

DOI: [10.7242/1999-6691/2019.12.1.9](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.1.9)

УДК 539.3; 539.4; 001.891.573

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ЛЬДА

К.И. Ипатов, А.С. Васильев, В.Л. Земляк

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, ЕАО, Биробиджан, Российская Федерация

В отсутствие мостовых сооружений, а также при невозможности устройства паромных переправ на водных преградах в зимний период времени организуются автомобильные дороги по ледовым переправам при условии образования ледяного покрова требуемой толщины. Если толщина ледяного покрова недостаточна для безопасной эксплуатации переправы, прибегают к стандартным способам повышения ее надежности, таким как покрытие деревянным колейным настилом, намораживание льда снизу, намораживание льда сверху. Практический опыт показывает, что физико-механические свойства ледяного покрова при этом не надежны и зависят от внешних факторов (наличия снега и ветра в момент намораживания, температуры окружающей среды). В связи с этим возникает необходимость в разработке альтернативных подходов к повышению качества переправы, например путем внедрения в лед армирующих элементов. Целью работы являлось определение влияния различных вмораживаемых материалов на несущую способность ледяного покрова. Для этого, во-первых, выполнено сопоставление экспериментально и численно установленных предельных состояний ледяных образцов, усиленных стальной арматурой по предложенной схеме. Во-вторых, осуществлены численные исследования прочности льда при применении разных композиционных материалов. Эксперименты проводились на специально собранной установке, моделирующей условия чистого изгиба, при армировании сталью А400. Именно вследствие чистого изгиба происходит разрушение ледяной переправы при движении по ней транспортного средства. В численных экспериментах образцы усиливались поверхностными каркасами, отличающимися друг от друга физико-механическими свойствами. Представлены результаты вычисления характеристик напряженно-деформированного состояния ледяного покрова по физически-нелинейной модели с учетом деформаций, полученные с помощью программного конечно-элементного комплекса. Даны качественная и количественная оценки эффективности использования упрочняющих элементов из композитных материалов разной природы. Показано, что армирование позволяет значительно увеличить несущую способность ледяного покрова.

Ключевые слова: поверхностное армирование, композиционный материал, ледяная балка, модельный эксперимент, численные исследования

STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE REINFORCEMENT ON THE BEARING CAPACITY OF ICE

K.I. Ipatov, A.S. Vasilyev and V.L. Zemlyak

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Jewish Autonomous Region, Birobidzan, Russian Federation.

Practical experience shows that the physical and mechanical properties of the ice cover are unreliable and can strongly depend on various external factors (the presence of snow and wind at the time of freezing, the ambient temperature), if it is reinforced by traditional methods. In this connection, the problem of increasing the bearing capacity of ice by alternative methods, e.g. by introducing reinforcing elements into the ice, is an urgent problem today. The aim of this work is to determine the effect of various reinforcing materials on the carrying capacity of the ice cover. First, a comparison was made between the results of experimental and numerical studies obtained for the maximum deflections and the carrying capacity of ice samples strengthened with steel reinforcement according to the proposed scheme. Secondly, numerical investigation of the strength of ice upon reinforcement with various composite materials was performed. Experiments on strengthening ice samples with A400 steel reinforcement were carried out on a setup specially designed for simulating pure bending conditions. The destruction of the ice cover occurs under the action of pure bending when the vehicle is moving along it. In numerical experiments, the samples were reinforced with surface reinforcing frames with different physical and mechanical properties. Numerical calculations of the stress-strain characteristics of the ice cover were performed in terms of the physically nonlinear deformation model using the FE software package. The paper gives a qualitative and quantitative assessment of the effectiveness of the use of various composite materials as reinforcing elements. It is shown that the application of reinforcing materials to strengthen the ice cover significantly increases its bearing capacity.

Key words: surface reinforcement, composite material, ice beam, model experiment, numerical study

1. Введение

Задача прогнозирования и увеличения несущей способности льда в зависимости от его физико-механических свойств обусловлена двумя основными причинами: во-первых, активным освоением Арктического шельфа, для которого необходимо обеспечение ресурсами жизнедеятельности, включающей и вывоз добытых полезных ископаемых на специальных средствах по поверхности ледяного покрова; во-вторых, потребностью в ледовых переправах через реки, особенно Сибири и Дальнего Востока, с целью сокращения протяженности маршрутов передвижения. Как отмечает Войтковский К.Ф. [1], при строительстве гидротехнических и транспортных сооружений большие объемы сложных и трудоемких работ, таких как возведение перемычек, перекрытие рек, сооружение мостовых опор и монтаж пролетных строений, прокладка трубопроводов и другое, могут выполняться и в зимнее время, по льду рек и

водохранилищ. В связи с этим очевидна важность изучения физико-механических свойств ледяного покрова и способов его упрочнения.

