

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31

^{1,2,*}Сыромятникова А.С., ²Местников А.Е., ²Сыромятников Д.И., ²Дорофеев М.А.¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

*E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛЬДА

Аннотация. В условиях арктических и северных регионов одними из перспективных строительных материалов можно рассматривать лед и снег. Это обосновывается их доступностью, простотой обработки, экологической безопасностью, отсутствием необходимости утилизации после завершения срока службы. Однако, лед имеет недостаточную прочность и проявляет высокую хрупкость, что ограничивает его широкое применение в этом качестве. Одним из эффективных методов повышения прочности льда является его армирование. Среди различных армирующих материалов базальтовые волокна выделяются благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам и экологичности. В рамках исследования рассмотрены перспективы применения ледового материала, усиленного дискретными базальтовыми волокнами, – фиброльда. Рассчитывались структурные параметры наполнителя, а также прочностные характеристики фиброльда в зависимости от содержания волокон. Результаты прогнозирования свойств фиброльда продемонстрировали, что использование базальтовых волокон в качестве армирующего компонента позволяет увеличить прочность пресного льда на изгиб в 2–3 раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик фиброльда в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям. Кроме того, базальтовые волокна являются экологически безопасным материалом: их химический состав идентичен природному сырью, а при использовании композита в качестве ледового покрытия они не образуют вредных донных отложений после таяния. Полученные результаты указывают на перспективность применения фиброльда в качестве эффективного и экологичного материала для строительства, в частности, для создания ледовых переправ и других временных конструкций в условиях холодного климата.

Ключевые слова: лед, упрочнение, волокна базальта, фибролед, прочностные свойства, химический состав, толщина донного отложения

Введение. За последние десятилетия наблюдается растущий интерес к Арктике, что связано с вопросами национальной безопасности, разработки минеральных и углеводородных ресурсов, а также с возможностью организации круглогодичного транспортного сообщения по Северному морскому пути. Понятно, что одним из необходимых условий освоения Арктики является наличие материалов, которые могут сохранять эксплуатационные свойства в холодном климате. Еще одно требование к таким материалам – учет незащищенности северной природы к антропогенному воздействию и стремление к минимизации экологических рисков.

Арктическая зона Российской Федерации отличается сложными условиями доступа, отсутствием круглогодичной наземной транспортной инфраструктуры и полной зависимостью объектов жизнеобеспечения и населения от северного завоза. Таким образом, ключевым условием активного освоения северных и арктических территорий является развитие на них дорожной инфраструктуры. В этих условиях особенно важно использовать местные, экономически эффективные

и экологически безопасные материалы для строительства различных объектов и дорожного строительства, включая ледовые переправы.

В Республике Саха (Якутия) ледовые переправы работают пять месяцев в году, а паромные переправы доступны только в летне-осенний период. Таким образом, три-четыре месяца в году большая часть Якутии остается без транспортного сообщения. Поэтому продление сроков эксплуатации ледовых переправ становится жизненно важным для северных и арктических регионов.

В условиях арктических и северных регионов одними из наиболее перспективных строительных материалов можно рассматривать лед и снег. Это обосновывается их доступностью, простотой обработки, экологической безопасностью, отсутствием необходимости утилизации после завершения срока службы. Однако, несмотря на эти преимущества, лед имеет недостаточную прочность и проявляет высокую хрупкость при отрицательных температурах, что ограничивают широкое применение льда в этом качестве. Известно, что эффективным методом повышения прочности льда является его армирование: макроскопическое (деревянные жерди, настилы и

другие конструкции, тросы из стали и других материалов, геосинтетические материалы), микроскопическое и способ химического модифицирования (поливиниловый спирт, высокомолекулярные соединения). Микроскопический подход заключается в упрочнении ледяной матрицы с помощью различных типов дисперсных [1–3] и волокнистых наполнителей [4–8], а также природных наполнителей растительного [9] и минерального происхождения [10–13].

Предварительные исследования показали, что наиболее эффективными волокнистыми наполнителями в ледовой матрице являются базальтовые материалы, которые характеризуются высокими физико-механическими характеристиками, повышенной химической и биологической стойкостью, экологичностью, долговечностью, отличаются эффективными эксплуатационными свойствами в широком диапазоне температур, доступностью и невысокой стоимостью [12, 13]. Одним из преимуществ базальтовых волокон для армирования льда является их высокая смачиваемость водой, что превосходит аналогичные показатели волокон из полимерных материалов. Угол смачивания базальтового материала даже ниже, чем у стеклянных и углеродных волокон. Базальтовые волокна также показывают отличные эксплуатационные характеристики в условиях низких температур, что делает их особенно подходящими для использования в холодном климате.

