Механика деформируемого твердого тела

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1>
УДК 539.3; 539.4; 001.891.573

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

ИПАТОВ КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ – инженер-исследователь,
e-mail: Ipator-1992@list.ru

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедры,
ORCID 0000-0001-7783-0000, e-mail: vasil-grunt@mail.ru

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., проректор по научной работе
и инновациям, e-mail: vellkom@list.ru

ЛЕСКОВ ЕВГЕНИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – магистрант, e-mail: leskov95@bk.ru

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Широкая ул., 70а, Биробиджан, Еврейская автономная область, Россия, 679015

Несущая способность ледяного покрова при поверхностном армировании

Аннотация: Для сокращения транспортных маршрутов в зимний период при отсутствии мостовых сооружений организуют ледовые переправы. Если толщина ледяного покрова недостаточна для безопасной эксплуатации такой переправы, могут быть использованы стандартные методы повышения несущей способности льда. Практика показывает, что физико-механические свойства ледяного покрова, усиленного стандартными способами, недостаточно надежны и отличаются сильной зависимостью от различных внешних факторов. По этой причине возникает необходимость в разработке альтернативных методов для повышения несущей способности льда, например внедрение в лед армирующих элементов. Цель данной работы – определение влияния различных армирующих материалов на несущую способность ледяного покрова для рассматриваемых схем армирования. Модельные эксперименты проводились нами при усилении льда арматурой А400 на специально собранной установке, моделирующей условия чистого изгиба. Для этого, во-первых, выполнено сопоставление результатов экспериментального и численного исследований максимальных прогибов и несущей способности ледяных образцов, армированных стальной арматурой по предложенной схеме. Во-вторых, выполнены численные исследования прочности льда при армировании различными композиционными материалами. При проведении численных экспериментов образцы усиливались поверхностными армирующими каркасами с различными физико-механическими свойствами. Представлены результаты напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, выполненные в программном комплексе ANSYS на основе метода конечных элементов с учетом нелинейно-деформационной модели. Дана качественная и количественная оценка эффективности использования различных композитных материалов в качестве армирующих элементов. Показано, что применение армирующих материалов позволяет значительно увеличить несущую способность ледяного покрова.

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

© Ипатов К.И., Козин В.М., Васильев А.С., Земляк В.Л., Лесков Е.В., 2019

О статье: поступила: 14.02.2019; финансирование: работа выполнена в рамках проекта 9.4934.2017/БЧ «Определение влияния ледовых условий на несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ» задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу.

Введение

На сегодняшний день имеется ряд работ, посвященных исследованиям физико-механических свойств льда в различных ледовых условиях. Для определения прочностных и упругих характеристик могут быть использованы различные методы [2]: изгиб свободно лежащих балок на двух опорах; разрушение консолей (клавишей) на плаву; разрушение нагружаемой в центре круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре ледяной пластины. Бычковским и Гурьяновым [1] исследованы физико-механические характеристики льда и вопросы использования и особенностей работы ледяного покрова под воздействием движущейся нагрузки. В [9] изучались прочностные характеристики при сжатии образцов озерного льда с различной скоростью нагружения, в результате установлено влияние мелких дефектов на прочностные характеристики образцов. Из последних работ, посвященных данному вопросу, отметим исследования Гольдштейна [8] и Чалсона [10], а также Weiss J. и Dansereau V. [11], где исследовалась изменчивость механической прочности ледовых образцов в зависимости от микроструктурной неоднородности льда.

