства ПКМ, а также получать кривую усталости по результатам обработки экспериментальных данных «образцов-прототипов», без привлечения результатов по усталостной долговечности опытных образцов. Также при помощи данного метода можно прогнозировать изменение усталостных свойств ПКМ во время эксплуатации зная величину изменения их механических свойств. В результате установлено, что наибольшее влияние на предел выносливости ПКМ-сваи оказывает термоциклическое воздействие, а наименьшее – комплексное воздействие УФ-излучения, положительной температуры и влажности воздуха. При этом защитные покрытия в значительной степени уменьшают данное негативное воздействие внешних гео-климатических факторов.
Ключевые слова: Циклические испытания, ПКМ-свая, Крайний Север, нормализованная кривая усталости, гео-климатические факторы, предел усталостной прочности

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-461-467
EDN: ADSXXX

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композитные материалы (ПКМ) находят все большее применение при возведении промышленной и гражданской инфраструктуры различного назначения [1-3] благодаря высокой удельной прочности и модуля упругости, а также коррозионной и биостойкости [4-6]. Особо эффективно применение конструкций и изделий из ПКМ, с точки зрения экономической целесообразности, на Крайнем Севере за счет снижения затрат на их доставку и монтаж [7]. При этом наиболее материалоемкой статьей расходов при освоении Арктической зоны является свайных фундамент [8]. Таким образом замена стальных и железобетонных свай на ПКМ-сваи является актуальной задачей для данного региона. Однако любое непредвиденное воздействие в ходе установки, воздействие вибраций от сооружений или прочей внешней нагрузки, даже с низкой интенсивностью и продолжительностью, может привести к значительному сокращению срока эксплуатации изделий из ПКМ, в том числе и свай [9, 10]. В связи с этим чрезвычайно важно исследовать закономерности изменения механических свойств ПКМ под воздействием сложных и комбинированных нагрузок, например при циклических, для определения остаточных механических свойств. Кроме того, такие характерные внешние гео-климатические факторы Крайнего Севера как экстремально низкие температуры, УФ-излучение, переходы температуры через 0°С (термоциклы) и высокая влажность воздуха и грунта [11-13] могут снижать предел выносливости ПКМ-сваи за счет деградации структуры материала. Однако проводить усталостные испытания для оценки влияния каждого гео-климатического фактора требует большого объема материальных и финансовых затрат. В связи с этим многие современные исследования посвящены прогнозированию характери-

Нечаев Даниил Валерьевич, инженер-исследователь Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы». E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
Ермаков Борис Сергеевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы». E-mail: ermakov55@bk.ru
Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив ТИУ. E-mail: Ermakovsb@tyuiu.ru

стик сопротивления усталости слоистых ПКМ при наличии ограниченного объема испытаний [14]. Так, в настоящее время для этих целей используются такие модели с использованием различных диаграмм постоянной усталостной долговечности (ДПУД) как асимметричная диаграмма Гудмана; нелинейная асимметричная диаграмма Гербера; колоколообразная диаграмма Харриса; анизоморфные диаграммы Каваи [15-18], а также модели Вейбулла [19], Сендекиа [20] и Итохом [21]. Однако, как показывают результаты работы [14, 15], достичь приемлемой трудоемкости и точности получаемых результатов с применением данных моделей для прогнозирования характеристик сопротивления усталости ПКМ получается далеко не всегда. Поэтому в работе [14] предложен метод определения характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием нормализованных кривых усталости (НКУ). Данный метод позволяет исключить влияние на усталостную долговечность разную прочность волокон и матрицы, их объемную долю и способ укладки ПКМ, а также получать НКУ по результатам обработки экспериментальных данных по усталостной долговечности «образцов-прототипов», без привлечения данных по усталостной долговечности опытных образцов. Таким образом, зная изменение предела прочности ПКМ от воздействия внешних гео-климатических факторов, характерных для Крайнего Севера, и имея результаты по усталостной долговечности «образцов-прототипов», с использование НКУ можно спрогнозировать изменение усталостных свойств ПКМ во время эксплуатации. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка изменения предела выносливости материала ПКМ-свай под воздействием внешних геоклиматических факторов крайнего севера. Для достижения данной цели решали следующие задачи:

1. Определить предел прочности и выносливости материала ПКМ-сваи.
2. Определить применимость нормализованных кривых усталости для прогнозирования предела выносливости материала ПКМ-сваи.
3. Построить нормализованные кривые усталости образцов ПКМ-сваи после моделирования их эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлись образцы прямоугольной формы с шириной измерительной базы 25 мм, вырезанные в осевом направлении по ГОСТ Р 54924-2017 из стеклопластиковой свайной трубы диаметром 219 мм и толщиной стенки 4 мм, изготовленной методом мокрой намотки. Перед проведением усталостных испытаний опытные образцы кондиционировались по ГОСТ 12423 в стандартной атмосфере 23/50, класс 2. Определение предела прочности при осевом растяжении осуществлялось по ГОСТ Р 54924-2017 при нормальной температуре. Испытания на усталость при циклическом растяжении проводилось по ГОСТ Р 57143—2016 с применением метода мягкого нагружения на машине Instron 8801. Частота нагружения равнялась 5 Гц, коэффициент асимметрии 0,1, максимальное напряжение: 80%, 70%, 60%, 50% и 40% от предела прочности. Верхний предел усталостного срока службы принимали равным 2000000 циклов. Уравнение аппроксимации получали при помощи ПО Excel. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости опытных образцов ПКМ осуществлялось с применением аппроксимирующего уравнения Менделла, применяемого для диаграмм постоянной усталостной долговечности (ДПУД) и специального метода прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ с использованием нормализованных кривых усталости (НКУ) [14]. При прогнозировании влияния внешних гео-климатических факторов в уравнение кривой усталости подставляли измененное значение предела прочности ПКМ при растяжении с учетом коэффициента сохраняемости k.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В результате механических испытаний определено, что предел прочности при осевом растяжении опытных образцов стеклопластика ($\sigma_в$) равняется 206,5 МПа. Результаты усталостных испытаний приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

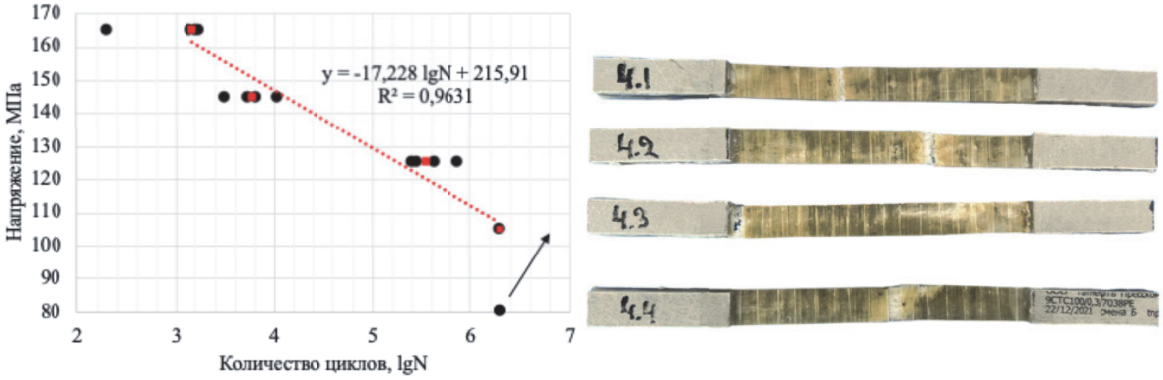
Установлено, что предел выносливости при растяжении для стеклопластиковой свайной трубы находится в диапазоне от 60% (125 МПа) до 50% (105 МПа) от $\sigma_в$. Характерный механизм разрушения для всех образцов можно описать как образование множества трещин типа I вследствие разрушения матрицы вокруг армирующих волокон с последующим отрывом. Также определено, что полученная усталостная диаграмма описывается линейным уравнением Менделла (1) с величиной достоверности аппроксимации 0,9631.

$$\sigma_{max}^{R=0,1} = 215{,}91\text{-}17{,}228 \cdot \lg N. \quad (1)$$

Тогда на основании полученных данных, уравнения кривых усталости Менделла и НКУ при растяжении опытных ПКМ примут следующий вид (таблица 2).