Лед с добавлением наполнителей является композиционным материалом, состав, форму и распределение компонентов которого можно запроектировать заранее. Целью проведенных исследований стало проектирование структуры и свойств ледового материала, армированного хаотично расположенными дискретными волокнами базальта – фиброльда. Для этого были выполнены расчеты механических характеристик фиброльда с позиций механики композиционных материалов и проведено их сравнение с экспериментальными результатами, полученными авторами в ходе изучения прочностных характеристик композиционного материала на основе льда с содержанием до 6 % (мас.) базальтовых волокон [12]. Кроме того, с целью уточнения экологических аспектов использования базальтовых волокон в качестве армирующего материала в ледовой матрице были проведены исследования химического состава базальтовых волокон и оценка толщины донного отложения при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда.

Материалы и методы. Лед, усиленный хаотично расположенными дискретными волок-

нами, является двухкомпонентным хаотично-армированным композитом на основе коротких волокон. На основе положений механики композиционных материалов рассчитывались следующие характеристики фиброльда: содержание волокнистого наполнителя, плотность композита, критическая длина волокон, прочность и модуль упругости композита [14–16].

Экспериментальные исследования прочностных свойств фиброльда проводились на образцах ледового материала в виде плиты, которые получали послойным намораживанием водопроводной воды при спокойном ее наливе в опалубку из пенополистирола с внутренними размерами: высота $h = 100$ мм, ширина $b = 500$ мм, длина $L = 870$ мм, в натуральных условиях при естественно низких среднесуточных температурах -45 °С. Наполнитель представлял собой базальтовые волокна длиной 40 мм и диаметром 18 мкм. Содержание фибры равнялось 0,8/0,3; 2,0/0,75; 4,0/1,5 и 6,0/2,3 % (мас./об.). Первый и последний слои всех образцов представляли чистый лед высотой 1 мм. Наполнитель укладывали на замерзший нижний слой, равномерно распределяя по поверхности ледового слоя, и заливали необходимым количеством охлажденной пресной воды. Количество слоев и расстояния между слоями составляли 7, 9, 11, 15 и 10, 9, 7, 5 мм, соответственно, для разных содержаний фибры. Прочность на растяжение при изгибе определяли в натуральных условиях при среднесуточных температурах -45 °С с использованием специальной установки (рис. 1) [12].



Рис. 1. Испытания фиброльда на трехточечный изгиб

Неармированные образцы льда разрушаются хрупко (рис. 2, а), а фибролед демонстрирует разрушение по вязкому механизму (рис. 2, б). Разрушение образцов чистого льда происходит путем быстрого продвижения хрупкой трещины, инициированной в области максимальных растягивающих напряжений, по всей ширине образца. В армированных образцах формируются

множественные трещины в области максимальных растягивающих напряжений, дальнейшее разрушение происходит путем их

медленного продвижения в направлении, нормальном сечению образца, и их объединения.

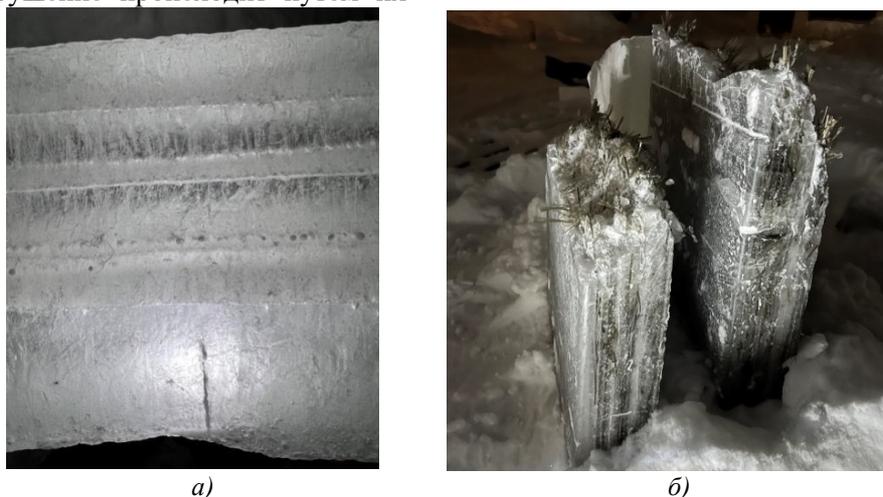


Рис. 2. Образцы льда после испытаний: *a* – неармированный лед; *б* – фибролед с содержанием 2,0/0,75 % (мас./об.) фибры соответственно

Для получения изображения базальтового материала и определения его химического состава использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-7800F, оснащенный энергодисперсионным детектором.

Расчет толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда, проводился при допущении естественного весеннего таяния ледовой переправы шириной a и длиной b на водоеме с постоянной по глубине скоростью течения v_p . При таких допущениях выражение для вычисления толщины базальтового слоя на дне водоема имеет вид:

$$\delta l = 0,3 \cdot V \cdot v_{ос} \cdot v_{ос} \cdot b + v_p \cdot \delta, \quad (1)$$

где V – объем слоя льда, содержащего базальтовые волокна, m^3 ; $v_{ос}$ – скорость осаждения частиц базальта на дно водоема, m/c ; δ – толщина

слоя базальта после таяния льда.