Во многих районах нашей страны транспортная инфраструктура слабо развита или полностью отсутствует. В связи с этим для доставки грузов в холодный период времени может использоваться ледяной покров рек и озер. Для этого организуется ледовая переправа. Увеличение несущей способности ледяного покрова осуществляется с помощью стандартных методов, таких как использование деревянного настила или намораживание дополнительного слоя льда. Опыт показывает, что физико-механические свойства усиленного стандартными методами ледяного покрова напрямую зависят от внешних факторов, при которых переправа сооружалась. Следовательно, с практической точки зрения актуально решение задачи повышения несущей способности льда альтернативными методами, например за счет внедрения в ледяной покров различных армирующих элементов. Ряд подобных разработок уже существует: в [6] предложен метод армирования льда геосинтетическими материалами, также известны запатентованные решения, в которых для повышения несущей способности в ледяной покров предлагается вмораживать стальные элементы [5]. Главным недостатком предлагаемых методов является требуемая большая толщина ледяного покрова (до одного метра). Более перспективным может оказаться разработанный нами метод поверхностного армирования относительно тонкого льда толщиной 0,3–0,4 м с помощью объемных каркасов из различных материалов.

Цель данной статьи – исследование влияния поверхностного армирования на несущую способность ледяного покрова, усиленного каркасами, выполненными из материалов с различными физико-механическими свойствами.

Подготовка к проведению экспериментальных и численных исследований

Физико-механические свойства ледовых образцов нами определялись в процессе модельных экспериментов, выполняемых на универсальной нагружающей установке (рис. 1).

Установка состояла из силовой рамы, нагружающего устройства и измерительного комплекса [3]. Скорость нагружения для всех образцов была постоянной: 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 (L – длина, B – ширина, H – высота). В собранную опалубку укладывалась двухслойная полиэтиленовая плёнка толщиной 0,03 мм и армирующий каркас. Армирующий каркас закреплялся в опалубке, что обеспечивало его нахождение в толще балки и исключало выход арматуры на поверхность. После этого опалубка заливалась водой. Жидкость подвергалась воздействию низких атмосферных температур ($t < 0^\circ\text{C}$) до её полного замерзания. В зависимости от погодных условий время приготовления образца составляло от 5 до 8 сут при температуре окружающей среды от -18 до -28°C . Всего было проведено три серии экспериментов для каждой из рассмотренных схем армирования. Для каждой серии приготавливалось одновременно 5 образцов при одинаковых

условиях. Данные экспериментов усреднялись, разница между результатами не превышала 15%. Влияние изменения температуры на механические характеристики образцов не исследовалось.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

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

Здесь и далее рисунки авторов.

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

Рис. 2. Схемы армирования ледяной балки:

- а – цельносварной каркас, б – цельносварной каркас, усиленный дополнительными стержнями арматуры в верхней и нижней плоскостях.

Для оценки влияния поверхностного усиления растянутой и сжатой зон на несущую способность льда в условиях чистого изгиба были проведены эксперименты по разрушению ледовых балок (рис. 3).

**Рис. 3. Разрушение ледовых балок на экспериментальной установке:
а – неармированный образец, б – образец, армированный А400
по первой схеме армирования.**

Для численных экспериментов мы использовали модель, состоящую из 80000 конечных элементов и 90000 узлов (рис. 4). Лед моделировался конечным элементом SOLID 65, реализующим расчетную модель Willam-Warnke [12], применяемую для хрупких, структурно-неоднородных материалов. Для моделирования работы армирующих материалов применялся конечный элемент BEAM188 – балочный элемент с изгибной жесткостью. Каждый продольный стержень каркаса разбивался на 200 балочных 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 армирующих элементов принята идеальной. В качестве граничных условий в ANSYS использовались опоры Remote displacement по краям балки, запрещающие перемещения вдоль осей X и Y и разрешающие их вдоль оси Z, совпадающей с продольной осью ледяного образца. Нагрузки при численном моделировании прикладывались с тем же шагом, что и при модельных экспериментах, вертикально вдоль оси Y при помощи инструмента force. С учетом нелинейной модели разрушения для улучшения сходимости применялся метод Ньютона–Раффсона с числом итераций до 1000 на каждом шаге нагружения.

Физическая нелинейность обусловлена непропорциональной связью между деформациями и напряжениями [4]:

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

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:

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

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

Рис. 4. Модель ледяной балки в ПК ANSYS:
а – конечно-элементная модель, б – приложение нагрузок.

