Строительные материалы и изделия

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-10>

УДК 620.1.08:624.145:691.322

Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников, А.А. Скляров, Н.С. Назаренко

УВАРОВА ТАТЬЯНА ЭРИКОВНА – д.т.н., профессор (автор, ответственный за переписку),
SPIN: 6005-1621, ResearcherID: G-7681-2016, ORCID: orcid.org/0000-0002-9147-5145,
ScopusID: 7003267351, uvarova.tye@dvfu.ru

ПОМНИКОВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ – к.т.н., зав. лабораторией, SPIN: 6250-4710,
pomnikov.ee@dvfu.ru

СКЛЯРОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – аспирант, skliarov.aa@dvfu.ru

НАЗАРЕНКО НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ – аспирант, nazarenko_nse@dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Влияние твердости бетона на его сопротивление ледовой абразии

Аннотация: Предшествующая авторская разработка метода применения твердометрии для оценки сопротивления бетона истирающему воздействию льда позволила обосновать возможность использования этого метода для получения прямого количественного показателя стойкости бетона к ледовой абразии. В настоящей статье предпринята попытка определить сопротивление ледовой абразии всех структурных элементов состава бетона как в отдельности, так и совместно, с возможностью дальнейшего управления сопротивлением бетонных сооружений истиранию льдом. Выполнено обоснование методики представления результатов измерения твердости поверхности бетонных образцов и даны рекомендации по их статистической обработке. Представлена номограмма сопротивления бетона ледовой абразии в зависимости от твердости цементного камня и в зависимости от твердости бетона по всей поверхности образца (общая твердость бетона). Проведенные авторами испытания твердости различных составов бетона позволили сопоставить оценку твердости и сопротивления ледовой абразии, на этом основании появилась возможность прогнозировать сопротивление ледовой абразии бетонов, которые следует применять в зоне ледовых воздействий инженерных сооружений.

Ключевые слова: твердость, бетон, истирание, долговечность, ледовое воздействие

Введение

Эксплуатация бетонных оснований гравитационного типа на шельфе ледовитых морей с высокой динамикой дрейфа ледяного покрова сопряжена с рядом проблем. Одна из них – абразивный износ бетона конструкции, представляющий опасность оголения арматуры и ее ускоренную коррозию в морской среде, потерю толщины и прочности конструктивных элементов.

Вследствие высоких контактных давлений при взаимодействии дрейфующего льда с поверхностью бетонных сооружений происходит разрушение цементного камня, что приводит к увеличению пористости, потере заполнителя и уменьшению прочности бетона, а действие окружающей среды, обусловленное циклами замораживания–оттаивания, способствует постепенному ослаблению вяжущих и заполнителей поверхностного слоя и приводит к его разрушению. Поэтому сопротивление абразии определяется не каким-то одним структурным элементом бетона, а всей системой структурных параметров. Эти элементы должны рассматриваться во взаимной обусловленности, так как изменение параметров одного элемента обязательно влияет на условия формирования и параметры других.

Отсюда следует, что решение задачи управления сопротивлением ледовой абразии бетона основывается на учете действия каждого элемента в отдельности, а также на регулировании взаимосвязей между ними, исходя из представлений о структуре как единой взаимосвязанной системе.

Shamsutdinova G. и др. [5], испытывая бетон на абразивном станке, выявили, что водонасыщенные образцы бетона имеют больший износ, чем сухие. Barker A. и др. [3], применив установку направленного сдвига, определили, что использование высокопрочного бетона может уменьшить износ бетона за счет снижения скорости истирания цементного камня. Вершинин С.А. [2], проводивший эксперименты на абразивном стенде *Böhme* (стандарт DIN 52108) в соответствии с требованиями ГОСТ 3647-80, на основании полученных опытных данных рассчитал значения коэффициента истираемости бетона. Следует заметить, что на сегодняшний момент описать, как процесс истирания инициируется льдом, практически не представляется возможным.

Во всех проведенных исследованиях отмечалось, что износ структурных элементов бетона различен, однако не выявлено влияние истираемости каждого из этих элементов на общий износ испытываемого образца. Таким образом, следует предположить, что применение метода твердометрии позволит определить это влияние: в дальнейшем это знание планируется использовать для конструирования составов бетона с заданными параметрами его устойчивости к истиранию льдом.