Скорость осаждения частицы базальта диаметром d и плотностью ρ , падающей в жидкости с плотностью ρ_0 и динамической вязкостью η_0 , под действием собственного веса, определяется по известной формуле Стокса:

$$v_{ос} = d^2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot \frac{g}{18 \cdot \eta_0}. \quad (2)$$

Основная часть. На основе многолетних данных Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ЯУГМС о толщине льда на реке Лена была построена зависимость толщины льда от года наблюдения с линией тренда (рис. 3). Метеорологический пост расположен в пригороде г. Якутска, измерение толщины проводилось ежегодно в конце марта.

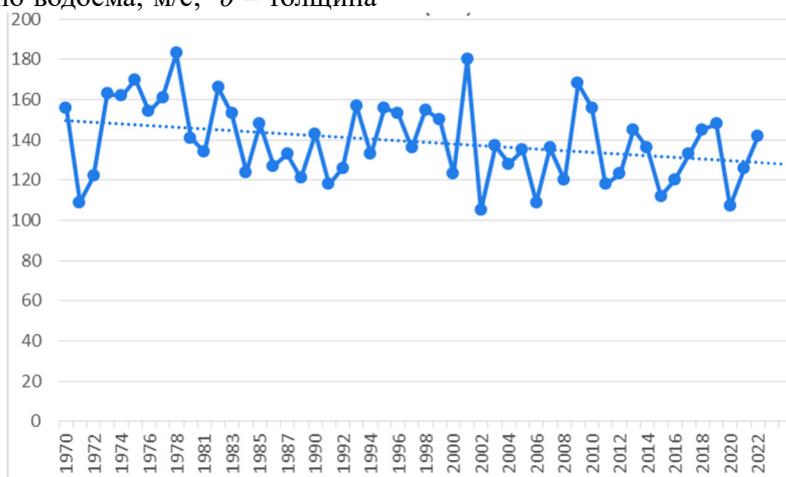


Рис. 3. Толщина льда на р. Лена за 1970–2022 гг. наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Анализ данных показывает, что наблюдается тенденция к уменьшению толщины льда.

Для корреляции наблюдаемой тенденции с динамикой изменения температуры была построена зависимость средней температуры в

окрестности г. Якутска за период ледостава (ноябрь-март) за те же годы наблюдения (рис. 4).

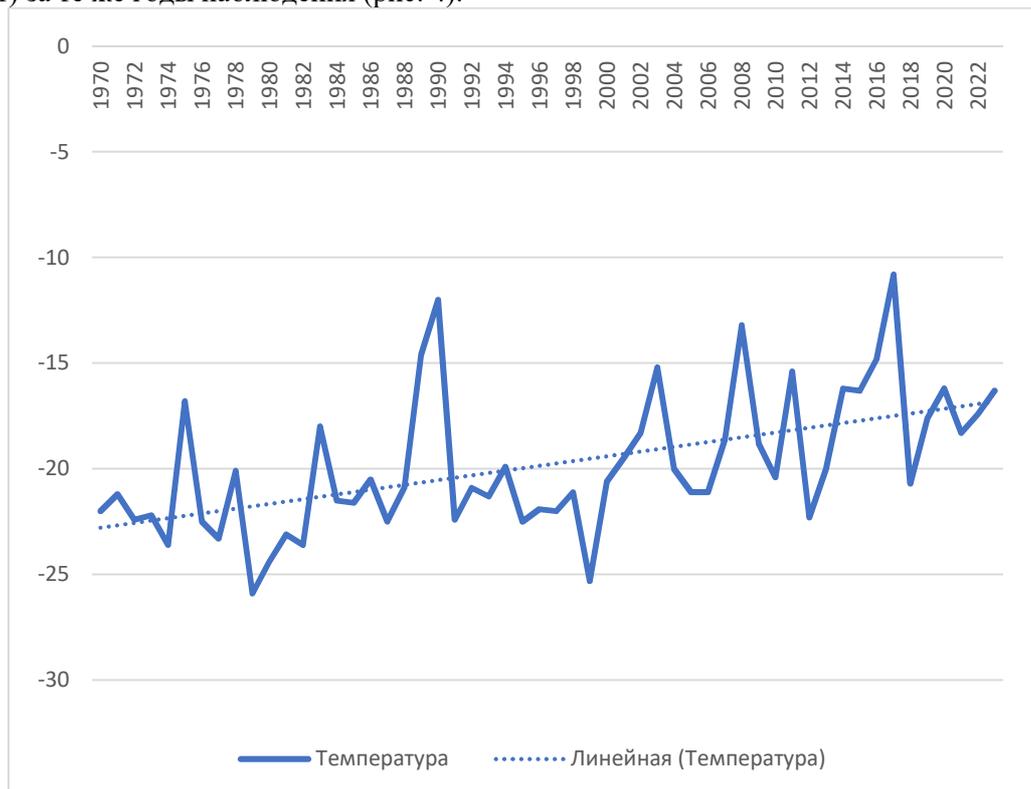


Рис. 4. Средние температуры в период ледостава на р. Лена (25 ноября – 25 марта) в окрестности г. Якутска за 1970–2023 гг. наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Видно, что наблюдается тенденция к повышению среднесезонных температур в период ледостава на р. Лена.

