

DOI.org/10.5281/zenodo.1204714
УДК 620.1.08:624.145:691.322

А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Г.С. Славчева, Е.Е. Помников, А.А. Скляр

БЕККЕР АЛЕКСАНДР ТЕВЬЕВИЧ – д.т.н., член-корреспондент РААСН, профессор, директор Инженерной школы, e-mail: bekker.at@dvfu.ru

УВАРОВА ТАТЬЯНА ЭРИКОВНА – д.т.н., доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы, e-mail: uvarova.tye@dvfu.ru

ПОМНИКОВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ – к.т.н., заведующий ледовой лабораторией Инженерной школы, e-mail: pomnikov.ee@dvfu.ru

СКЛЯРОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – аспирант кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы, e-mail: skliarov.aa@students.dvfu.ru

Дальневосточный федеральный университет

ул. Суханова, 8, Владивосток, 690091

СЛАВЧЕВА ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА – д.т.н., профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, e-mail: gslavcheva@yandex.ru

Воронежский государственный технический университет

ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394008

Применение твердомерии для оценки сопротивления бетона ледовой абразии морских гидротехнических сооружений

Аннотация: Основным фактором, влияющим на надежность морских ледостойких платформ, является ледовый режим акватории в районе строительства и как результат – ледовые нагрузки и воздействия на сооружение. Одно из них в акваториях с динамичным режимом дрейфа ледяного покрова – истирающее воздействие льда (абразия). Износ бетона от действия дрейфующего ледяного покрова способствует потере толщины бетонных элементов конструкции в зоне переменного уровня, вызывает опасность оголения арматуры и ее ускоренную коррозию в морской среде, следовательно, может привести к уменьшению прочностных характеристик этих конструктивных элементов. Задача повышения сопротивления бетонов истирающим воздействиям ледяного покрова напрямую связана с исследованиями их износостойкости и определением требований к составу и структуре бетонов, эксплуатируемых в ледовитых морях.

В статье обоснованы предпосылки использования твердомерии для оценки стойкости бетона к ледовой абразии как метода получения независимого прямого количественного показателя сопротивления, соотносимого с процессами разрушения бетона при ледовой абразии, и не зависящего от параметров ледовых воздействий.

Оценены возможности применения и адаптации существующих методов твердомерии для бетона как хрупкого неоднородного материала. Обсуждается обоснование оптимального метода, процедуры и алгоритма оценки твердости бетона, представлены результаты испытаний тестовых образцов, доказывающих возможность определения интегральной характеристики твердости бетона на основании статистически достоверной оценки твердости каждого его структурного элемента.

Для прогнозирования и регламентации сопротивления бетона ледовой абразии в дальнейшем предполагается выявление взаимосвязи между интегральным показателем твердости поверхности бетона и величинами глубины ледовой абразии с учетом варьирования скорости, температуры и давления льда, измеренными с 2007 по 2014 г. на специальной установке для исследования истирающих воздействий льда на различные типы строительных материалов.

Ключевые слова: твердометрия, твердость, абразия, бетон, гидротехнические сооружения, метод оценки.

Введение

Проблема надежности и долговечности технических средств освоения морских месторождений нефти и газа в последние десятилетия – одна из актуальных в мире. Основной эксплуатационный фактор, влияющий на надежность таких сооружений в районах Арктики, – ледовый режим морских акваторий и как результат – ледовые нагрузки и воздействия на сооружения. Практический опыт их эксплуатации показывает, что есть вероятность потери несущей способности конструкции (элемента конструкции) от сравнительно умеренных воздействий большой повторяемости. В результате динамических воздействий поверхность, контактирующая со льдом, постоянно подвергается ледовой абразии (истиранию), что может привести к обнажению арматуры, изменению сечения и к потере несущей способности сооружения в целом.

Результаты долгосрочных исследований ледяного покрова и его воздействий на гидротехнические сооружения позволяют сделать вывод о том, что проблема ледовой абразии может быть разделена на две части [6]:

- ледовые воздействия, вызывающие абразию, основные: контактное давление, время и скорость взаимодействия, прочностные характеристики льда;
- сопротивление материала истирающему воздействию льда.