Для проверки гипотезы о возможной связи твердости бетона с его сопротивлением ледовой абразии в лаборатории МНОЦ «Арктика» ДВФУ авторами проведены экспериментальные исследования твердости образцов бетона, для которых предварительно были определены параметры конструктивных свойств и стойкость к ледовой абразии. В результате выполнено ранжирование основных свойств бетонов по тесноте связи с твердостью и интенсивностью ледовой абразии, предложена общая модель интенсивности ледовой абразии в зависимости от твердости и конструктивных свойств бетона, представлены номограммы интенсивности ледовой абразии от твердости.

Испытание на твердость поверхности бетонных образцов

Описанный ниже эксперимент проведен в ледовой лаборатории МНОЦ «Арктика» с мая по октябрь 2018 г. Для целей определения твердости отдельных структурных элементов бетона использовался метод Роквелла. Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм. В зависимости от формы индентора и прилагаемой нагрузки введены измерительные шкалы. В работе [1] обоснованы параметры процесса измерения твердости по методу Роквелла, а именно нормативная нагрузка 15 кгс, индентор с шариковым наконечником диаметром 1,58 мм, которому соответствует шкала В, интервал между точками измерения 2,5 мм.

Число твердости по Роквеллу обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, со стоящим после них символом HRB 15, что обозначает следующее: твердость измеряется по методу Роквелла – HR, по шкале – В, с нормативной нагрузкой 15 кгс.

По разработанной в [4] методике определения твердости бетона нами были испытаны образцы трех разных классов: В30, В60 и В90. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Данные, представленные на рис. 1, позволяют заключить, что твердость крупного заполнителя всех трех классов бетона остается одинаковой для каждого из образцов, что объясняется использованием одного и того же заполнителя для всех классов бетона. Твердость крупного заполнителя в среднем составляет 91,4 HRB 15. Твердость цементного камня у состава 1 (В30) самая низкая, затем возрастает примерно пропорционально прочности бетонных образцов.

Таблица 1

Результаты испытания бетона на твердость

Состав 1	Образец	Заполнитель	Цементный камень	Общая
	1	92,35	45,81	65,66
	2	93,50	44,92	72,71
	3	91,49	45,62	66,32
	4	90,21	47,12	63,15
	5	91,69	42,06	62,88
	Среднее	91,85	45,11	66,14
Состав 2	6	89,03	61,21	72,00
	7	91,64	70,28	78,61
	8	88,27	62,69	73,87
	9	92,45	60,81	70,12
	10	93,42	66,01	78,61
	Среднее	90,96	64,20	74,64
Состав 3	11	89,55	59,65	70,59
	12	91,20	70,79	76,29
	13	91,98	69,89	77,46
	14	90,42	58,60	69,55
	15	93,55	64,65	73,59
	Среднее	91,34	64,72	73,50

Рис. 1. Результаты испытания бетона на твердость.

Определение взаимосвязи между твердостью и свойствами бетона

Оценка возможной взаимосвязи структурных свойств бетона и полученной твердости (табл. 1) производилась на основе корреляционного анализа данных. В процессе анализа определяется возможная взаимосвязь твердости с каждым параметром структурных свойств бетона.

На первом этапе анализа следует определить наличие взаимосвязи между твердостью и свойствами бетона (рисунки 2 и 3). При наличии связи необходимо оценить, в какой мере тесно взаимосвязана твердость с исследуемыми свойствами бетона. Для этого используется парный коэффициент корреляции. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Корреляционный анализ взаимосвязи твердости и физико-механических свойств бетона

Свойства бетона/ твердость	Заполнитель	Цементный камень	Общая
Рсж, МПа	-0,159	0,870	0,654
Рраст, МПа	-0,097	0,723	0,506
Еσ, ГПа	-0,178	0,903	0,693
W, марка	-0,227	0,732	0,649

а

б

Рис. 2. Зависимость:

а – твердости и модуля упругости, б – твердости и марки водонепроницаемости.