Армированная ледяная балка представлена двумя материалами: льдом и армирующим материалом. 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 (см. таблицу): горячекатаная арматура А400 (№ 1); стеклопластиковая композитная арматура (№ 2); углеродная арматура (№ 3); арамидокompозитная арматура (№ 4); арматура, комбинированная сочетанием стекла и базальта (№ 5).

Расчетные механические характеристики стальной и композитной арматуры

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

Результаты экспериментального и численного исследования

Для исследования физико-механических свойств и оценки влияния поверхностного армирования на несущую способность образцов нами была проведена предварительная серия экспериментов по нагружению неармированных ледовых балок, см. рис. 5 [3].

Рис. 5. Диаграмма зависимости прогиба армированного образца от нагрузки
(▲ – результаты эксперимента, ■ – результаты численного расчета ANSYS Workbench 17.2).

Для проверки работоспособности модели в программном комплексе ANSYS были выполнены сопоставления результатов модельных экспериментов и численных расчетов образцов, усиленных арматурой А400. На графике (см. рис. 6,а,б) представлены данные результатов мо-

дельных экспериментов рассматриваемых схем армированных образцов в сравнении с результатами численных расчетов. Очевидно, что для обеих схем результаты достаточно хорошо коррелируют, особенно в упругой зоне. При этом очевидно, что применение дополнительной арматуры в верхней и нижней плоскостях по сравнению с первой схемой армирования увеличивают несущую способность образцов на 15–20%, а пластичность – примерно на 45%.

Рис. 6. Сопоставление результатов эксперимента и численного расчета:
а – схема из цельносварного каркаса; б – схема из цельносварного каркаса, усиленного
дополнительными стержнями арматуры в верхней и нижней плоскостях.

Как можно заметить, результаты модельных экспериментов и численных расчетов хорошо согласуются в упругой зоне. За критерий разрушения балки был принят резкий рост деформаций, вызванный разрушением большей части сечения и потерей несущей способности образца. При этом арматура не достигала предела текучести, а разрушение происходило с образованием обширных сквозных трещин во льду в результате нарушения прочности нормальных сечений пролета балки (рис. 7).

Рис. 7. Схема трещин, представленная в соответствии с критерием Базанта [7],
в образце № 1 при разрушении.

Основные результаты численных расчетов для первой схемы армирования показаны на рисунке (см. рис. 8,а), где представлены графики зависимости нагрузки от прогиба для образцов, армированных различными материалами. На рис. 8,б представлены напряжения в срединных сечениях каждого из армированных различными композиционными материалами образцов.

Рис. 8. Результаты численных исследований для первой схемы армирования с различными композитными материалами:
а – нагрузка-прогиб, б – распределение нормальных напряжений по высоте сечения балки при нагрузке 3,6 кН.

Как показывает график «нагрузка-прогиб», армирование различными материалами по первой схеме увеличивают несущую способность ледяного покрова от 28 до 86,5%. Максимальные напряжения (рис. 8,а) при нагрузке 3,6 кН для образцов № 1–5 составили соответственно –0,31 МПа; –0,55; –0,39; –0,50; –0,44 МПа. Наиболее быстрый рост нормальных напряжений при увеличении нагрузки наблюдался в образце № 2, а наиболее медленный – в № 1.

Основные результаты численных расчетов для второй схемы (цельносварной каркас, усиленный дополнительными стержнями арматуры в верхней и нижней плоскостях), представлены рис. 9 – графиками зависимости нагрузки от прогиба для образцов, армированных различными материалами, а также нормальными напряжениями материала льда по высоте сечения.