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость при циклическом растяжении

Максимальное напряжение при усталостных испытаниях, МПа	165 (80% от $\sigma_в$)	145 (70% от $\sigma_в$)	125 (60% от $\sigma_в$)	105 (50% от $\sigma_в$)	80 (40% от $\sigma_в$)
Количество циклов до разрушения, шт	1 344	6 524	244 596	2 000 000	2 000 000
	1 491	3 197	421 367	2 000 000	-
	1 568	10 651	742 485	-	-
	201	5 438	278 681	-	-
Медиана количества циклов до разрушения, шт.	1456	5981	35004	-	-



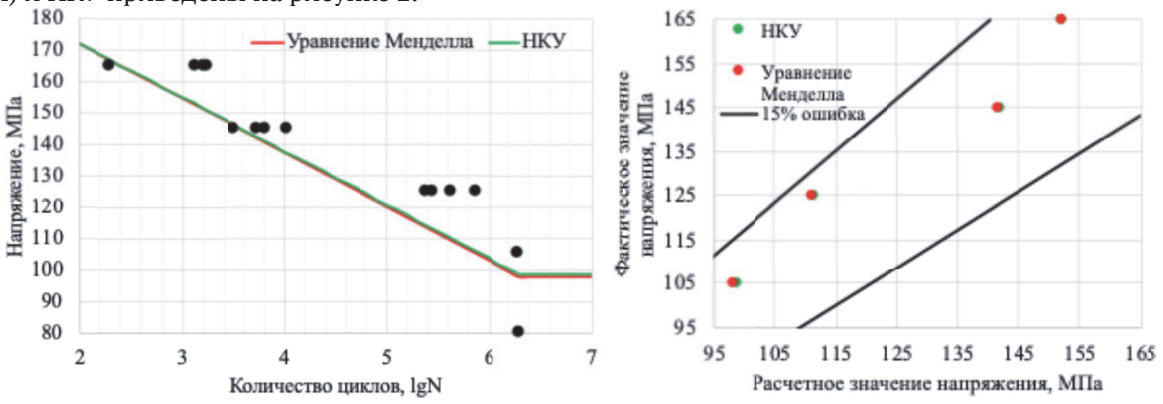
а) б)

Рис. 1. Кривые усталости опытных образцов (а);
характерный внешний вид образцов после испытания (б)

Таблица 2. Уравнения кривых усталости Менделла
и нормализованных кривых усталости при циклическом нагружении

Тип нагружения	Уравнение кривой усталости Менделла	Уравнение нормализованной кривой усталости
Растяжение	σ_{max}= 206,5-17,228·lgN	σ_{max}= (1-0,083·lgN) ·206,5

Результаты расчета оценки сопротивления усталости с использованием уравнения Менделла (УМ) и НКУ приведены на рисунке 2.



а) б)

Рис. 2. Результаты сравнения (а) и соотношение (б)
фактической усталостной прочности и расчетной

Из результатов сравнения видно, что оба метода достаточно точно прогнозируют усталостные свойства стеклопластиковой свайной трубы (величина ошибки не превышает 15%). Так, фактический предел выносливости для опытного материала равен 107,4 МПа, а рассчитанный по УМ и методике НКУ 98 и 98,5 МПа соответственно. Однако использование уравнений Менделла, в отличие

от НКУ, предполагает обязательное наличие кривой усталости рассматриваемых образцов, как минимум, для симметричного цикла нагружения, что делает использование НКУ более предпочтительным для построение прогнозной модели усталостных свойств ПКМ из-за отсутствия необходимости проводить испытания опытных образцов при различных коэффициентах асимметрии, а использовать имеющиеся данные «образцов-прототипов» [14].

Таким образом представляется возможным осуществлять прогноз изменения усталостной долговечности материала ПКМ-свай под воздействием гео-климатических факторов, характерных для Крайнего Севера. Так, в работе [22] определено, что под синергетическим воздействием УФ-излучения, температуры (+45°С) и влажности (90%) аналогичные образцы ПКМ теряют 10% от предела прочности при растяжении за 15 лет эксплуатации в условиях Ямало-Ненецкого АО (данное значение характерно для городов Надым, Новый Уренгой и Ноябрьск при вертикальной южной ориентации ПКМ). В таком случае прогнозная кривая усталости ПКМ под воздействием будет иметь следующих вид (рисунок 3).