а

б

Рис. 3. Зависимость:

**а – твердости и прочности бетона на растяжение при изгибе,
б – твердости и прочности бетона на сжатие (28 дней).**

Качественная оценка тесноты связи параметров определялась по шкале Чеддокса в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Качественная оценка тесноты связи

Значение коэффициента корреляции	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–0,7	0,7–0,9	0,9–1,0
Характеристика силы связи	Слабая	Умеренная	Заметная	Высокая	Весьма высокая

По данным табл. 2 прослеживается заметная корреляция между твердостью и рассматриваемыми свойствами бетона. Обратная и слабая корреляция просматривается у конструктивных свойств бетона с твердостью заполнителя: можно сказать, что твердость заполнителя и характеристики бетона не взаимосвязаны. Весьма высокая связь наблюдается у твердости и модуля упругости. Результатом корреляционного анализа можно считать следующее ранжирование свойств по значимости (в убывающем порядке): $E\sigma$ – модуль упругости, $R_{сж}$ – прочность на одноосное сжатие, W – марка бетона по водонепроницаемости, $R_{раст}$ – прочность на растяжение при изгибе.

Таким образом, на основании анализа результатов исследований можно сделать вывод, что твердость цементного камня имеет высокую взаимосвязь со свойствами бетона и является определяющей при назначении требований к классам бетона, в то время как общая твердость образца имеет меньшую взаимосвязь со свойствами бетона, что обусловлено неизменной твердостью заполнителя.

Определение взаимосвязи между твердостью и сопротивлением бетона ледовой абразии

При движении ледяных образований относительно сооружения происходит эрозия поверхности и абразивное разрушение материала корпуса. Причина разрушения поверхности железобетонных конструкций от абразивного воздействия ледяных образований связана с возникновением значительных пульсирующих давлений в зоне контакта бетона с дрейфующим ледяным покровом. В этом случае кристаллы льда являются хорошим абразивом, что способствует износу поверхности материала конструкции и постепенному уменьшению сечения сооружения. Под термином «ледовая абразия» следует понимать разрушение материала конструкции в опасной зоне истирания в процессе взаимодействия дрейфующих ледяных образований с сооружением. Для обеспечения безопасной эксплуатации морских инженерных сооружений необходимо оценить глубину ледовой абразии.

Количественными показателями ледовой абразии являются:

- глубина ледовой абразии – это изменение (износ) поверхности сооружения в результате истирающего воздействия льда (мм);
- интенсивность ледовой абразии – глубина ледовой абразии за единицу длины пути взаимодействия (мм/км);
- скорость ледовой абразии – глубина ледовой абразии за единицу времени (мм/с).

Проблема сопротивления материала ледовой абразии решается путем проведения экспериментальных исследований различных материалов, на основе которых определяется эмпирическая зависимость интенсивности ледовой абразии от основных параметров, вызывающих абразию материала (контактное давление, температура льда и воздуха, путь истирания, а именно относительное перемещение при взаимодействии бетонного образца и ледяного блока за время испытания). Эмпирическая модель ледовой абразии уникальна для каждого испытываемого материала (с соответствующими ему физико-механическими свойствами), характеризует способность материала сопротивляться ледовым истирающим воздействиям и отражает физические процессы абразии.

В лаборатории МНОЦ «Арктика» ДВФУ были проведены испытания трех классов бетона В30, В60 и В90 на сопротивление ледовой абразии.

В результате статистической обработки данных лабораторных испытаний получены эмпирические зависимости интенсивности ледовой абразии (рис. 4).

Эмпирические зависимости интенсивности ледовой абразии для бетонов В30, В60 и В90 имеют следующий вид:

$$\text{Бетон В30} \quad \delta' = 14,47(|T|/\sigma)^{-1,005} \quad (1)$$

$$\text{Бетон В60} \quad \delta' = 9,45(|T|/\sigma)^{-1,103} \quad (2)$$

$$\text{Бетон В90} \quad \delta' = 9,50(|T|/\sigma)^{-1,075} \quad (3)$$

В соответствии с предложенным видом эмпирических зависимостей общее уравнение модели интенсивности ледовой абразии можно записать в виде

$$\delta' = K1 (|T| / \sigma)^{K2} . \quad (4)$$

Рис. 4. Эмпирические зависимости интенсивности ледовой абразии для бетонов составов 1–3.

С целью определения влияния твердости бетона на его сопротивление ледовой абразии в данной работе были получены функциональные зависимости коэффициентов $K1$ и $K2$ от твердости бетона. В результате статистической обработки данных по твердости бетонов с учетом эмпирических зависимостей (1)–(3) были получены функциональные зависимости коэффициентов $K1$ и $K2$ для модели интенсивности ледовой абразии в соответствии с формулой (4), которые представлены в табл. 4.