На основании наблюдаемых трендов за многолетние наблюдения в изменении толщины льда и климатических температур можно выдвинуть предположение, что уменьшение толщины естественного льда на реке Лена вызвано явлениями, связанными с процессами глобального потепления. Этот фактор также может приводить к сокращению сроков эксплуатации ледовых переправ.

Прогнозирование физико-механических свойств композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон проводилось с применением условий аддитивности [14–16, 18].

Плотность фиброльда ρ_ϕ определяется по следующей зависимости:

$$\rho_\phi = \rho_\epsilon \cdot v_\epsilon + \rho_l(1 - v_\epsilon), \quad (3)$$

где ρ_ϵ , ρ_l – плотность базальтового волокна и плотность льда, v_ϵ – объемная доля волокон.

При $v_\epsilon = 0,008$, плотности базальтовых волокон $\rho_\epsilon = 2600 \text{ кг/м}^3$ и плотности пресного льда $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$ плотность композита, вычисленная в соответствии с формулой (3), будет равна $\rho_\phi = 1012,8 \text{ кг/м}^3$.

В композиционных материалах под действием растягивающей нагрузки дискретные волокна не разрушаются, а вытягиваются из матрицы, если их длина l меньше критической длины $l_{кр}$, которая рассчитывается по формуле [16]:

$$l_{кр} = d_\epsilon \sigma_\epsilon / 2 \tau_{гр}, \quad (4)$$

где d_ϵ – диаметр волокна; σ_ϵ – предел прочности волокна при растяжении; $\tau_{гр}$ – сдвиговая прочность границы раздела между волокном и матрицей. Сдвиговую прочность $\tau_{гр}$ можно определить с помощью зависимости:

$$\tau_{гр} = \sigma_l \cos 45^\circ, \quad (5)$$

где σ_l – прочность льда.

При прочности базальтовых волокон при растяжении $\sigma_\epsilon = 3200 \text{ МПа}$, $d_\epsilon = 18 \text{ мкм}$ и прочности льда при $(-20^\circ\text{C}) - (-40^\circ\text{C})$ $\sigma_l = 1,5 \text{ МПа}$ [17] критическая длина волокон базальта в матрице составляет $l_{кр} = 37 \text{ мм}$, т.е. в ледяном композиционном материале длина армирующих базальтовых волокон должна быть больше 37 мм.

При армировании матрицы непрерывными волокнами с содержанием v_ϵ прочность композиционного материала σ_k определяется из условия аддитивности:

$$\sigma_k = \sigma_m (1 - v_\epsilon) + \sigma_\epsilon v_\epsilon. \quad (6)$$

Прочностные свойства композиционных материалов, армированных дискретными волокнами, зависят от длины волокон. При $l > l_{кр}$ уравнение аддитивности для определения предела прочности фиброльда σ_f с использованием коэффициента эффективности, зависящего от расположения дискретных волокон в матрице K , имеет вид [18]:

$$\sigma_f = KR v_b \sigma_b + \sigma_l (1 - v_b), \quad (7)$$

где K – коэффициент эффективности, в случае хаотичного расположения волокон в матрице $K = 1/6$; R – коэффициент, учитывающий распределе-

ние напряжений по длине волокон, $R = 0,5$. Расчеты по формуле (6) показывают, что введение базальтовых волокон в количестве 0,8 об. % в ледовую матрицу позволит увеличить прочность композиционного материала до $\sigma_f = 3,5$ МПа, т.е. в 2,3 раза. Если создавать фибролед, прочность которого в 4 раза превышает прочность пресного льда, то содержание базальтовых волокон в матрице должно составить 1,7 об. %.

Зависимость предела прочности на растяжение фиброльда σ_f от объемного содержания дисперсных волокон v_b , построенная в соответствии с соотношением (6), приведена на рис. 5.