Следует отметить, что исследованием льда занималось множество авторов, некоторые из работ представлены далее. При этом прочностные и упругие характеристики льда определяются различными методами: по изгибу балок, свободно лежащих на двух опорах; по разрушению консолей (клавишей) на плаву; по разрушению круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре, ледяной пластины, нагружаемой в центре [1]. В монографии Бычковского Н.Н. и Гурьянова Ю.А. [2] значительное внимание уделено не только физико-механическим характеристикам льда, но и новым вопросам использования ледяного покрова и особенностям его работы под временной подвижной нагрузкой. В работе [3] анализировалась прочность на сжатие образцов в виде кубов из озерного льда при изменении скоростей нагружения, а также влияние мелких дефектов на прочностные характеристики. Вопросам численного моделирования разрушения ледяного покрова с помощью специальных способов создания нагружающего воздействия при учете сжимаемости и неоднородности льда посвящена статья Прокудина А.Н. и Одинокова В.И. [4]. Новые данные по физико-механическим характеристикам морского льда получены в работах Гольдштейна Р.В. и Осипенко Н.М. [5] и Schulson E.M. [6]. Важное значение здесь имеет изменчивость механической прочности льда в зависимости от его микроструктурной неоднородности [7].

Для улучшения эксплуатационных качеств и повышения надежности ледовой переправы существуют стандартные методы: усиление деревянным колейным настилом, намораживание льда снизу или сверху. Однако физико-механические свойства ледяного покрова трудно прогнозируются и существенно зависят от внешних факторов (наличия снега и ветра в момент намораживания, температуры окружающей среды). В связи с этим актуальной становится задача повышения несущей способности льда путем применения альтернативных методов, например, внедрением в лед армирующих элементов. В работе [8] описаны эксперименты по «верхнему армированию» ледяного покрова геосинтетическими материалами. В [9–10] рассмотрены физико-механические свойства композитных материалов, создаваемых вмораживанием в лед различных модификаторов (хвои, углеродных нанотрубок, льноволокна, древесной стружки, стекловолна и другого). Известны решения [11], когда для упрочнения в ледяной покров вмораживаются стальные элементы. Достаточно перспективным может оказаться способ повышения прочности путем внедрения в относительно тонкий (толщиной $0,3 \div 0,4$ м) ледяной покров объемных армирующих каркасов, что, в отличие от ранее описанных способов, позволит сохранить сплошность переправы в случае образования сквозных раскрытых трещин.

Целью работы являлось определение влияния армирующих материалов на несущую способность ледяного покрова. Впервые представляются результаты модельных экспериментов по разрушению ледяных образцов, усиленных цельносварным металлическим каркасом. Численно установлены параметры напряженно-деформированного состояния армированного льда. Выполнено их сопоставление с данными, полученными на основе натурных опытов. С учетом проверки работоспособности численной модели проведены оценки прочности льда при армировании различными композиционными материалами.

2. Подготовка к проведению экспериментальных и численных исследований

Секция ледовых проблем Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ) в 1980 году сформулировала ряд рекомендаций по проведению испытаний, учитывающих особенности льда как материала. Было предложено задавать у испытываемого образца некоторые оптимальные соотношения между размерами. Во многих работах установлено, что наилучшие результаты, позволяющие снизить масштабный эффект, то есть влияние геометрических размеров образцов на прочностные свойства льда, получаются в случае, когда ширина B и высота H балки равные, а длина L составляет примерно $8 \div 8,5H$ [12]. В рекомендациях МАГИ также указываются близкие величины: $B = 1 \div 2H$; $L = 7 \div 10H$.

Модельные эксперименты выполнялись на универсальной нагружающей установке, спроектированной и собранной специально для этих целей на базе лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) в 2014 году (Рис. 1).

Экспериментальная установка имеет силовую раму, состоящую из стоек, станин, верхней и нижней балок, нагружающего устройства и измерительного модуля [13]. Нагружающее устройство включает гидроцилиндр 4 с номинальным давлением 9 атм. и распределительную силовую балку 5. Усилие от нагружающего устройства передается на образец 7 через шарнирные опоры 6. Система нагружения устроена так, что обеспечивает в средней части ледяного образца чистый изгиб. Вертикальные перемещения сечения образца в середине пролета измеряются с помощью 3 — бесконтактного лазерного датчика LAS-Z компании Way Con (Германия), закрепленного на независимой стойке. Нагрузка, которую испытывает образец, фиксируется с помощью тензодатчика веса LPA-22t с весовым терминалом SH-20 компании ТОКВЕС (Россия) 2. Скорость нагружения для всех образцов одинакова и составляет 135 кПа/с.