Таблица 4

Функциональные зависимости коэффициентов в модели интенсивности ледовой абразии

Параметр	$K1$	$K2$
Твердость заполнителя H_z	$K1=0,316H_z-17,768$	$K2=0,006H_z-1,611$
Твердость цементного камня $H_{ц}$	$K1=-0,222H_{ц}+24,002$	$K2=-0,004H_{ц}-0,846$
Общая твердость H	$K1=-0,345H+35,798$	$K2=-0,006H-0,632$

Данный подход, а именно определение функциональных зависимостей коэффициентов $K1$ и $K2$, в модели интенсивности ледовой абразии в соответствии с формулой (4) от твердости бетона позволяет оценить влияние отдельных структурных элементов бетона на интенсивность ледовой абразии.

На основе корреляционного анализа была определена теснота связи твердости и функциональных зависимостей коэффициентов $K1$ и $K2$ для трех структурных составляющих бетона. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Корреляционный анализ взаимосвязи твердости и структурных составляющих поверхности бетона

Коэффициенты/твердость	Твердость заполнителя H_z	Твердость цементного камня $H_{ц}$	Общая твердость H
$K1$	0,211	-0,927	-0,740
$K2$	0,229	-0,885	-0,736

На основе корреляционного анализа (табл. 5) можно сделать вывод, что твердость цементного камня имеет весьма высокую корреляцию с коэффициентом K1 и высокую корреляцию с коэффициентом K2. Твердость заполнителя не взаимосвязана с коэффициентами. Общая твердость показывает высокую взаимосвязь с функциональными коэффициентами, но она несколько ниже, чем твердость цементного камня, что обусловлено неизменной твердостью крупного заполнителя.

Таким образом, наиболее сильное влияние на сопротивление ледовой абразии оказывает твердость цементного камня, при этом наблюдается высокая связь со средней твердостью бетона, что позволяет сделать вывод: испытания на твердость бетона можно рассматривать как альтернативный способ определения стойкости бетона к ледовой абразии.

В соответствии с предложенной моделью интенсивности ледовой абразии и полученным в результате статистической обработки функциональным коэффициентом твердости цементного камня и общей твердости бетона можно записать следующие уравнения:

$$\text{Твердость цементного камня } H_{ц} \quad \delta' = (0,222H_{ц} + 24,002) (|T|/\sigma)^{(0,006H_{ц} - 1,611)} \quad (5)$$

$$\text{Общая твердость бетона } H \quad \delta' = (-0,345H + 35,798) (|T|/\sigma)^{(-0,006H - 0,632)} \quad (6)$$

На основе уравнений (5) и (6) построены номограммы зависимости интенсивности ледовой абразии от твердости (рис. 5).

Рис. 5. Номограммы: а – сопротивления бетона ледовой абразии в зависимости от твердости цементного камня, б – сопротивления бетона ледовой абразии в зависимости от общей твердости образца.

Для оценки сопротивления материала ледовой абразии необходимо выполнить испытание бетона на твердость и по результатам испытаний по номограммам определить интенсивность ледовой абразии.

Для уточнения данных номограмм необходимо испытать большее количество бетонных образцов с различными показателями твердости и сопротивлением ледовой абразии.

Закключение

На основании полученных результатов мы сможем прогнозировать сопротивление ледовой абразии других бетонов. Испытания твердости различных классов бетона позволили провести сопоставительную оценку твердости и сопротивления ледовой абразии. В результате установлена зависимость интенсивности ледовой абразии от твердости структурных элементов бетона и параметров воздействия льда (температуры и давления).

В дальнейших исследованиях планируется представить обоснование методики определения твердости как альтернативного способа конструирования составов бетона, стойких к

истирающему воздействию льда, что обусловлено весьма высокой корреляцией твердости цементного камня и интенсивности ледовой абразии. Таким образом, для увеличения сопротивляемости бетона истирающему воздействию льда следует обратить внимание на увеличение твердости цементного камня. В настоящее время проводятся испытания различных составов бетонов на сопротивление ледовой абразии с целью проверки воспроизводимости результатов исследований и сбора необходимого количества статистических данных для представления обоснованных зависимостей и рекомендаций.