Анализ данных показывает, что использование армирующих каркасов из различных композитных материалов приводит к существенному увеличению несущей способности льда. Образец, армированный стальной арматурой А400, показал наибольшую (по сравнению с неармированным образцом) несущую способность. Наименьшей несущей способностью обладали образцы, усиленные стеклопластиковой и арамидокompозитной арматурой. Максимальные напряжения при нагрузке 3,6 кН для образцов № 1–№ 5 составили соответственно –0,31 МПа; –0,39; –0,32; –0,37; –0,34 МПа. Отметим, что при одной и той же нагрузке 3,6 кН (нагрузка разрушения неармированного образца) нормальные напряжения для второй схемы армирования в среднем на 30% ниже, чем результаты первой схемы.

Рис. 9. Результаты численных исследований для второй схемы армирования с различными композитными материалами:
а – нагрузка-прогиб, б – распределение нормальных напряжений по высоте сечения балки при нагрузке 3,6 кН.

Заключение и дальнейшие направления исследования

Результаты модельных экспериментов и численных расчетов для обеих представленных схем армирования хорошо согласуются в упругой зоне. Для образцов, усиленных каркасами из стальной арматуры А400, отклонения при сопоставлении данных не превысили 17% для прогибов и разрушающей нагрузки. Это значит, что данную модель можно использовать для расчета армированного льда при известных механических характеристиках материалов.

1. Дана оценка эффективности использования различных материалов в рассматриваемых схемах усиливающих каркасов для повышения несущей способности и пластичности ледяного покрова. Цельносварной каркас, усиленный дополнительными стержнями арматуры в верхней и нижней плоскостях, показал увеличение несущей способности по сравнению с неусиленным цельносварным каркасом примерно на 20% (в целом по каждому армирующему материалу), а также заметный рост пластических свойств армированного льда (примерно на 50%).

2. Установлено, что использование поверхностного армирования льда различными материалами позволяет увеличить несущую способность от 28 до 86,5% для первого вида каркасов и от 65 до 99% – для второго их вида.

3. В дальнейшем планируется проведение модельных экспериментов со стеклопластиковой арматурой, а также поперечно расположенными пластинами в качестве усиливающих элементов. Результаты полученных экспериментальных данных планируется сопоставить с численными исследованиями. Также в дальнейшем будет смоделировано и исследовано численно армированное ледовое поле на упругом основании при движущейся по нему нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычковский Н.Н., Гурьянов Ю.А. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. 180 с.
2. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М.: АН СССР, 1960. 99 с.
3. Ипатов К.И., Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова от воздействия на него движущейся нагрузки // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. Физико-математические науки. 2017. № 1(26). С. 103–113.
4. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. 89 с.
5. Пат. РФ № 2622967 Российская Федерация. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, А.В. Погорелова и др.; опубл. 22.04.2016.
6. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами, Омск: СибАДИ, 2015. 168 с.
7. Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete. J. of the Engineering Mechanics Division. 1980(106);EM6:1287–1306.
8. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Some aspects of strength in sea ice mechanics. Physical Mesomechanics. 2015;18(2):139–148. DOI: 10.1134/S102995991502006X
9. Qi C.F., Lian J.J., Ouyang Q.N., Zhao X. Dynamic Compressive Strength and Failure of Natural Lake Ice under Moderate Strain Rates at Near Melting Point Temperature. Latin American J. of Solids and Structures. 2017;14(9):1669–1694. DOI: 10.1590/1679-78253907
10. Schulson E.M. Low-speed friction and brittle compressive failure of ice: fundamental processes in ice mechanics. International materials reviews. 2015;60(8):451–478. DOI: 10.1179/1743280415Y.0000000010
11. Weiss J., Dansereau V. Linking scales in sea ice mechanics. Philosophical transactions of the royal society a-mathematical physical and engineering sciences. 2015;375(2086), N 20150352. DOI: 10.1098/rsta.2015.0352
12. Willam K.J., Warnke K.J. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. Seminar of concrete structures subjected to triaxial stresses. Bergamo, Italy. 1974;19:3–11.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1>

Ipatov K., Vasilyev A., Zemlyak V., Leskov E.