Для изготовления ледяных образцов размерами $L \times B \times H = 2000 \times 200 \times 200$ мм собиралась деревянная опалубка из досок толщиной 40 мм. В опалубку укладывалась двухслойная полиэтиленовая пленка

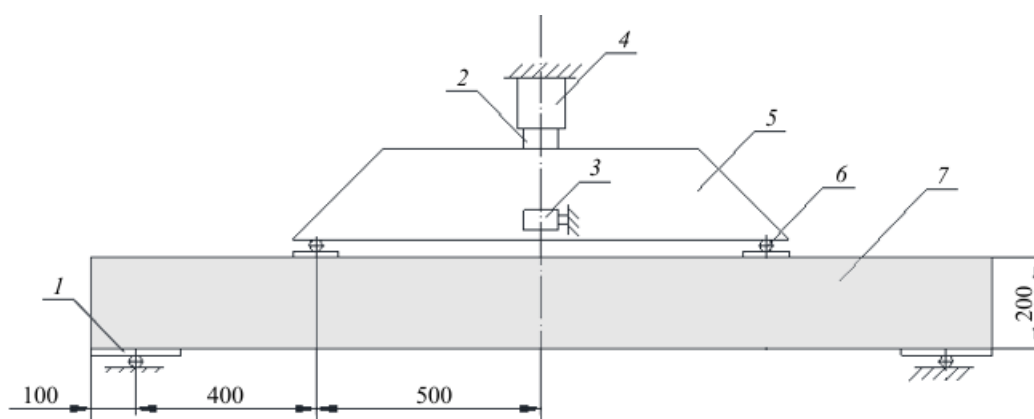


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – шарнирные опоры ледяной балки; 2 – тензодатчик веса LPA-22t с весовым терминалом SH-20; 3 – датчик вертикальных перемещений LAS-Z; 4 – гидроцилиндр; 5 – распределительная балка; 6 – шарнирные опоры распределительной балки; 7 – ледяная балка

толщиной 0,03 мм. Армирующий каркас закреплялся в опалубке, что обеспечивало его нахождение в толще балки и исключало выход арматуры на поверхность. После этого в опалубку заливалась вода. Далее система подвергалась воздействию низких атмосферных температур ($t < 0^\circ\text{C}$) до полного замерзания жидкости. В зависимости от погодных условий время изготовления образцов составляло от 5 до 8 суток при температуре окружающей среды от -15 до -28°C . Всего проведено три серии экспериментов. Для каждой серии одновременно готовилось 5 образцов при одинаковых условиях. Данные экспериментов усреднялись, разница между результатами не превышала 15%. Влияние изменения температуры на механические характеристики образцов не исследовалось.

Для армирования ледяных балок использовался цельносварной армирующий каркас из стальной арматуры А400 периодического профиля диаметром 6 мм (см. Рис. 2). Предварительная серия экспериментов по разрушению ледяных образцов, усиленных поверхностным армированием показала, что наиболее оптимальная толщина защитного слоя льда составляет 10 мм, что при нагружении обеспечивает совместную работу льда и арматуры и максимальную несущую способность. Температурное поле внутри балки и влияние коэффициентов температурного расширения на ослабление связи стали и льда не рассматривалось.

Для оценки влияния поверхностного усиления растянутой и сжатой зон образца из льда на несущую способность в условиях чистого изгиба проводились эксперименты по их разрушению. Вид установки и образцов во время эксперимента показаны на фотоснимках (Рис. 3).

При дискретизации расчетная область имела порядка 80 000 конечных элементов и 90 000 узлов. Для зон, заполненных льдом, использовался конечный элемент SOLID65, разработанный для реализации модели Willam-Warke [14]. Данная модель применяется для описания поведения хрупких структурно-неоднородных материалов и учитывает образование трещин на площадке, нормальной к действующим главным напряжениям при превышении ими заданного предела прочности при растяжении, а также объемное напряженное состояние. Для зон армирующего материала применялся конечный элемент BEAM188 — балочный элемент с изгибной жесткостью. Каждый продольный стержень каркаса разбивался на 200 конечных элементов (КЭ), каждый поперечный стержень — на 18. Основными параметрами конечного элемента BEAM188 являются: модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести (прочности) армирующего материала, тангенциальный модуль. Связь между КЭ льда и армирующими элементами в первом приближении принималась идеальной.