Вклад авторов в статью: Т.Э. Уварова – общее руководство работой и статистическая обработка результатов исследований по ледовой абразии, Е.Е. Помников – расчет эмпирических моделей интенсивности ледовой абразии и номограмма сопротивления бетона ледовой абразии в зависимости от твердости, А.А. Складаров – проведение испытаний твердости образцов бетона и статистическая обработка результатов исследований по твердости, Н.С. Назаренко – адаптация метода твердометрии к оценке твердости бетонных образцов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Славчева Г.С., Помников Е.Е., Складаров А.А. Применение твердометрии для оценки сопротивления бетона ледовой абразии морских гидротехнических сооружений // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2018. № 1(34). С. 46–55. DOI.org/10.5281/zenodo.1204714
2. Вершинин С.А., Зуев Н.Д., Шунько Н.В. Исследования истирания бетона сооружений континентального шельфа // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 81–87.
3. Barker A., Bruneau S., Colbourne B. Adhesion of Ice to Concrete: Bonds and their Influence on Abrasion Mechanisms. Proc. 25th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2019, June 9–13, Delft, 9 p.
4. Sklyarov A., Uvarova T., Slavcheva G., Pomnikov E. Hardmetry Method for Assessing the Concrete Resistance to Aggressive Ice Impacts. Proc. 24th IAHR Int. Symp. on Ice. Vladivostok, 2018, June 4–9, p. 434–441.
5. Shamsutdinova G., Hendriks M.A.N., Jacobsen S. Concrete-Ice Abrasion Laboratory Experiments. Proc. 24th Int. conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 11–16 2017, Busan, 6 p.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 4/45

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-10>

Uvarova T., Pomnikov E., Sklyarov A., Nazarenko N.

TATYANA UVAROVA, Doctor of Engineering Sciences, Professor (corresponding author),
ORCID: 0000-0002-9147-5145, ResearcherID: G-7681-2016, ScopusID: 7003267351,
uvarova.tye@dvfu.ru

EGOR POMNIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Ice laboratory,
pomnikov.ee@dvfu.ru

ALEXEY SKLYAROV, Postgraduate student, sklyarov.aa@students.dvfu.ru

NIKITA NAZARENKO, Postgraduate student, nazarenko_nse@dvfu.ru

Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Influence of concrete hardness on it resistance to ice abrasion

Abstract: The previous development of the methodology for applying the method of hardness testing to assess the resistance of concrete to the abrasive effect of ice made it possible to justify the possibility of using hardness testing as a method of obtaining a direct quantitative indicator of the resistance of concrete to ice abrasion.

In this paper the methodology for applying the method of hardness testing was improved in the framework of the presentation of the research results and their statistical treatment. The paper presents a nomogram of the ice resistance to ice abrasion of concrete surface depending on the hardness of the cement stone and hardness of concrete along all surface of the sample (total hardness of concrete). The tests of the hardness of various concrete compositions carried out by the authors made it possible to compare the assessment of the hardness and resistance to ice abrasion. On this basis it became possible to predict the resistance to ice abrasion of concrete, which should be used in the zone of ice influence on engineering structures.

Keywords: hardness, concrete, abrasion, durability, ice influence

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Article: received: 21.01.2020; reviewed: 24.03.2020; accepted: 19.06.2020; financing: Far Eastern Federal University.

REFERENCES

1. Bekker A., Uvarova T., Slavcheva G., Pomnikov E., Sklyarov A. Hardness testing as a method to evaluate the resistance of concrete to ice abrasion in marine hydraulic structures. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2018(34):46–55. DOI.org/10.5281/zenodo.1204714
2. Vershinin C.A., Zuev N.D., Shunko N.V. Continental Shelf Concrete Abrasion Studies. Vestnik MGSU. 2011(5):81–87.
3. Barker A., Bruneau S., Colbourne B. Adhesion of Ice to Concrete: Bonds and their Influence on Abrasion Mechanisms. Proc. 25th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2019, June 9–13, Delft, 9 p.
4. Sklyarov A., Uvarova T., Slavcheva G., Pomnikov E. Hardmetry Method for Assessing the Concrete Resistance to Aggressive Ice Impacts. Proc. 24th IAHR Int. Symp. on Ice. Vladivostok, 2018, June 4–9, p. 434–441.
5. Shamsutdinova G., Hendriks M.A.N., Jacobsen S. Concrete-Ice Abrasion Laboratory Experiments. Proc. 24th Int. conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 11–16 2017, Busan, 6 p.