В настоящее время выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований по первой части проблемы ледовой абразии [5, 8–10]. В результате накоплен значительный опыт моделирования ледовых воздействий и прогнозирования технического состояния морских инженерных сооружений в различных расчетных ситуациях.

По второй части проблемы пока не удалось получить обоснованного теоретического описания контактных явлений. Поэтому проводятся экспериментальные исследования процесса ледовой абразии, которые позволили получить эмпирические модели сопротивления бетона ледовой абразии [6, 7], отражающие интенсивность процесса износа бетона в зависимости от его прочности и от основных параметров ледовых воздействий.

Однако вторая часть проблемы, связанная с природой сопротивления материалов ледовой абразии и механизмами разрушения, в настоящее время в теоретическом плане исследована недостаточно и поэтому требует глубокого анализа и дополнительных исследований. Накопленные экспериментальные данные позволяют оценивать степень сопротивления бетона ледовой абразии по одному параметру – его прочности. На этом основании появились первые рекомендации международного нормативного документа: для обеспечения достаточного сопротивления ледовой абразии необходимо регламентировать прочность бетона (не менее 70 МПа) [2].

По нашему мнению, стандартные механические характеристики бетона, в том числе прочность, на данном этапе пока нельзя отнести к прямым количественным характеристикам сопротивления бетона абразии. Методы испытаний образцов бетона на прочность не отображают реальные процессы, происходящие в зоне контакта льда и бетона при их взаимодействии. Явления, сопровождающие процесс истирания бетона льдом, изучены пока недостаточно.

Для регламентации сопротивления бетона ледовой абразии, прогнозирования его поведения необходимы дополнительные исследования механизмов разрушения бетона, на основании которых необходимо получить адекватные количественные показатели сопротивления.

Анализ комплекса существующих методов оценки механических испытаний материалов позволил обратить внимание на твердометрию как на перспективный метод для оценки степени сопротивления материалов ледовой абразии. Однако существующие методы твердометрии разра-

ботаны и широко используются для оценки твердости металлов, т.е. однородных материалов с характерными для них упругопластическими свойствами [1, 4]. Бетон является хрупким, неоднородным материалом, поэтому существует проблема адаптации для бетона методов твердометрии, отработанных для металлов.

В связи с этим в данной работе рассмотрены возможности твердометрии как метода получения прямого количественного показателя стойкости бетона к ледовой абразии. Для этого имеются следующие основания.

Во-первых, сходство механизма процесса абразии [8] и процесса испытания на твердость [1]. Это является принципиально важным, так как сам принцип измерения при получении информации о свойствах материала должен моделировать эксплуатационное воздействие и быть адекватным эксплуатационным процессам. С этой точки зрения именно процесс испытания на твердость достаточно полно моделирует механизм разрушения поверхности бетона при абразивном воздействии льда (табл. 1). При воздействии льда на поверхность конструкции давление передается через контактные площадки достаточно малых размеров, формируемые кристаллами льда, обладающими более высокой твердостью по сравнению с окружающими участками. При этом происходит обновление кристаллов льда на контактных площадках за счет их постоянного разрушения в процессе взаимодействия.

Во-вторых, известно, что между значениями прочности и твердостью материалов имеется количественная связь.

Таблица 1

Процессы ледовой абразии и процессы при реализации испытания на твердость

Процессы от действия сил трения при абразивном контактом взаимодействии «лед–бетон»	Процессы при вдавливании наконечника в поверхность испытуемого тела при реализации испытания на твердость
Вытеснение компонентов бетона и образование царапины	Вытеснение материала и образование валика вокруг отпечатка
Деформирование и микротрещинообразование некоторого объема бетона вокруг царапины	Деформирование и микротрещинообразование некоторого объема материала вокруг отпечатка
Образование новой поверхности	Образование новой поверхности
Трение льда при контакте с поверхностью материала	Трение наконечника при внедрении в материал
Выделение тепла	Выделение тепла

Таким образом, именно характеристика твердости адекватно соотносится с механизмом разрушения материала и параметрами воздействий при ледовой абразии.

Для определения оптимального метода твердометрии и возможности его применения были проведены испытания на тестовых бетонных образцах. Результаты проведенных испытаний позволили обосновать процедуры и алгоритм оценки твердости бетона.