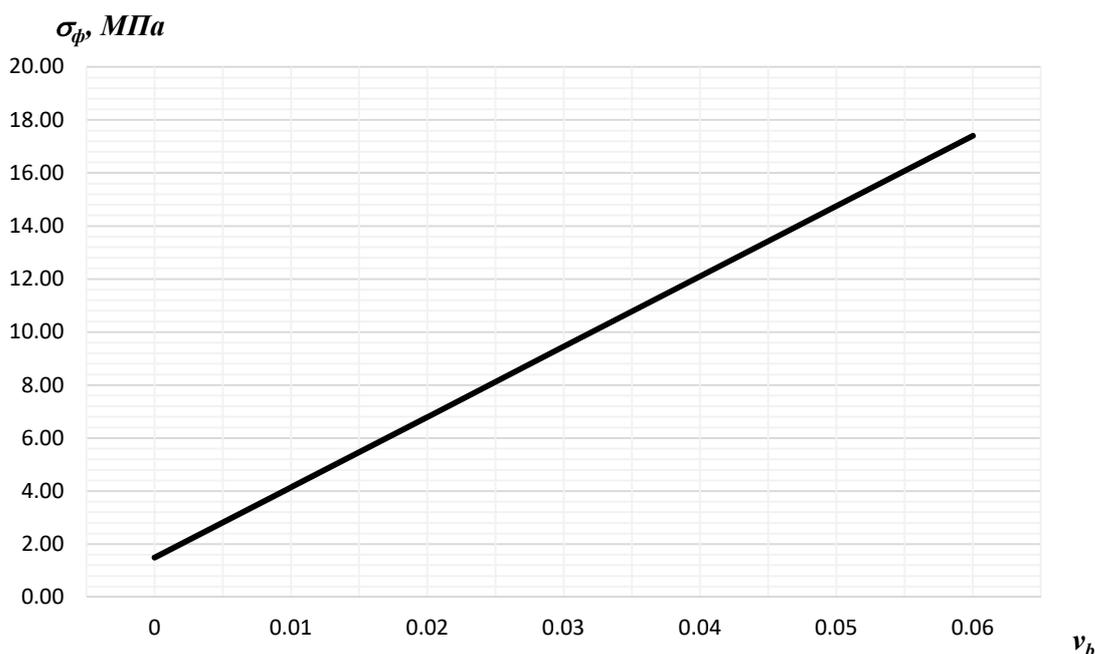


Рис. 5. Расчетная зависимость предела прочности на растяжение композиционного материала σ_f от объемного содержания армирующих волокон v_b

Модуль упругости композиционного материала $E_{км}$ с армирующими волокнами, длина которых превышает критическую длину волокон, условие аддитивности имеет вид

$$E_{км} = E_b \cdot v_b \cdot (1 - l/2l_{кр}) + E_m \cdot (1 - v_b), \quad (8)$$

где E_b , E_m – модули упругости волокна и матрицы.

Для ледового композиционного материала с базальтовыми волокнами длиной $l = 40$ мм, принимая $E_b = 70$ ГПа, модуль упругости пресного льда при температуре -25 °С $E_m = 10$ ГПа [21] в соответствии с выражением (8) получаем значение $E_{км} = 10,2$ ГПа при $v_b = 0,008$ и $E_{км} = 11,3$ ГПа при $v_b = 0,06$.

Экспериментально полученная авторами зависимость предела прочности на растяжение при

изгибе фиброльда $\sigma_{изг}$ от содержания базальтового волокна v_b , приведена на рис. 6 [12].

Видно, что прогнозируемые и экспериментально полученные прочностные характеристики фиброльда возрастают линейно в зависимости от содержания наполнителя.

В качестве сырья для производства базальтовых волокон используются базальтовые горные породы вулканического происхождения, состоящие из оксидов Si , Al , Fe , Ca , Mg , Na , K и других элементов.

РЭМ – изображение использованного базальтового материала приведено на рис. 7. Волокна ровные по длине, диаметром 18 мкм (рис. 7).

Элементный состав базальтового материала, определенный с использованием энергодисперсионного детектора, приведен в таблице 1.

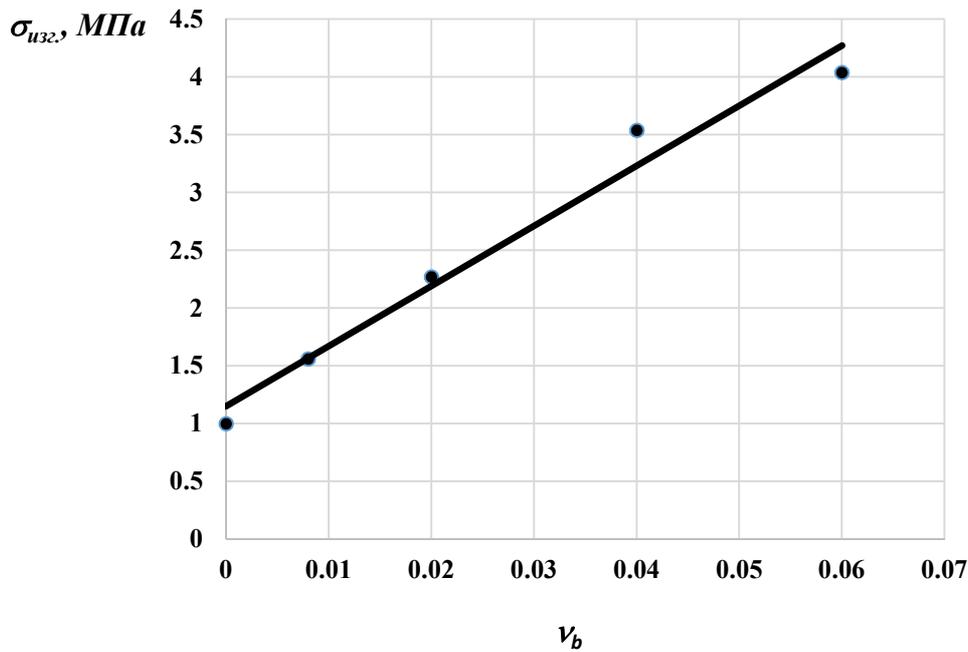


Рис. 6. Экспериментальная зависимость прочности на растяжение при изгибе фиброльда $\sigma_{изг}$ от объемного содержания армирующих волокон ν_b [12]