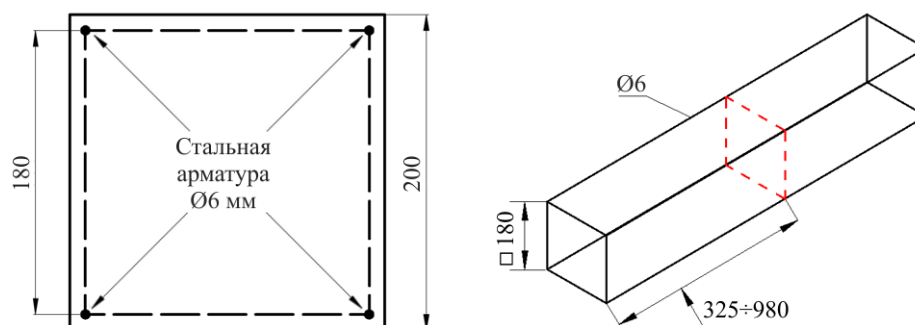


Рис. 2. Схема армирования ледяной балки

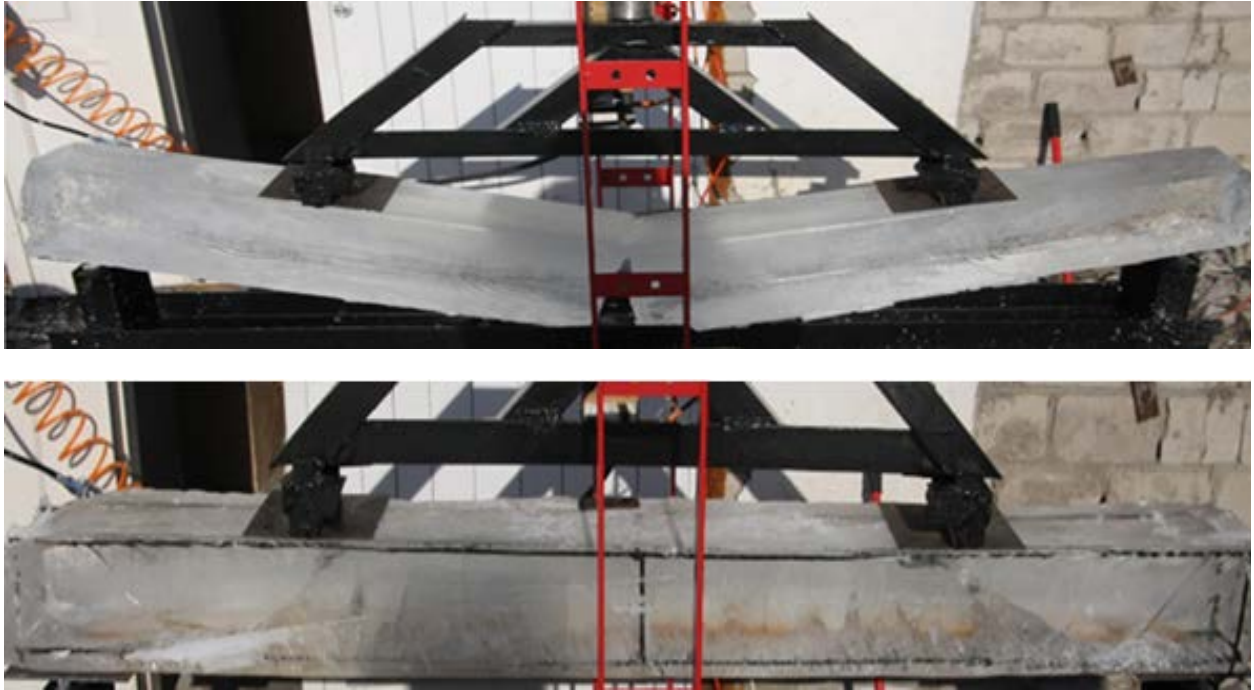


Рис. 3. Разрушение на экспериментальной установке: неармированный образец (а), образец, армированный сталью А400 по заданной схеме (б)

Физическая нелинейность обусловлена непропорциональной связью между деформациями и напряжениями [15]:

$$\{\sigma\{\varepsilon}\} = [D\{\varepsilon\}]\{\varepsilon\}, \quad \{\sigma\{\varepsilon}\}^{i+1} = [D\{\varepsilon\}]^i \{\varepsilon\}^{i+1}, \quad (1)$$

где $[D\{\varepsilon\}]_i$ — матрица механических характеристик материала на i -м шаге нагружения, $\{\sigma\}$ — вектор напряжений, $\{\varepsilon\}$ — вектор деформаций. При этом матрица механических характеристик нелинейного конечного элемента вычисляется следующим образом:

$$[D] = (1 - V^R) \times [D^l] + V^R \times [D^r]. \quad (2)$$

Здесь V^R — отношение объема армирующего материала к общему объему конечного элемента, $[D^l]$ — матрица механических характеристик льда, $[D^r]$ — матрица механических характеристик армирующего материала.