По результатам работы [11] было определено, что изменение предела прочности «образцов-прототипов» после испытаний на водопоглощение по ГОСТ 4650-2014 (метод 1) на протяжении 2500 часов с защитным водоотталкивающим лаком ЭП-730 и без него составило 1% и 7% соответственно, что согласно работе [7] равняется 1 году эксплуатации материала ПКМ-сваи в сезонно-талом слое ММГ. При этом стоит учитывать, что сорбционная возможность ПКМ максимальная в начальные период с последующим снижением из-за необходимости обеспечения диффузионного переноса молекул воды во внутренние области материалов [23] до достижения равновесного влагосодержания [24]. Следовательно, и скорость изменения механических свойств ПКМ будет значительно снижаться при увеличении времени нахождения в водонасыщенной среде. Результат расчета изменения кривая усталости стеклопластика под воздействием влаги приведен на рисунке 3.

В работе [25] приведены результаты влияния термоциклического воздействия (переходов температуры через 0°С) на подобные образцы ПКМ. Определено, что после 250 термоциклов, что согласно работе [26] эквивалентно примерно 8,5 годам эксплуатации в условиях Крайнего Севера, опытные образцы ПКМ-сваи без защитного покрытия теряют 26% от предела прочности, а с защитным покрытием – 8%. Прогнозная кривая усталости ПКМ под термоциклическим воздействием приведена на рисунке 3.

В работе [27] определено, что подобный ПКМ теряет порядка 6% под воздействием холодного старения (при температуре -60°С). Результат расчета изменения усталостных свойств под данным воздействием приведен на рисунке 3.

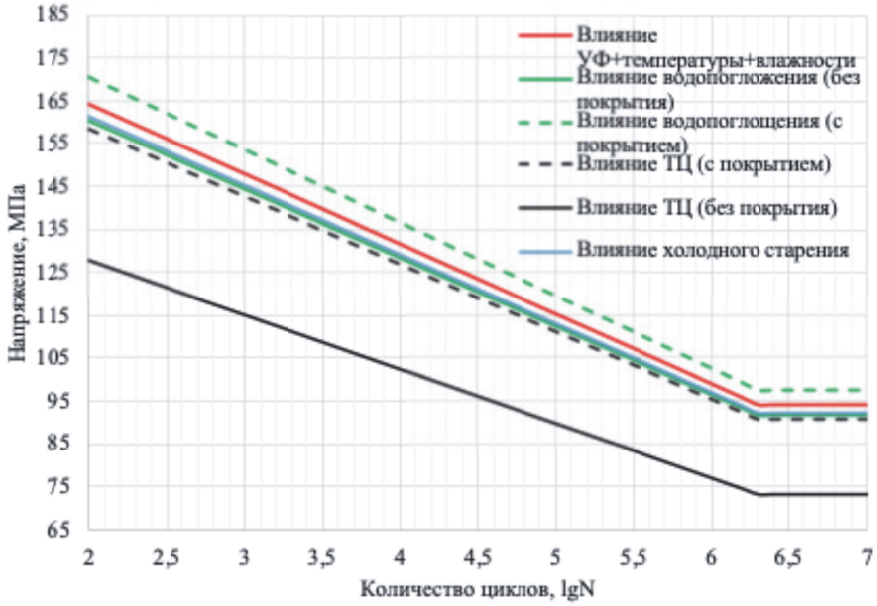


Рис. 3. Влияние воздействия внешних гео-климатических факторов на усталостную долговечность материала ПКМ-сваи

Установлено, что наибольшее влияние на усталостную прочность ПКМ-сваи оказывает термоциклическое воздействие, даже при меньшем сроке эксплуатации ПКМ-сваи, а наименьшее – комплексное воздействие УФ-излучения, положительной температуры и влажности воздуха. При этом защитные покрытия в значительной степени уменьшают данное негативное воздействие внешних гео-климатических факторов. Количественное изменение предела выносливости материала ПКМ-сваи приведены в таблице 3.