Материалы, оборудование, процесс измерения

Для отработки методики испытаний авторами данной статьи протестировано 8 образцов бетона класса В60 в возрасте более 1 года. Для подготовки к испытаниям кубические образцы 10×10×10 см распиливались на две половины с последующей шлифовкой тестируемой поверхности.

Для исследования статической твердости поверхности бетонных образцов использовалась установка Qness Q150A+ (табл. 2). Измерение твердости на этой установке выполняется в автоматическом режиме по заданной траектории движения. В процессе испытания образец закрепляется на магнитном столике твердомера, назначается положение сетки точек измерения на его поверхности и производится съемка поверхности образца. Установка автоматически строит общий график измеренных значений твердости поверхности, таблицы и графики со значениями твердости

для каждой конкретной точки. Дополнительно производилось фотографирование поверхностей до и после испытаний протестированных образцов.

После завершения измерений данные экспортируются в таблицы Microsoft Excel. Далее производится фильтрация данных по структурным элементам бетона посредством визуального сопоставления фотографии поверхности бетона с координатами точек измерения.

Таблица 2

Технические характеристики твердомера Qness Q150A+

Диапазон испытательных нагрузок	9,81–2450 Н
Тестовая высота/ глубина	187/180 мм
Предметный столик	Моторизованный 170×250 мм с ходом перемещения X260/Y166 мм
Максимальная масса образцов	50 кг
Комплекующие, дополнительное оборудование, программное обеспечение	Держатели образцов, инденторы, объективы, программные модули и программное обеспечение <i>Qplx control</i> , встроенная оптическая система, камера

Обоснование оптимального метода, процедуры и алгоритма оценки твердости бетона

На первом этапе эксперимента осуществлен выбор метода твердометрии, который может быть адаптирован для испытания бетона.

Для определения твердости поверхности образцов бетона были рассмотрены четыре метода: по Роквеллу, Бринеллю, Виккерсу и по Кнупу, которые в настоящее время широко применяются в промышленных испытаниях. В данных методах испытание твердости реализуется путем статического вдавливания закаленного стального шарика, алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположащими гранями 136° и алмазного конуса с углом при вершине 172°.

При испытании по Бринеллю, Виккерсу и по Кнупу твердость рассчитывается как отношение вертикальной нагрузки к площади поверхности отпечатка соответствующего наконечника. При испытании твердости методом Роквелла вдавливание индентора осуществляется в два приема: сначала наконечник вдавливается предварительной нагрузкой, а затем прилагается основная нагрузка. Измеряемым параметром является разность глубин проникновения наконечника под действием основной и предварительной нагрузки, при этом основная нагрузка осуществляется без снятия предварительной нагрузки.

В ходе испытаний было выявлено, что методы определения твердости посредством измерения отпечатка индентора на поверхности материала (по Бринеллю, Виккерсу, Кнупу) не могут быть использованы для исследований твердости бетонных образцов. На поверхности бетона отпечатки имели нечеткие границы, что обусловлено неоднородной структурой бетона и хрупким характером разрушения. Поэтому оценка площади отпечатка приводила к значительным погрешностям (рис. 1). Таким образом, на основании результатов опытов по определению твердости бетона различными методами можно сделать однозначный вывод: для испытаний твердости бетона может быть использован только метод Роквелла.

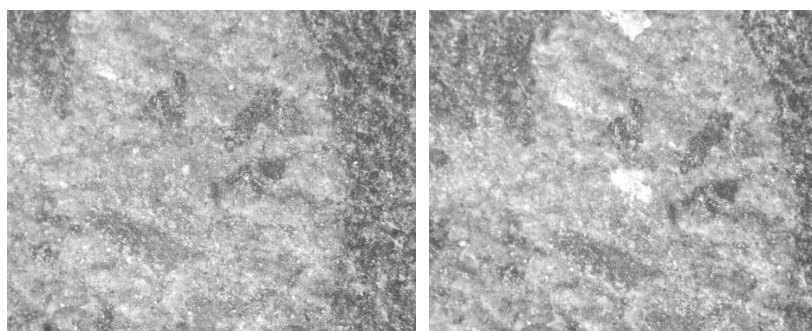


Рис. 1. Снимок поверхности бетона до и после измерения.