При учете открытия трещин матрица механических характеристик льда приобретает следующий вид:

$$[D_i^{ck}] = E \begin{bmatrix} E_{sec}/E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{sec}/E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_r/[2(1+\mu)] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_r/[2(1+\mu)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_r/[2(1+\mu)] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь E_{sec} — секущий модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона, β_r — коэффициент передачи сдвиговых усилий при открытой трещине, при этом $1 > \beta_r > 0$. Для хрупкого материала β_r по умолчанию принимается равным 0,8.

Матрица механических характеристик армирующего материала определяется так:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = [D^r] \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь E^r — модуль упругости армирующего материала. Также для окончательного преобразования матриц механических характеристик необходимо знать матрицы направляющих косинусов $[D^l]$ и $[D^r]$ [15].

Для визуализации трещин использовался критерий Базанта [16] — двухинвариантный деформационный критерий разрушения материала. Данный критерий применяется в основном для хрупких материалов и представляет собой предельную поверхность прочности в форме параболы в осях 1-го и 2-го инвариантов тензора деформаций. При этом в осях главных деформаций предельной поверхностью является поверхность вращения 2-го порядка. Условие прочности для модели Базанта описывается следующим выражением:

$$F(T_\varepsilon) = AL_1 + \sqrt{B^2 L_1^2 + CJ_2} - d > 0, \quad (5)$$

где L_1 — 1-й инвариант тензора деформаций, J_2 — 2-й инвариант девиаторной части тензора деформаций, A , B , C , D — коэффициенты, которые вычисляются исходя из результатов лабораторных испытаний материала. Для построения параболы достаточно трех испытаний, из которых устанавливаются R_c (прочность при одноосном сжатии), R_t (прочность при одноосном растяжении), H (прочность при трехосном сжатии).

$$L_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad (6)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left((\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{4} \gamma_{xy}^2 + \frac{1}{4} \gamma_{yz}^2 + \frac{1}{4} \gamma_{xz}^2 \right) \right), \quad (7)$$

$F(T_\varepsilon)$ — функция деформированного состояния.

Армированная ледяная балка состояла из двух материалов: льда и упрочняющего материала. Лед имел следующие механические характеристики: модуль Юнга $E = 765$ МПа, прочность при одноосном сжатии $R_b = 0,55$ МПа, прочность при одноосном растяжении $R_{bt} = 0,4$ МПа, плотность $\rho = 930$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Механические характеристики материалов, используемых для усиления льда в численных экспериментах, представлены в таблице: № 1 — горячекатаная арматура А400; № 2 — стеклопластиковая композитная арматура; № 3 — углеродная арматура; № 4 — арамидокомпозитная арматура; № 5 — арматура комбинированная (сочетание стекла и базальта).

Таблица. Расчетные механические характеристики арматур

Наименование показателя	Обозначение, размерность	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Предел прочности при растяжении	$\sigma_{br,r}$, МПа	365	168	840	448	320
Предел прочности при сжатии	$\sigma_{bc,r}$, МПа	365	63	180	96	96
Модуль упругости	E , МПа	$20 \cdot 10^4$	$50 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$

3. Результаты экспериментального и численного исследования

Для изучения физико-механических свойств и оценки влияния поверхностного армирования на предельную несущую способность образцов была проведена предварительная серия экспериментов по нагружению неармированных ледяных балок [11]. В ходе экспериментов определялась величина прогиба от нагрузки, подаваемой на испытуемый образец. Основные результаты экспериментов показаны на рисунке 4а. Модуль упругости испытуемых образцов составлял $E = 765$ МПа.

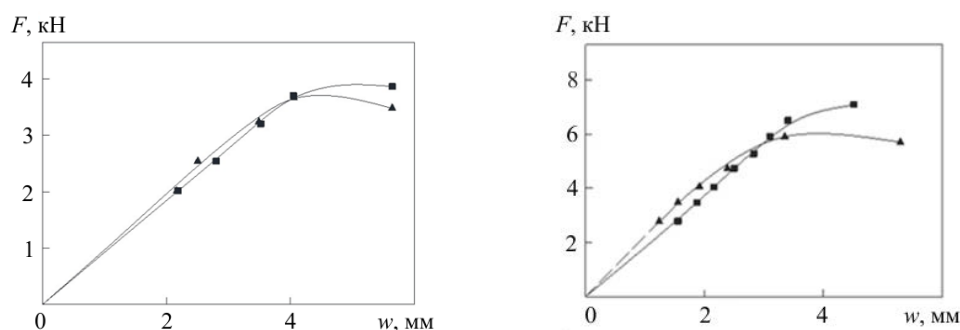


Рис. 4. Диаграмма прогибов от нагрузки образца без армирования (а), с армированием сталью А400 (б) (▲ – модельный эксперимент, ■ – расчет в ANSYS Workbench 17.2)