Таблица 3. Изменение расчетного предела выносливости материала ПКМ-сваи

	Исходное состояние	Воздействие УФ-излучения, температуры и влажности	Водопоглощение		Термоциклическое воздействие		Холодное старение
			с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия	
Предел выносливости, МПа	98,5	94,0	97,5	91,6	90,7	73,0	92,3

Видно, что предел выносливости материала ПКМ-сваи после термоциклического воздействия снизился на 26%, после холодного старения на 6,3%, а после комплексного воздействия УФ-излучением, температуры и влажности на 4,6%. При этом в работах [28, 29] обнаружен эффект повышения остаточной прочности образцов ПКМ после усталостных испытаний. Авторы связывают это с образованием дополнительных микротрещин в матрице, что приводит к изменению траектории фронта расслоения или его дробления на несколько лучей, что в свою очередь приводит увеличению упругой энергии для страгивания магистрального расслоения. Это в свою очередь означает увеличение таких характеристик ПКМ, как «сопротивление роста трещины» или «скорость высвобождения упругой энергии». Таким образом подобный эффект возможен и при усталостных испытаниях образцов ПКМ после воздействия на них внешних климатических факторов, (например, после воздействия УФ-излучения, термоциклирования и холодного старения), так как причиной деградации их структуры также является процесс микрорастрескивания матрицы, однако для его доказательства необходимо провести дополнительные исследования.

ВЫВОДЫ

В ходе настоящего исследования были проведены испытания стеклопластикового материала буроопускной ПКМ-сваи на усталость при циклическом растяжении и оценены методы прогнозирования характеристик сопротивления слоистых полимерных-композитных материалов. На основания полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Показана возможность использования нормализированный кривых усталости для прогнозирования характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ (величина ошибки данного метода по сравнению с фактическими значениями и рассчитанными с применением уравнения Менделла не превышает 15%), что позволяет использовать данный метод для оценки изменения усталостных свойств во время эксплуатации ПКМ-сваи в условиях Крайнего Севера, без использования фактических усталостных кривых для экспонированных образцов.

2. В результате расчетов определено, что наибольшее влияние на усталостную прочность ПКМ-сваи оказывает термоциклическое воздействие (величина изменения предела выносливости составила 26%), а наименьшее – комплексное воздействие УФ-излучения, положительной температуры и влажности воздуха (величина изменения предела выносливости составила 4,6%). При этом защитные покрытия в значительной степени уменьшают данное негативное воздействие внешних гео-климатических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gao Q., Zhao X., Sun Q.* Off-axis compressive fatigue life prediction and damage characterization of unidirectional glass-fiber reinforced polymer composites // International Journal of Fatigue. 2025. С. 109385.
2. *Wildemann V. et al.* Mechanical properties degradation of fiberglass tubes during biaxial proportional cyclic loading // Polymers. 2023. Т. 15. №. 9. С. 2017.
3. *Garg N. et al.* Research trends in phase change materials (PCM) for high-performance sustainable construction // Materials Today: Proceedings. 2023.
4. *Хозин, В. Г.* Полимеры в строительстве-реальные границы и перспективы эффективного применения / В. Г. Хозин // Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал. – 2014. – №. 1. – С. 9-26.
5. *Iten M., Liu S., Shukla A.* A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Т. 61. С. 175-186
6. *Stepanova M. Y., Baurova N. I.* Analysis of methods for determining the biostability of polymer composite materials used in mechanical engineering // Polymer Science, Series D. 2020. Т. 13. №. 3. С. 345-348.
7. *Швецов, О. В.* Использование полимерных композиционных материалов при строительстве и обустройстве месторождений на многолетнемерзлых грунтах / О. В. Швецов и др. // Глобальная энергия. – 2024. – №. 4. – С. 74-86.
8. *Ялыгин, С. А.* Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай / С. А. Ялыгин и др. // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9. – №. 1. – С. 173-182.

