

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ  
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 666.97

**МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В ОБЛАСТИ  
НИЗКИХ ВОДОЦЕМЕНТНЫХ ОТНОШЕНИЙ**

*ГУЩИН С.В., ДРОЗД А.А., БАБИЦКИЙ В.В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Морозостойкость бетона – одна из важнейших характеристик бетона (цементного камня), определяющая в известной степени долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Важно отметить, что несмотря на то, что это направление крупными учеными в области науки о бетоне (Шестоперов С.В., Горчаков Г.И., Дворкин Л.И., Пауэрс Т. и многие другие) исследуется десятилетиями, задача повышения и прогнозирования морозостойкости бетона в полном объеме так и не решена. Выявлено множество факторов, в той или иной степени влияющих на морозное разрушение бетона. Среди них в области традиционных водоцементных отношений бесспорна связь структурной плотности материала и его морозостойкости. Интерес представляет и морозостойкость бетона (цементного камня) с низким начальным водосодержанием. Технология «сухого формирования бетона», предусматривающая уплотнение сухих компонентов бетонной смеси (либо только вяжущего) с последующей пропиткой водой, предоставляет возможность технологам получать материал с аномально низкими водоцементными отношениями,

причем в «чистом виде», без учета влияния, например, пластифицирующих добавок.

Образцы-цилиндры из цементного камня высотой и диаметром 50 мм были изготовлены по пресс-вакуумной технологии:

прессование отвакуумированного бездобавочного цемента ОАО «Красносельскстройматериалы» марки 500 при прессующих давлениях 5, 10, 20 и 40 МПа с последующей пропиткой водой, подвергнутой предварительной вакуумной деаэрации. Это обеспечивало достижение водоцементных отношений 0,15; 0,16; 0,18 и 0,21.

Цилиндры твердели 28 суток в нормально-влажностных условиях, а затем проводили исследования скорости ультразвуковых колебаний (рис.1), изменения массы (рис. 2), а также деформаций образцов (рис. 3) в процессе циклического замораживания при температуре минус 50 °С и оттаивания при температуре плюс 20 °С. Измерения производились через каждые 10 циклов.

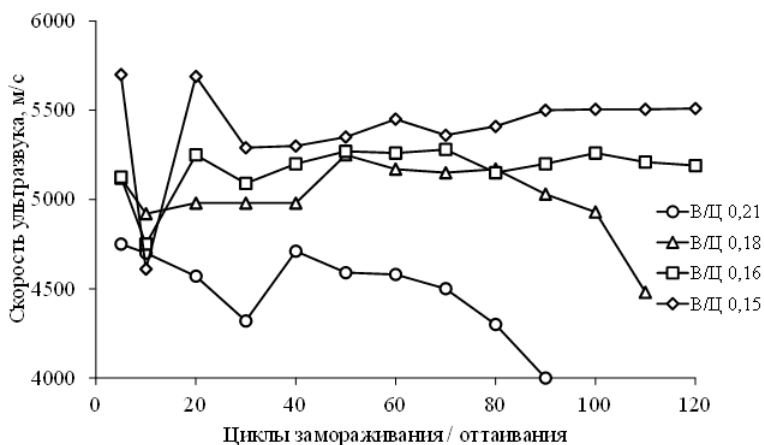


Рис. 1. Зависимость скорости ультразвука в образцах цементного камня от количества циклов замораживания / оттаивания

Предварительно было установлено соответствие ускоренных испытаний при -50°С и стандартных. Как оказалось, оно имеет прямолинейный характер. И, следовательно, величины предельных деформаций образцов (то есть деформаций, соответствующих и пределу морозостойкости), испытанных при температуре -50°С, позволили перейти к стандартным циклам замораживания / оттаивания.