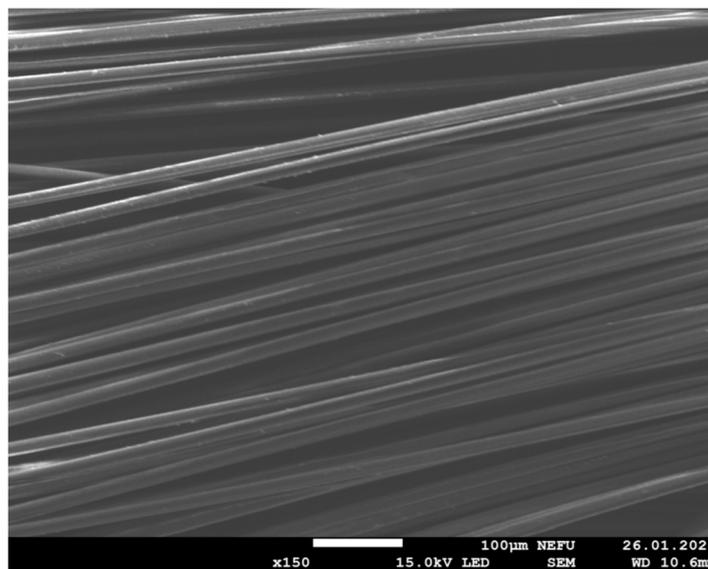


Рис. 7. РЭМ-изображение базальтовых волокон

Таблица 1

Элементный состав базальтового материала

Элемент	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Вес. %	59,74	1,01	1,67	7,40	19,88	1,04	4,50	4,29

Из данных таблицы видно, что состав базальтового волокна полностью соответствует составу природного материала, т.е. технология производства не предусматривает применение каких-либо добавок.

Результаты проведенной оценки толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при естественном таянии ледового покрова из фиброльда, показали следующее. При исходных данных $d = 0,000018 \text{ м}$, $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$, $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\eta_0 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $V = 35 \text{ м}^3$, $a = 7 \text{ м}$, b

$= 100 \text{ м}$, $v_p = 1 \text{ м/с}$, $\delta = 0,015 \text{ м}$, толщина базальтового слоя на дне водоема составит $\delta_1 = 8,87 \text{ мм}$.

Учитывая, что при скорости течения реки на дне от 2–3 см/с происходят процессы эрозии дна путем переноса частиц [19], можно ожидать, что при строительстве ледовой переправы через р. Лена из композиционного материала на основе льда и базальтовой фибры образовавшийся на дне слой из частиц базальта размером 18 мкм будет уноситься течением реки и не образует донных отложений.

Вывод. Прогнозирование характеристик композиционного материала, основанного на ледяной матрице и армированного хаотично расположенными дискретными базальтовыми волокнами, продемонстрировало высокую эффективность использования базальтовых волокон в качестве армирующей добавки. Введение таких наполнителей позволяет увеличить прочность на изгиб пресного льда в два-три раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям. Кроме того, выбранный наполнитель является экологически чистым материалом: химический состав базальтовых волокон аналогичен составу природного сырья, не содержит посторонних добавок, и при использовании этого композиционного материала в качестве ледового покрытия не образуются донные отложения после таяния. Упрочнение льда с добавлением базальтовых волокон объясняется высокой адгезией между наполнителем и матрицей, что связано с отличной смачиваемостью волокон водой, а также прочным механическим сцеплением армирующих волокон и матрицы при объемном расширении воды во время замерзания. Кроме того, добавление в воду волокнистых наполнителей приводит к образованию льда с мелкозернистой структурой, что также является механизмом упрочнения ледового композиционного материала.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (рег. номер № 1240-3260-0080-4, научная тема FWRS-2024-0035).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Towel K.L.T., Matthews E.M., Smith E.A. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198. 103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
2. Головин Ю.И., Самодуров А.А., Родаев В.В., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Разливалова С.С., Бузник В.М. Упрочнение поликристаллического льда наночастицами SiO₂ // *Журнал технической физики*. 2023. Т. 93. Вып. 10. С. 1459–1469. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56284.149-23.
3. Кобл Р.Л., Кингери У.Д. Искусственное упрочнение (армирование) льда / *Лед и снег*. М.: Мир, 1966. С. 94–116.
4. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and

fibre content on direct shear properties of plain ice and fibre-reinforced ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 194. Art. 103458. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103458.