9. *Cheng X. et al.* Prediction of residual mechanical properties in flexure-after-impact of woven composite beams through electrical resistance measurement // Composite Structures. 2020. Т. 240. С. 112066.
10. *Mirbagheri M., Rahmani O., Mirbagheri Y.* Estimation of residual tensile strength of composite laminate after low-velocity impact using visually inspection // Engineering Failure Analysis. 2022. Т. 131. С. 105898.
11. *Ермаков, Б. С.* Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур / Б. С. Ермаков и др. // Горная промышленность. – 2024. – №. S5. – С. 198-203.
12. *Кычкин, А. К.* Измерение и анализ количества циклов «замораживание-оттаивание» эпоксидных стекло- и углепластиков в условиях экстремально холодного климата / А. К. Кычкин, О. В. Старцев, М. П. Лебедев и др. // Южно-Сибирский научный вестник. – 2025. – № 3(61). – С. 129-141.
13. *Гусев, Е. Л.* Применение ИТ-технологий для решения задач прогнозирования долговечности перспективных композиционных материалов в условиях арктической зоны / Е. Л. Гусев, В. Д. Черных// EURASTRENCOLD-2025. – 2025. – №. XII. – С. 284-286.
14. *Стрижиус, В.Е.* Оценка усталостной долговечности слоистых композитов с использованием нормализованных кривых усталости / В. Е. Стрижиус // Материаловедение. Энергетика. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 20а32.
15. *Стрижиус, В. Е.* Особенности диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых композитов / В. Е. Стрижиус //Глобальная энергия. – 2019. – Т. 25. – №. 3. – С. 120-132.
16. *Kawai M.* Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading //Fatigue life prediction of composites and composite structures. Woodhead Publishing. 2020. С. 425-463.
17. *Broer A. A. R.* Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single SN curve // Delft Univer sity of Technology. 2018.
18. *Tofallis C.* A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation // Journal of the Operational Research Society. 2015. Т. 66. №. 8. С. 1352-1362
19. *Weibull W.* The statistical aspect of fatigue failures and its consequences // Fatigue and fracture of metals. 1952. Т. 4. С. 182-196.
20. *D'Amore A., Grassia L.* Comparative study of phenomenological residual strength models for composite materials subjected to fatigue: Predictions at Constant Amplitude (CA) loading // Materials. 2019. Т. 12. №. 20. С. 3398.
21. *Kawai M., Itoh N.* A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature // Journal of composite materials. 2014. Т. 48. №. 5. С. 571-592.
22. *Нечаев, Д. В.* Разработка метода прогнозирования реального срока эксплуатации надземной части свайной полимерной композитной трубы в летний период в условиях Крайнего Севера / Д. В. Нечаев, Б. С. Ермаков, О. В. Швецов // Глобальная энергия. – 2025. – Т. 31. – № 3. – С. 60-73.
23. *Корецкая, Л.* Структурные изменения неизбежны. Влияние воды на свойства стеклопластиков / Л. Корецкая, Т. Александрова // Полимерные трубы. – 2011. – №. 1. – С. 38-41.
24. *Startsev V. O. et al.* Dynamic mechanical and thermomechanical analysis of reversible plasticization of epoxy-diane resin-diaminodiphenylsulfon system by moisture // Polymer Science, Series A. 2017. Т. 59. №. 5. С. 640-648.
25. *Ермаков, Б. С.* Оценка применимости базальтопластиков для обустройства свайного фундамента в условиях Крайнего Севера / Б. С. Ермаков, Д. В. Нечаев, О. В. Швецов, С. А. Вологжанина // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 4(124). – С. 176-187.
26. *Кычкин, А. К.* Измерение и анализ количества циклов «замораживание-оттаивание» эпоксидных стекло- и углепластиков в условиях экстремально холодного климата / А. К. Кычкин, О. В. Старцев, М. П. Лебедев и др. // Южно-Сибирский научный вестник. – 2025. – № 3(61). – С. 129-141.
27. *Ермаков, Б. С.* Эксплуатационные свойства полимерных композиционных материалов в условиях арктического и Субарктического регионов РФ / Б. С. Ермаков, О. В. Швецов // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений : Сборник тезисов VII научно-технической конференции, Томск, 24–25 сентября 2024 года. – Томск: АО «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа». 2024. – С. 224-230.
28. *Богомолова А. Д.* Исследование усталостной прочности слоистых полимерных композиционных материалов с учетом повреждений / Богомолова А. Д., Пальчиков Д. С. // Труды МАИ. – 2024. – № 138. – С. 5.
29. *Nettles A. T.* Damage tolerance of composite laminates from an empirical perspective. 2010. №. M10-0244.