KONSTANTIN IPATOV, Engineer Researcher, e-mail: Ipatov-1992@list.ru
 ALEXEY VASILYEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
 ORCID 0000-0001-7783-0000, e-mail: vasil-grunt@mail.ru
 VITALIY ZEMLYAK, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Deputy Rector,
 e-mail: vellkom@list.ru
 EVGENIY LESKOV, Master Student, e-mail: leskov95@bk.ru
Sholom-Aleichem Priamursky State University
 70-a Shirokaya St., Birobidzhan, Russia, 679015

Carrying capacities of the ice cover with surface reinforcement

Abstract: Practical experience shows, that mechanical properties of the ice cover are unreliable and can depend on various external factors if it is reinforced by traditional methods. For this reason, there is a need to develop alternative methods to increase the bearing capacity of ice, for example, the introduction of reinforcing elements into ice. The aim of the study was to compare the results of experimental and numerical research of the maximum deflections and bearing capacity of reinforced ice samples. Model experiments were carried out with ice reinforced with A400 steel on a specially assembled installation simulating pure bending conditions. When carrying out numerical experiments, the samples were reinforced with surface reinforcing frames with different physical-mechanical properties. The results of the stress-strain state of the ice cover are presented in the ANSYS program complex on the basis of the finite element method taking into account the physically nonlinear deformation model. The paper gives a qualitative and quantitative assessment of the effectiveness of the use of various composite materials, such as reinforcing elements. It is shown that the use of reinforcing materials to strengthen the ice cover significantly increases its bearing capacity.

Keywords: surface reinforcement, composite material, ice beam, model experiment, numerical research.

REFERENCES

1. Bychkovsky N.N., Guryanov Y.A. Ice construction sites, roads and ferries. Saratov, Saratov State Technical Univ., 2005, 180 p.
2. Voytkovsky K.F. Mechanical properties of ice. M., Academy of Sciences of the USSR, 1960, 99 p.
3. Ipatov K.I., Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S. The research of stress-strain state of ice cover from the impact of a moving load. Bulletin of the Amur State University. Physics and Mathematics. 2017(1);26:103–113.
4. Klovanih S.F., Bezushko D.I. Using Finite element method in calculations for spatial reinforced concrete constructions. Odessa, Publishing House of Odessa National Maritime Univ., 2009, 89 p.
5. Patent for invention Russian Federation/ N 2622967. V.M. Kozin, V.L. Zemlyak, A.V. Pogorelova et al. Method of increasing the carrying capacity of the ice cover, Publ. 22.04.2016.
6. Yakimenko O.V., Sirotuk V.V. Strengthening of ice crossings by geosynthetic materials. Omsk, SibADI, 2015, 168 p.
7. Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete. J. of the Engineering Mechanics Division. 1980(106);EM6:1287–1306.
8. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Some aspects of strength in sea ice mechanics. Physical Mesomechanics. 2015;18(2):139–148. DOI: 10.1134/S102995991502006X
9. Qi C.F., Lian J.J., Ouyang Q.N., Zhao X. Dynamic Compressive Strength and Failure of Natural Lake Ice Under Moderate Strain Rates at Near Melting Point Temperature. Latin American J. of Solids and Structures. 2017;14(9):1669–1694. DOI: 10.1590/1679-78253907

10. Schulson E.M. Low-speed friction and brittle compressive failure of ice: fundamental processes in ice mechanics. *International materials reviews*. 2015;60(8):451–478. DOI: 10.1179/1743280415Y.0000000010
11. Weiss J., Dansereau V. Linking scales in sea ice mechanics. *Philosophical transactions of the royal society a-mathematical physical and engineering sciences*. 2015;375(2086), number of paper 20150352. DOI: 10.1098/rsta.2015.0352
12. Willam K.J., Warnke K.J. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *Seminar of concrete structures subjected to triaxial stresses*. Bergamo, Italy. 1974;19:3–11.