На втором этапе эксперимента произведено обоснование процедуры и алгоритма оценки твердости бетона медом Роквелла.

Выбор индентора. Для испытаний по Роквеллу применяются следующие инденторы: № 1 – алмазный конус (рис. 2, а), № 2 – шарик $\varnothing 1,5875$ мм (рис. 2, б), № 3 – шарик $\varnothing 3,175$ мм (рис. 2, в). В процессе испытаний установлено следующее:

- при использовании индентора № 1 наблюдалась систематическая ошибка из-за малых размеров индентора, который более чем в 50% точек измерений попадал в поры, что приводило к отрицательным значениям показателя твердости;

- индентор № 3 не дает возможности идентифицировать твердость отдельных структурных элементов бетона из-за его большого размера;

- индентор № 2 позволяет вести точное измерение твердости структурных элементов бетона (крупного заполнителя, связующего и зоны их контакта).

Индентор № 2 признан оптимальным для оценки твердости бетона как неоднородного материала, так как данный индентор позволяет фиксировать отличающиеся характеристики твердости структурных составляющих бетона.



Рис. 2. Инденторы, применяемые в измерении твердости по методу Роквелла:
а – алмазный конус, б – шарик $\varnothing 1,5875$ мм, в – шарик $\varnothing 3,175$ мм.

Выбор нагрузки. Для индентора № 2 ($\varnothing 1,5875$ мм) установка Qness Q150A+ позволяет приложить нормативные нагрузки 15, 30, 45 кгс. Установлено, что при приложении нагрузок 30 и 45 кгс происходит значительное разрушение поверхностного слоя образца бетона, что приводит к высокой погрешности измерений. Нагрузка в 15 кгс является необходимой и достаточной величиной нормативной нагрузки, которая использовалась для дальнейших испытаний.

Определение количества точек измерения. Для образца бетона с размерами грани 10×10 см область для измерения твердости имеет размеры 5×5 см. Согласно нормативным требованиям, интервал разбиения не должен быть меньше двух диаметров наконечника индентора. Поэтому в пределах области измерения создавались поля измерений с интервалом между точками приложения нагрузки 2,5; 5; 7,5 мм. Установлено, что наиболее точные результаты дает поле измерений из 19×19 точек с интервалом между ними 2,5 мм (рис. 3). Увеличение интервала измерения приводит к значительным погрешностям измерения твердости, так как из-за небольшого количества точек измерения невозможно получить статистически достоверные характеристики твердости структурных составляющих бетона.

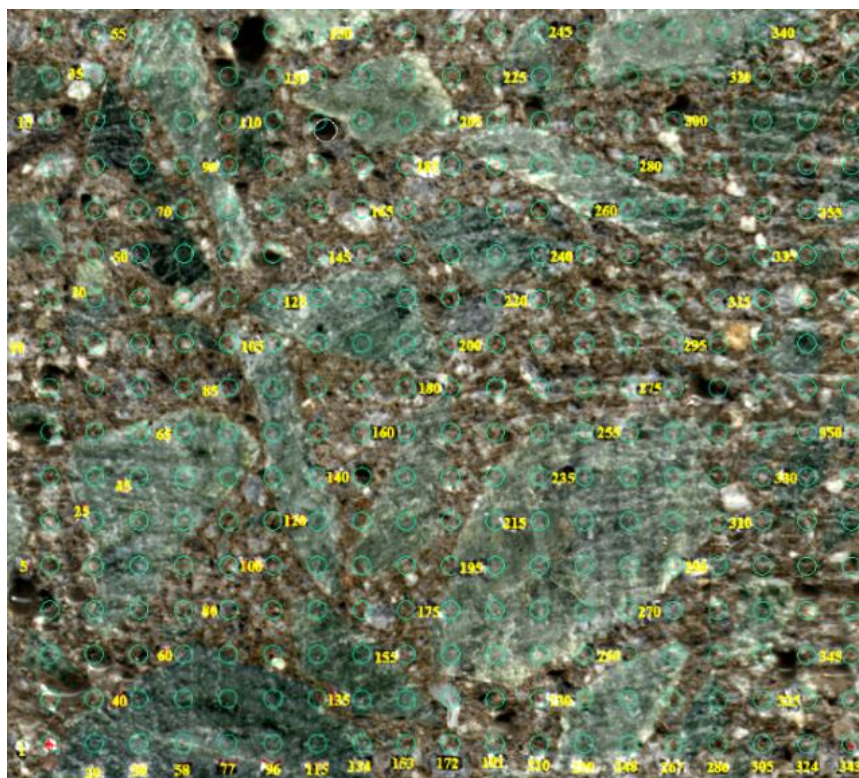


Рис. 3. Расположение точек нагрузки на образце.