Стоит отметить высокую степень сходства экспериментальных и численных результатов, полученных по прогибам балки. Погрешность между данными вплоть до момента разрушения не превышала 8%. Разрушающая нагрузка по данным эксперимента составила 3,6 кН, при численном расчете — около 3,9 кН. На рисунке 4б представлены результаты модельного эксперимента при испытании армированного образца. Видно, что максимальная нагрузка, которую выдержали образцы, порядка 5,9 кН при максимальном прогибе 5,3 мм. При наличии каркаса испытания не позволили получить разрушение в форме разделения образца на отдельные части. Армирующий каркас удерживал лед, который вследствие изгиба был практически полностью разрушен поперечными трещинами.

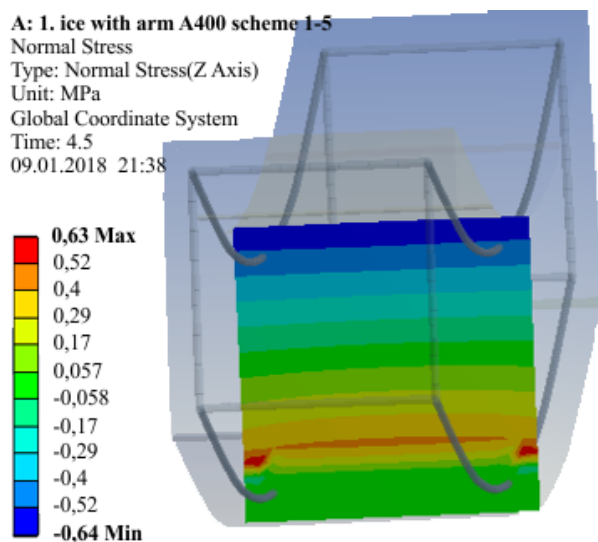


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений в срединном сечении образца, армированного материалом № 1, при разрушении

Анализ результатов модельных экспериментов и численных расчетов позволяет заключить, что они хорошо согласуются в упругой зоне. За критерий разрушения был принят резкий рост деформаций образца, вызванный разрушением большей части его сечения и потерей несущей способности. При этом в арматуре предел текучести не достигался, разрушение происходило с образованием обширных сквозных трещин во льду от действия изгибающего момента в середине пролета балки. Визуализация результатов численных расчетов представлена на рисунках 5 и 6.

На рисунке 5 хорошо видно смещение нейтральной оси балки при последовательном разрушении и постепенном выходе из строя срединного сечения (зеленая область снизу соответствует нулевым напряжениям в этом сечении) при разрушающей нагрузке около 7 кН.

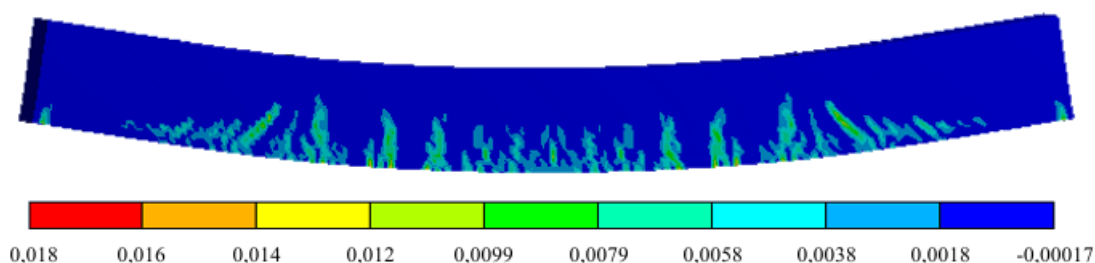


Рис. 6. Схема трещин в образце, армированном материалом № 1 при разрушении

Схема трещин в соответствии с критерием Базанта [14] в диапазоне его значений от $-0,00017$ до $+0,018$ показана на рисунке 6. Положительные значения критерия соответствуют возникновению и открытию трещин в растянутой зоне балки.

Основные результаты численных расчетов содержит рисунок 7а, где представлены зависимости нагрузки от прогиба для образцов, армированных различными материалами. На рисунке 7б

демонстрируются напряжения в срединных сечениях каждого из армированных образцов от разрушающей нагрузки для неармированного образца. Анализ данных позволяет сделать вывод, что использование армирующих каркасов из композитных материалов приводит к существенному увеличению несущей способности образцов из льда. Образец, армированный стальной арматурой А400, проявил наибольшую несущую способность по сравнению с остальными образцами. Наименьшей несущей способностью обладали образцы, усиленные стеклопластиковой и арамидокомпозитной арматурой.