ASSESSING CHANGES IN THE FATIGUE LIFE OF PCM-PILES UNDER THE INFLUENCE OF GEO-CLIMATIC FACTORS IN THE FAR NORTH

© 2026 D.V. Nechaev[1], B.S. Ermakov[1], S.B. Ermakov[2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
[2] Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

This article analyzes the most commonly used models for predicting the fatigue life of polymer composite materials to assess changes in the fatigue limit of PCM-piles. It was determined that the use of normalized fatigue curves eliminates the influence of differences in fiber and matrix strength, their volume fraction, and the polymer composite manufacturing method on fatigue life. It also allows for the generation of a fatigue curve based on experimental data from prototype samples, without relying on fatigue life data from test specimens. This method also allows for predicting changes in the fatigue properties of polymer composites during operation, given the magnitude of changes in their mechanical properties. It was found that thermal cycling has the greatest impact on the fatigue limit of polymer composite piles, while the combined effects of UV radiation, positive temperature, and air humidity have the least impact. Protective coatings significantly reduce this negative impact of external geoclimatic factors.

Keywords: Cyclic testing, PCM pile, Far North, normalized fatigue curve, geo-climatic factors, fatigue strength limit.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-461-467
EDN: ADSXXX

REFERENCES

1. *Gao Q., Zhao X., Sun Q.* Off-axis compressive fatigue life prediction and damage characterization of unidirectional glass-fiber reinforced polymer composites // International Journal of Fatigue. 2025. S. 109385.
2. *Wildemann V. et al.* Mechanical properties degradation of fiberglass tubes during biaxial proportional cyclic loading // Polymers. 2023. T. 15. №. 9. S. 2017.
3. *Garg N. et al.* Research trends in phase change materials (PCM) for high-performance sustainable construction // Materials Today: Proceedings. 2023.
4. *Hozin, V. G.* Polimery v stroitel'stve-real'nye granicy i perspektivy effektivnogo primeneniya / V. G. Hozin // Polimery v stroitel'stve: nauchnyj Internet-zhurnal. – 2014. – №. 1. – S. 9-26.
5. *Iten M., Liu S., Shukla A.* A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. T. 61. S. 175-186
6. *Stepanova M. Y., Baurova N. I.* Analysis of methods for determining the biostability of polymer composite materials used in mechanical engineering // Polymer Science, Series D. 2020. T. 13. №. 3. S. 345-348.
7. *Shvecov, O. V.* Ispol'zovanie polimernyh kompozicionnyh materialov pri stroitel'stve i obustrojstve mestorozhdenij na mnogoletnemerzlyh gruntah / O. V. Shvecov i dr. // Global'naya energiya. – 2024. – №. 4. – S. 74-86.
8. *Yalygin, S. A.* Vliyanie poslesvarochnoj termicheskoj obrabotki na ekspluatacionnye svojstva stali 09G2S, primenyaemoj dlya izgotovleniya buroopusknyh svaj / S. A. Yalygin i dr. // PRONEFT'. Professional'no o nefti. – 2024. – T. 9. – №. 1. – S. 173-182.
9. *Cheng X. et al.* Prediction of residual mechanical properties in flexure-after-impact of woven composite beams through electrical resistance measurement // Composite Structures. 2020. T. 240. S. 112066.
10. *Mirbagheri M., Rahmani O., Mirbagheri Y.* Estimation of residual tensile strength of composite laminate after low-velocity impact using visually inspection // Engineering Failure Analysis. 2022. T. 131. S. 105898.
11. *Ermakov, B. S.* Vliyanie vodoottalkivayushchego pokrytiya na rabotosposobnost' konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov v usloviyah ekstremal'no nizkih temperatur / B. S. Ermakov i dr. // Gornaya promyshlennost'. – 2024. – №. S5. – S. 198-203.
12. *Kychkin, A. K.* Izmerenie i analiz kolichestva ciklov «zamorazhivanie-ottaivanie» epoksidnyh steklo- i ugleplastikov v usloviyah ekstremal'no holodnogo klimata / A. K. Kychkin, O. V. Starcev, M. P. Lebedev i dr. // Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik. – 2025. – № 3(61). – S. 129-141.