Результаты измерений тестовых образцов бетона

На рис. 4, а представлено суммарное распределение значений твердости поверхности 8 тестовых бетонных образцов, полученное после отбраковки отрицательных значений твердости, которые соответствуют попаданию индентора в поры. Суммарная гистограмма распределения (рис. 4, а) имеет ярко выраженную положительную асимметрию, а значения твердости изменяются в интервале $h \in \{5,22;98,22\}$. Данный характер распределения является закономерным следствием неоднородности структуры бетона, существенного различия показателей твердости его структурных элементов. В соответствии с данными о размещении точек приложения нагрузки произведено расслоение данных измерений по структурным элементам бетона (рис. 4, б, в, г) с отбраковкой грубых погрешностей по критерию Романовского. Статистическая обработка данных позволила рассчитать следующие значения твердости бетона класса В60 и его структурных элементов (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики твердости бетона класса В60

Статистические характеристики твердости	Поверхность			
	бетона общая	крупного заполнителя	цементного камня	контактной зоны
Среднее значение твердости	73,86	86,85	63,91	65,01
Стандартное отклонение значений твердости	19,4	11,4	16,4	18,9
Стандартное отклонение средних значений по образцам	2,1	1,9	2,7	6,9

Полученные данные свидетельствуют о достаточной сходимости и воспроизводимости результатов измерений. Метод позволяет получить достоверные данные об интегральной твердости поверхности бетона и твердости его отдельных структурных элементов, что определяет возможность использования твердометрии как метода испытания бетона.

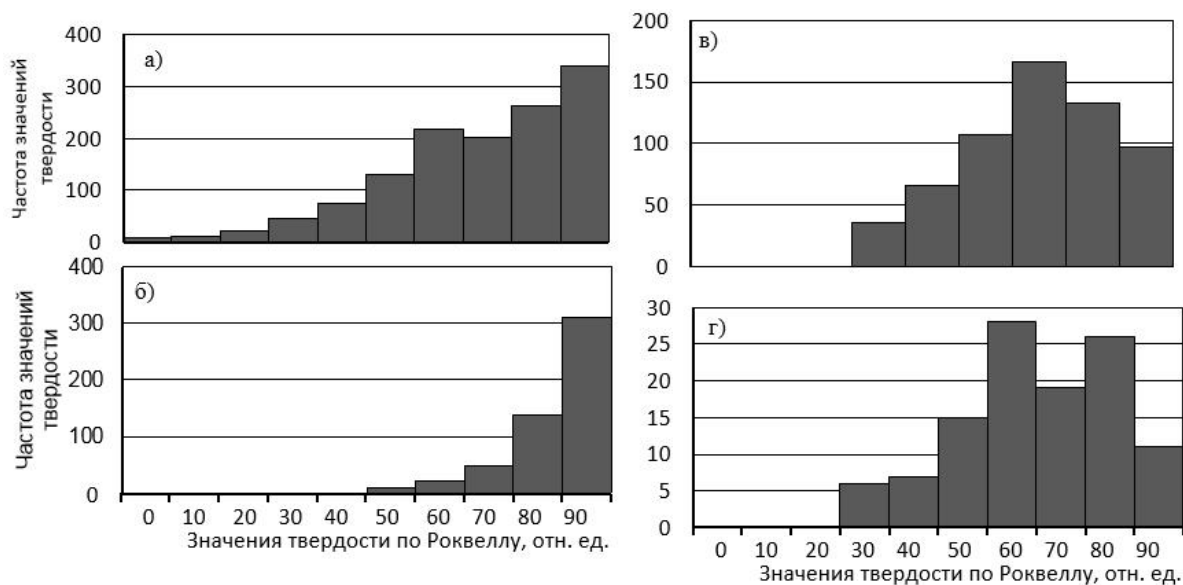


Рис. 4. Распределение значений твердости поверхности бетонных образцов: а – суммарное, б – крупного заполнителя, в – цементного камня, г – контактной зоны.