Максимальные напряжения при нагрузке 3,6 кН для образцов № 1–5 составили, соответственно (в МПа): –0,31; –0,55; –0,39; –0,50; –0,44. Наиболее быстрый рост нормальных напряжений при увеличении нагрузки наблюдался в образце № 2, самый медленный — в образце № 1.

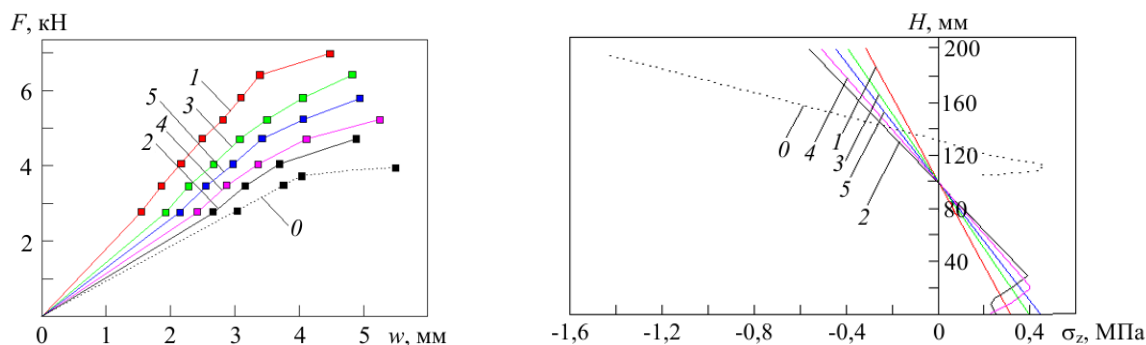


Рис. 7. Результаты численных исследований: зависимости нагрузка–прогиб (а); распределение нормальных напряжений по высоте срединного сечения балки (б) при нагрузке 3,6 кН (неармированный образец (0) и образцы усиленные: горячекатаной арматурой А400 (1), стеклопластиковой композитной арматурой (2), углеродной арматурой (3), арамидокомпозитной арматурой (4), комбинированной арматурой (сочетаются стекло и базальт) (5))

4. Выводы

Выполнена оценка эффективности использования композитных материалов в качестве армирующих элементов для повышения несущей способности систем с включением льда. В результате установлено, что поверхностное включение в лед различных материалов позволяет увеличить его прочность на 28÷86,5%.

Разрушение балочных образцов во всех случаях происходит в результате образования обширных сквозных трещин во льду, являющихся откликами на действие изгибающего момента в середине их пролета. При этом в материале арматуры предел текучести не достигается. При численных расчетах на стадии разрушения нормальные напряжения в нижней части срединного сечения образцов приближались к нулевым, и наблюдалось смещение нейтральной оси балок в сторону сжатой зоны.

Результаты модельных экспериментов и расчетов на основе конечно-элементного подхода хорошо согласуются в упругой зоне. Для образцов, усиленных каркасами из стальной арматуры А400, отклонения при сопоставлении данных не превышают 17% для прогибов и разрушающей нагрузки.

Работа является частью проекта 9.4934.2017/БЧ «Определение влияния ледовых условий на несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ», выполняемого в рамках базовой части государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

Литература

1. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 99 с.
2. *Бычковский Н.Н., Гурьянов Ю.А.* Ледовые строительные площадки, дороги и переправы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. 180 с.
3. *Qi C., Lian J., Ouyang Q., Zhao X.* Dynamic compressive strength and failure of natural lake ice under moderate strain rates at near melting point temperature // *Lat. Am. J. Solids Struct.* 2017. Vol. 14. P. 1669-1694. [DOI](#)
4. *Прокудин А.Н., Одинокоев В.И.* Численное исследование процесса разрушения ледяного покрова с учетом сжимаемости и неоднородности // *Вычисл. мех. сплош. сред.* 2013. Т. 6, № 1. С. 110-118. [DOI](#)
5. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Некоторые вопросы механики прочности морского льда // *Физ. мезомех.* 2014. Т. 17, № 6. С. 59-69. (English version [DOI](#))
6. *Schulson E.M.* Low-speed friction and brittle compressive failure of ice: fundamental processes in ice mechanics // *Int. Mater. Rev.* 2015. Vol. 60. P. 451-478. [DOI](#)
7. *Weiss J., Dansereau V.* Linking scales in sea ice mechanics // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2017. Vol. 375. 20150352. [DOI](#)

8. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами. Омск: СибАДИ, 2015. 168 с.
9. Бузник В.М., Ландик Д.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А., Черепанин Р.Н., Новиков М.М., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д., Разомасова Т.С., Устюгова Т.Г. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе ледяной матрицы // *Материаловедение*. 2017. № 2. С. 33-40. (English version [DOI](#))
10. 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. (English version [DOI](#))
11. Козин В.М., Земляк В.Л., Погорелова А.В., Матюшина А.А., Рогожникова Е.Г., Канделя М.В., Баурин Н.О., Николаев С.В. Патент РФ № 2622967 от 22.04.2016 г.
12. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 206 с.
13. Ипатов К.И., Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Исследование напряженно-деформированного состояния ледяного покрова от воздействия на него движущейся нагрузки // *Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема*. 2017. № 1(26). С. 103-113.
14. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // *IABSE reports of the working commissions*. 1974. Vol. 19. [DOI](#)
15. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. 89 с.
16. Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete // *ASCE J. Eng. Mech. Div.* 1980. Vol. 106(6). P. 1287-1306.

References

1. Voytkovskiy K.F. *Mekhanicheskiye svoystva l'da* [Mechanical properties of ice]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1960. 99 p.
2. Bychkovskiy N.N., Gur'yanov Yu.A. *Ledovyye stroitel'nyye ploshchadki, dorogi i perepravy* [Ice construction sites, roads and ferries]. Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2005. 180 p.
3. Qi C., Lian J., Ouyang Q., Zhao X. Dynamic compressive strength and failure of natural lake ice under moderate strain rates at near melting point temperature. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 2017, vol. 14, pp. 1669-1694. [DOI](#)
4. Prokudin A.N., Odinokov V.I. Numerical modeling of the destruction of ice cover taking into account compressibility and inhomogeneity. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 110-118. [DOI](#)
5. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Some aspects of strength in sea ice mechanics. *Phys. Mesomech.*, 2015, vol. 18, pp. 139-148. [DOI](#)
6. Schulson E.M. Low-speed friction and brittle compressive failure of ice: fundamental processes in ice mechanics. *Int. Mater. Rev.*, 2015, vol. 60, pp. 451-478. [DOI](#)
7. Weiss J., Dansereau V. Linking scales in sea ice mechanics. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2017, vol. 375, 20150352. [DOI](#)
8. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. *Usileniye ledovykh pereprav geosinteticheskimi materialami* [Strengthening of ice crossings by geosynthetic materials]. Омск, СибАДИ, 2015. 168 p.
9. Buznik V.M., Landik D.N., Erasov V.S., Nuzhnyi G.A., Cherepanin R.N., Novikov M.M., Goncharova G.Y., Razomasov N.D., Razomasova T.S., Ustyugova T.G. Physical and mechanical properties of composite materials on the basis of an ice matrix. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2017, vol. 8, pp. 618-625. [DOI](#)
10. Cherepanin R.N., Nuzhnyi G.A., Razomasov N.A., Goncharova G.Yu., Buznik V.M. Physicomechanical properties of glacial composite materials reinforced by Rusar-S fibers. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, pp. 114-120. [DOI](#)
11. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Pogorelova A.V., Matyushina A.A., Rogozhnikova E.G., Kandelya M.V., Baurin N.O., Nikolayev S.V. RF Patent No. 2622967, Byull. Izobret., 22 April 2016.
12. Lavrov V.V. *Deformatsiya i prochnost' l'da* [Ice deformation and strength]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969. 206 p.
13. Ipatov K.I., Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasiliev A.S. The research of stress-strain state of ice cover from the impact of a moving load. *Vestnik PGU im. Sholom-Aleykhema*, 2017, no. 1(26), pp. 103-113.
14. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *IABSE reports of the working commissions*, 1974, vol. 19. [DOI](#)
15. Klovaniich S.F., Bezushko D.I. *Metod konechnykh elementov v raschetakh prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstruksiy* [The finite element method in calculations for spatial reinforced concrete constructions]. Odessa, Izd-vo ONMU, 2009. 89 p.
16. Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete. *ASCE J. Eng. Mech. Div.*, 1980, vol. 106(6), pp. 1287-1306.

Поступила в редакцию 24.10.2018; после доработки 02.02.2019; принята к опубликованию 04.02.2019

Сведения об авторах

Ипатов Константин Игоревич, асп., Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема (ПГУ им. Шолом-Алейхема), 679015, Биробиджан, ул. Широкая, д. 70а; e-mail: Ipatov-1992@list.ru

Васильев Алексей Сергеевич, ктн, доц., ПГУ им. Шолом-Алейхема; e-mail: vasil-grunt@mail.ru

Земляк Виталий Леонидович, кфмн, проректор, ПГУ им. Шолом-Алейхема; e-mail: vellkom@list.ru