5. Zhao Ch., Li T., Li W. Mechanical analysis of ice-composite and fiber strength by daily tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2083. 022014. DOI: 10.1088/1742-6596/2083/2/022014.

6. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных волокнами РУСАР-С // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 38–44.

7. Архаров И.А., Гончарова Г.Ю. Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами // *Холодильная техника*. 2010. № 11. С. 46–50.

8. Морозов Е.В., Воронин А.С., Книга С.В., Бузник В.М. Исследование ледовых композиционных материалов, армированных нанодисперсными волокнами оксида алюминия, методами ядерного магнитного резонанса // *Материаловедение*. 2021. № 8. С. 9–18. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-9-18.

9. Бузник В.М., Гончарова Г.Ю., Нужный Г.А., Черепанин Р.Н. Влияние растительных армирующих наполнителей на прочностные свойства композиционных материалов с ледяной матрицей // *Материаловедение*. 2018. № 9. С. 33–40.

10. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Fillers. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. No. 4. Pp. 955–957. DOI: 10.1134/S2075113320040371.

11. Syromyatnikova A.S., Andreev Ya.M., Sibiryaikov M.M., Ivanov A.R., Burnashev A.V., Prokop'ev L.A., Il'in G.Yu. Fracture laws for composite materials based on fresh ice during testing of bulky samples. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. No. 4. Pp. 199–203. DOI: 10.1134/S0036029523040286.

12. Syromyatnikova A.S., Tikhonravova Ya.V., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., and Sibiryaikov M.M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. No. 5. Pp. 1215–1220. DOI: 10.1134/S0036029524702240.

13. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. *Cold Regions Sci. Technol*. 2022. Vol. 196. No. 103490. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103490.

14. Коротева Л.И., Шаронов А.В., Астахов П.А., Миронов Н.А., Сергеева А.В. Проектирование композиционных материалов с заданной

структурой и свойствами // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 15–16.

15. Шульга А.В. Композиты. Ч. 1. Основы материаловедения композитных материалов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 96 с.

16. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. Киев: Вища школа, 1977. 312 с.

17. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 208 с.

18. Композиционные материалы: Справочник. Под ред. Карпиноса Д.М. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

19. Короновский Н.В. Общая геология. М.: КДУ, 2018. 552 с.

Информация об авторах

Сыромятникова Айталипа Степановна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru. Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова. Россия, 677890, Якутск, ул. Октябрьская, д. 1. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Местников Алексей Егорович, доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: mestnikovae@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Сыромятников Дмитрий Иннокентьевич, аспирант кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: sdisoul@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Дорофеев Максим Антонович, бакалавр кафедры физики материалов и технологий сварки. E-mail: dorofeev199963@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д.58.

Поступила 01.02.2025 г.

© Сыромятникова А.С., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Дорофеев М.А., 2025

^{1,2,*}**Syromyatnikova A.S.**, ²**Mestnikov A.E.**, ²**Syromyatnikov D.I.**, ²**Dorofeev M.A.**

¹Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences

²Ammosov North-Eastern Federal University

*E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru

PROSPECTS OF BASALT FIBERS APPLICATION FOR ICE CONSOLIDATION

Abstract. *In the conditions of the Arctic and northern regions one of the most promising construction materials can be considered ice and snow. This is justified by their availability, ease of processing, environmental safety, and lack of need for disposal after the end of their service life. However, despite these advantages, ice has insufficient strength and exhibits high brittleness at subzero temperatures, which limits the widespread use of ice in this capacity. One of the effective and widely used methods to increase the strength of ice is its reinforcement. Among various reinforcing materials basalt fibers stand out due to their high performance and environmental friendliness. Within the framework of the study, the prospects of application of ice material reinforced with discrete basalt fibers - fibre reinforcement - are considered. The structural parameters of the reinforcing filler of the composite material were calculated, as well as the strength characteristics of the material depending on the fiber content. The results of predicting the properties of fibroblend demonstrated that the use of basalt fibers as a reinforcing component allows increasing the bending strength of fresh ice by 2–3 times. Experimental data obtained in the study of the strength characteristics of fibroblend depending on the filler concentration confirm compliance with the calculated values. Besides, basalt fibers are an environmentally safe material: their chemical composition is identical to natural raw materials, and when the composite is used as an ice coating, they do not form harmful bottom sediments after melting. The obtained results indicate the prospect of using fiberboard as an effective and environmentally friendly material for construction, in particular, for creating ice crossings and other temporary structures in cold climate conditions.*

Keywords: *ice, hardening, basalt fibers, fiber-ice, strength properties, chemical composition, bottom sediment thickness*