Заключение

Анализ механизма процесса ледовой абразии и механики процесса испытания на твердость позволил заключить, что характеристика твердости адекватно соотносится с механизмом разрушения материала и параметрами нагрузок при ледовой абразии. На основании этого твердометрия рассматривается как метод оценки стойкости бетона к ледовой абразии, а исследования твердости бетона предлагается продолжить в качестве прямого количественного показателя этой стойкости.

Для оценки твердости бетона оптимальным признан метод Роквелла. Рациональными параметрами процесса измерения являются: нормативная нагрузка 15 кгс, использование индентора с наконечником в виде шарика $\varnothing 1,5875$ мм, интервал между точками измерения 2,5 мм.

Статистический анализ данных тестовых испытаний показал достоверность метода твердометрии и возможность его использования для оценки интегральной твердости поверхности бетона и отдельных его структурных элементов.

Развитие исследований предполагается в следующих направлениях:

- получение количественных оценок по соотношению твердости структурных элементов бетонов различных классов;
- обоснование требований к методу определения интегрального показателя твердости бетонов с учетом неоднородности их структуры, который наиболее точно характеризует степень сопротивления бетона ледовой абразии;
- экспериментальные исследования сопротивления бетона ледовой абразии с целью получения эмпирических моделей сопротивления бетона ледовой абразии, в которых основным показателем сопротивления ледовой абразии будет его твердость;
- нормирование твердости бетона с позиций сопротивления ледовой абразии для различных районов Арктики;
- анализ корреляционных взаимосвязей между интегральным показателем твердости различных видов бетона и его стандартными механическими свойствами;
- моделирование структуры и обоснование требований к составам бетона с оптимальной величиной сопротивления ледовой абразии.

Перспектива полученных результатов, по нашему мнению, состоит во введении твердости в качестве независимого показателя в общий комплекс оценок свойств бетона, которые необходимо регламентировать для обеспечения его долговечности при эксплуатации гидротехнических сооружений в арктических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
2. ИСО 19906-1:2011. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения Арктического шельфа. М.: Стандартинформ, 2011.
3. Уварова Т.Э. Методика определения глубины ледовой абразии // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(12). С. 46–52.
4. ASTM E140-07 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. Olin College, US, 2007, 21 p.
5. Bekker A.T., Uvarova T., Jacobsen S., Pomnikov E., Kim L., Fossa K.T. Concrete Ice Abrasion due to Ice-indentation Pore Pressure. Proc. of the 1th International Congress on Durability of Concrete (ICDC–2012), Trondheim, Norway, 2012.
6. Bekker A.T. Problems of the Ice Cover Abrading Action on Legs of Concrete Offshore Structures. Workshop on Ice abrasion concrete structures. 2007;10:26–25.
7. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Calculation of Ice Abrasion for the Lighthouses Installed in the Gulf of Bothnia. Proc. of the 21th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC 11), Montreal, Canada, 2011.
8. Huovien S. Abrasion of Concrete Structures by Ice. Cement and Concrete Research. 1993(23);1:69–82.
9. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement. Proceedings of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 1994;2:545–552.
10. Takeuchi T., Nakazawa N., Mikami T. et al. Abrasion of Offshore Structure due to Sea Ice Movement. Proc. of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005, p. 729–732.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

Resource Development of the Continental Shelf of Arctic

DOI.org/10.5281/zenodo.1204714

Bekker A., Uvarova T., Slavcheva G., Pomnikov E., Sklyarov A.