13. *Gusev, E. L.* Primenenie IT-tekhnologij dlya resheniya zadach prognozirovaniya dolgovechnosti perspektivnyh kompozicionnyh materialov v usloviyah arkticheskoj zony / E. L. Gusev, V. D. Chernyh// EURASTRENCOLD-2025. – 2025. – №. XII. – S. 284-286.
14. *Strizhius, V.E.* Ocenka ustalostnoj dolgovechnosti sloistyh kompozitov s ispol'zovaniem normalizovannyh krivyh ustalosti / V. E. Strizhius // Materialovedenie. Energetika. – 2020. – T. 26. – № 3. – S. 20a32.
15. *Strizhius, V. E.* Osobennosti diagramm postoyannoj ustalostnoj dolgovechnosti sloistyh kompozitov / V. E. Strizhius //Global'naya energiya. – 2019. – T. 25. – №. 3. – S. 120-132.
16. *Kawai M.* Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading //Fatigue life prediction of composites and composite structures. Woodhead Publishing. 2020. S. 425-463.
17. *Broer A. A. R.* Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single SN curve // Delft Univer sity of Technology. 2018.
18. *Tofallis C.* A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation // Journal of the Operational Research Society. 2015. T. 66. №. 8. S. 1352-1362
19. *Weibull W.* The statistical aspect of fatigue failures and its consequences // Fatigue and fracture of metals. 1952. T. 4. S. 182-196.
20. *D'Amore A., Grassia L.* Comparative study of phenomenological residual strength models for composite materials subjected to fatigue: Predictions at Constant Amplitude (CA) loading // Materials. 2019. T. 12. №. 20. S. 3398.
21. Kawai M., Itoh N. A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature // Journal of composite materials. 2014. T. 48. №. 5. S. 571-592.
22. *Nechaev, D. V.* Razrabotka metoda prognozirovaniya real'nogo sroka ekspluatacii nadzemnoj chasti svajnoj polimernoj kompozitnoj truby v letnij period v usloviyah Krajnego Severa / D. V. Nechaev, B. S. Ermakov, O. V. Shvecov // Global'naya energiya. – 2025. – T. 31. – № 3. – S. 60-73.
23. *Koreckaya, L.* Strukturnye izmeneniya neizbezhny. Vliyanie vody na svojstva stekloplastikov / L. Koreckaya, T. Aleksandrova // Polimernye truby. – 2011. – №. 1. – S. 38-41.
24. *Startsev V. O. et al.* Dynamic mechanical and thermomechanical analysis of reversible plasticization of epoxy-diane resin-diaminodiphenylsulfon system by moisture // Polymer Science, Series A. 2017. T. 59. №. 5. S. 640-648.
25. *Ermakov, B. S.* Ocenka primenimosti bazal'toplastikov dlya obustrojstva svajnogo fundamenta v usloviyah Krajnego Severa / B. S. Ermakov, D. V. Nechaev, O. V. Shvecov, S. A. Vologzhanina // Voprosy materialovedeniya. – 2025. – № 4(124). – S. 176-187.
26. *Kychkin, A. K.* Izmerenie i analiz kolichestva ciklov «zamorazhivanie-ottaivanie» epoksidnyh steklo- i ugleplastikov v usloviyah ekstremal'no holodnogo klimata / A. K. Kychkin, O. V. Starcev, M. P. Lebedev i dr. // Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik. – 2025. – № 3(61). – S. 129-141.
27. *Ermakov, B. S.* Ekspluatacionnye svojstva polimernyh kompozicionnyh materialov v usloviyah arkticheskogo i Subarkticheskogo regionov RF / B. S. Ermakov, O. V. Shvecov // Tekhnologii obustrojstva neftyanyh, gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij : Sbornik tezisov VII nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Tomsk, 24–25 sentyabrya 2024 goda. – Tomsk: AO \"Tomskij nauchno-issledovatel'skij i proektnyj institut nefti i gaza\". 2024. – S. 224-230.
28. *Bogomolova A. D.* Issledovanie ustalostnoj prochnosti sloistyh polimernyh kompozicionnyh materialov s uchetom povrezhdenij / Bogomolova A. D., Pal'chikov D. S. // Trudy MAI. – 2024. – № 138. – S. 5.
29. *Nettles A. T.* Damage tolerance of composite laminates from an empirical perspective. 2010. №. M10-0244.

Daniil Nechaev, Research Engineer, Scientific and Technological Complex «New Technologies and Materials.»
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
Boris Ermakov, Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, Scientific and Technological Complex «New Technologies and Materials.» E-mail: ermakov55@bk.ru
Sergey Ermakov, Candidate of Engineering Sciences, Director of the Center for Technological Initiatives at Tyumen University.
E-mail: Ermakovsb@tyuiu.ru