REFERENCES

1. Towel K.L.T., Matthews E.M., Smith E.A. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 198. 103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
2. Golovin Yu.I., Samodurov A.A., Rodaev V.V., Turin A.I., Golovin D.Yu., Razlivalova S.S., Buznik V.M. Hardening of polycrystalline ice with SiO₂ nanoparticles [Uprochnenie polikristallicheskogo l'da nanochasticami SiO₂]. *Technical Physics*. 2023. Vol. 93. No. 10. Pp. 1459–1469. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56284.149-23. (rus)
3. Kobl R.L., Kingeri U.D. Artificial hardening (reinforcement) of ice [Iskusstvennoe uprochnenie (armiroyanie) l'da]. *Ice and snow [Led i sneg]*. M.: Mir, 1966. Pp. 94–116. (rus)
4. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fibre content on direct shear properties of plain ice and fibre-reinforced ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 194. 103458. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103458.
5. Zhao Ch., Li T., Li W. Mechanical analysis of ice-composite and fiber strength by daily tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2083. 022014. DOI: 10.1088/1742-6596/2083/2/022014.
6. Cherepanin R.N., Nugnyi G.A., Razomasov N.A., Goncharova G.Y., Buznik V.M. Physico-mechanical properties of ice composite materials reinforced with RUSAR-S fibers [Fiziko-mekhanicheskie svoystva ledyanykh kompozitsionnykh materialov, armiroyannykh voloknami RUSAR-S]. *Materialovedenie*. 2017. No. 7. Pp. 38–44. (rus)
7. Arharov I.A., Goncharova G.Y. Experimental study of ice structures modified with polymers [Eksperimental'noe issledovanie ledovykh struktur, modifitsirovannykh polimerami]. *Holodilnaya tehnika*. 2010. No. 11. Pp. 46–50. (rus)
8. Morozov E.V., Voronin A.S., Kniga S.V., Buznik V.M. Investigation of ice composite materials reinforced with nanodisperse aluminum oxide fibers by nuclear magnetic resonance methods [Issledovanie ledovykh kompozitsionnykh materialov, armiroyannykh nanodispersnymi voloknami oksida al'yuminiya, metodami yadernogo magnitnogo rezonansa]. *Materialovedenie*. 2021. No. 8. Pp. 9–18. (rus)
9. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Nugnyi G.A., Cherepanin R.N. The effect of plant reinforcing fillers on the strength properties of composite materials with an ice matrix [Vliyanie rastitel'nykh armiruyushchih napolnitelej na prochnostnye svoystva kompozitsionnykh materialov s ledyanoy matricej]. *Materialovedenie*. 2018. No. 9. Pp. 33–40. (rus)
10. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M., Kychkin A.K., Alekseeva A.V. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Fillers. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. No. 4. Pp. 955–957.
11. Syromyatnikova A.S., Andreev Ya.M., Sibiryaikov M.M., et al. Fracture laws for composite materials based on fresh ice during testing of bulky samples. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. No. 4. Pp. 199–203.
12. Syromyatnikova A.S., Tikhonravova Ya.V., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., and Sibiryaikov M.M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. No. 5. Pp. 1215–1220.
13. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. Art. 103490.
14. Koroteeva L.I., Sharonov A.M., Astakhov P.A., Mironov N.A., Sergeeva A.V. Designing composite materials with a given structure and properties [Proektirovanie kompozitsionnykh materialov s zadannoy strukturoj i svoystvami]. *Plasticheskie massy*. 2016. No. 5–6. Pp. 15–16. (rus)
15. Shulga A.V. Composites. P.1. Fundamentals of materials science of composite materials. [Kompozity.CH.1. Osnovy materialovedeniya kompozitsionnykh materialov]. M.: NIYAU MIFI, 2013. 96 p.
16. Karpinos D.M., Tuchinsky L.I., Vishnyakov L.R. New composite materials [Novye kompozitsionnye materialy]. Kiev, Visha shkola, 1977. 312 p. (rus)
17. Lavrov V.V. Deformation and strength of ice [Deformatsiya i prochnost' l'da]. L.: Gidrometeorologicheskoe izdatelstvo, 1969. 208 p. (rus)
18. Composite materials: Directory [Kompozitsionnye materialy: Spravochnik]. Kiev, Naukova dumka, 1985. 592 p. (rus)
19. Koronovskiy N.V. General geological [Obshchaya geologiya]. M.: KDU, 2018. 552 p. (rus)

Information about the authors

Syromyatnikova, Aitalina S. PhD. Professor. E-mail: a.s.syromyatnikova@mail.ru. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Russia, 677890, Yakutsk, Otyabrskiy str., 1. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 58.

Mestnikov, Aleksey E. DSc, Professor. E-mail: mestnikovae@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Syromyatnikov, Dmitriy I. Postgraduate student. E-mail: sdisoul@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Dorofeev, Maksim A. Bachelor student. E-mail: doroveev199963@mail.ru. Ammosov North-Eastern Federal University. Russia, 677000, Yakutsk, Belinskii str., 48.

Received 01.02.2025

Для цитирования:

Сыромятникова А.С., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Дорофеев М.А. Перспективы применения базальтовых волокон для упрочнения льда // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 22–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31

For citation:

Syromyatnikova A.S., Mestnikov A.E., Syromyatnikov D.I., Dorofeev M.A. Prospects of basalt fibers application for ice consolidation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 22–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-22-31