ALEKSANDR BEKKER, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, School of Engineering, e-mail: bekker.at@dvfu.ru

TATIANA UVAROVA, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulic Engineering, the Theory of Buildings and Structures, School of Engineering, e-mail: uvarova.tye@dvfu.ru

EGOR POMNIKOV, Candidate of Technical Sciences Engineering Sciences, Head of Ice Laboratory, School of Engineering, e-mail: pomnikov.ee@dvfu.ru

ALEXEY SKLYAROV, Postgraduate Research Assistant, School of Engineering, e-mail: skliarov.aa@students.dvfu.ru

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

GALINA SLAVCHEVA, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gslavcheva@yandex.ru

Voronezh State Technical University

84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, Russia, 394008

Hardness testing as a method to evaluate the resistance of concrete to ice abrasion in marine hydraulic structures

Abstract: The main factor affecting the reliability of marine ice-resistant platforms (MIRP) is the ice regime in the construction site and, as a result, the ice pressure and its impacts on the structure. One of such impacts in the water areas with the dynamic with a dynamic ice drift regime regime of ice cover is the ice abrasion. Wear of concrete caused by the drifting ice cover contributes to the loss of thickness of concrete elements of the structure in the zone of variable level, causes the danger of exposure of the reinforcement and its accelerated corrosion in the marine environment, and consequently, may reduce the strength characteristics of these structural elements. The task of increasing the resistance of concrete to the abrasive impacts of the ice cover is directly related to the studies of their wear resistance and the determination of the requirements for the composition and structure of concretes used in the Arctic seas.

The article substantiates the possibility of using hardness to evaluate the resistance of concrete to ice abrasion as a method of obtaining an independent direct quantitative index of concrete resistance associated with the processes of destruction of concrete during ice abrasion and independent of the ice impacts parameters. The drifting ice cover affects the concrete causing thinning of the concrete elements of the structure in the variable level zone, constitutes a danger that the reinforcing steel can be exposed, and undergoes an accelerated corrosion in the marine environment, which may result in diminished strength characteristics of these structural elements. The task to increase the resistance of concrete to the ice cover abrading is directly related to the studies on the durability of concrete and the definition of the requirements for the composition and structure of concretes to be used the Arctic seas. The article substantiates the use of the hardness testing to evaluate the resistance of concrete to ice abrasion as a method aimed to obtain an independent direct quantitative resistance index correlated with the concrete destruction processes caused by ice abrasion being independent of the ice impact parameters. The article deals with the possibilities to use and adapt the existing hardness testing methods to concrete as a brittle heterogeneous material as well as the optimal method, procedure, and algorithm to estimate the hardness of concrete. It presents the results of the tests of specimens that prove the possibility to determine the integral hardness

of concrete basing on the statistically reliable evaluation of the hardness of each of its structural elements. To forecast and regulate the resistance of concrete to ice abrasion, it is proposed to identify the relationship between the integral hardness index of the concrete surface and the determined value of the depth of ice abrasion taking into account the variations in speed, temperature, and ice pressure. That was performed during the period from 2007 to 2014 on a special unit purposed to study ice abrasion effects on various types of building materials.

Key words: hardness testing, abrasion, concrete, hydrotechnical constructions, estimation method.

REFERENCES

1. Grigorovich V.K. Hardness and microhardness of metals. M.: Izd-vo Nauka, 1976, 230 p.
2. ISO 19906-1: 2011. Oil and gas industry. Constructions of the Arctic shelf. M., Standartinform, 2011.
3. Uvarova T.E. Method for determining the ice abrasion depth., Systems. Methods. Technology. 2011; 4:46–52.
4. ASTM E140-07 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. Olin College, US, 2007, 21 p.
5. Bekker A.T., Uvarova T., Jacobsen S., Pomnikov E., Kim L., Fossa K.T. Concrete Ice Abrasion due to Ice-indentation Pore Pressure. Proc. of the 1th International Congress on Durability of Concrete (ICDC–2012), Trondheim, Norway, 2012.
6. Bekker A.T. Problems of the Ice Cover Abrading Action on Legs of Concrete Offshore Structures. Workshop on Ice abrasion concrete structures. 2007;10:26–25.
7. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Calculation of Ice Abrasion for the Lighthouses Installed in the Gulf of Bothnia. Proc. of the 21th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC 11), Montreal, Canada, 2011.
8. Huovien S. Abrasion of Concrete Structures by Ice. Cement and Concrete Research. 1993(23);1:69–82.
9. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement. Proceedings of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 1994;2:545–552.
10. Takeuchi T., Nakazawa N., Mikami T. et al. Abrasion of Offshore Structure due to Sea Ice Movement. Proc. of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005, p. 729–732.