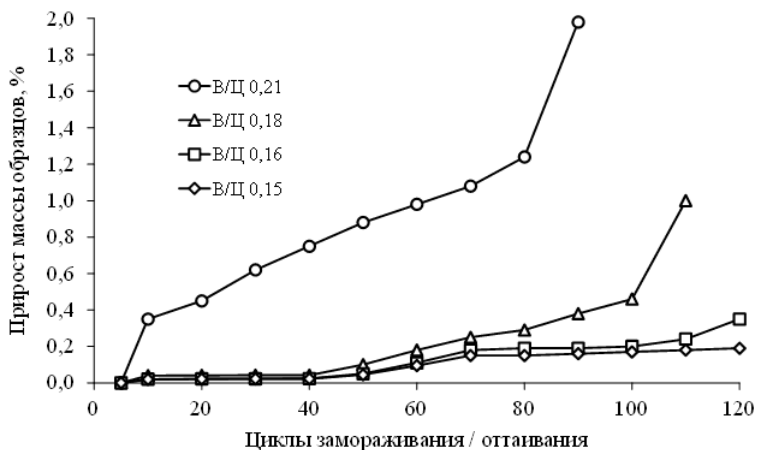


Рис. 2. Зависимость прироста массы образцов цементного камня от количества циклов замораживания / оттаивания

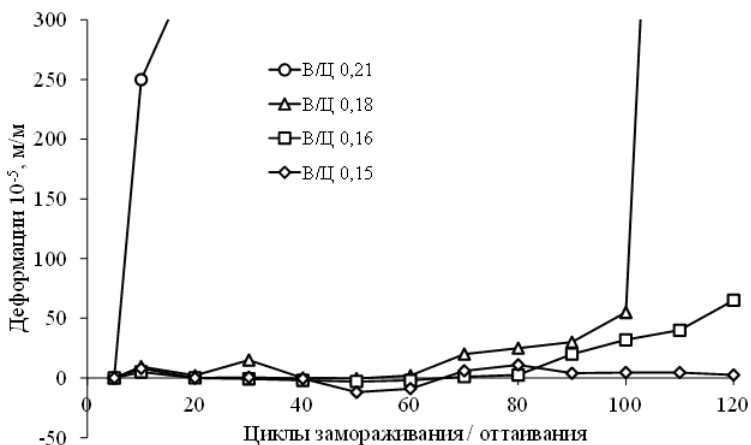


Рис. 3. Зависимость деформаций образцов цементного камня от количества циклов замораживания / оттаивания

Так, для цементного камня с начальным водоцементным отношением, равным 0,21, к 80 циклу деформации составляют около  $200 \cdot 10^{-5}$  м/м, а к 70 циклу -  $100 \cdot 10^{-5}$  м/м, что примерно соответствует предельным значениям. Таким образом, морозостойкость, пересчи-

танная на стандартные испытания, составляет 300...350 циклов замораживания-оттаивания.

С уменьшением начального водосодержания цементного теста до 0,18 соответственно увеличивается и морозостойкость цементного камня. Так, в соответствии с расчетами, деформация порядка  $200 \cdot 10^{-5}$  м/м проявляется к 160 циклам ускоренных испытаний, что соответствует морозостойкости около 700 циклов. Что касается более плотного цементного камня, то деформации образцов с В/Ц, равным 0,16, к 160 циклам ускоренных испытаний составили  $10 \cdot 10^{-5}$  м/м, а с В/Ц=0,15 –  $2 \cdot 10^{-5}$  м/м. Таким образом, можно констатировать, что морозостойкость цементного камня с низким начальным водосодержанием существенно выше 700.

Интерес представляет кинетика изменения деформаций цементного камня. К первым 10 циклам для всех исследованных составов характерен рост значений деформаций, т. е. наступает первичное расшатывание структуры. Аналогичные результаты характерны и для графика (рис.1), отражающего скорость ультразвуковых колебаний – к десятому циклу скорость ультразвука в образцах с начальным В/Ц=0,15 падает на 22,9 %. Характерно, что для образцов с В/Ц=0,21 снижение скорости ультразвука составило лишь 1,2 %. Расшатывание структуры сопровождалось и увеличением массы образцов.

При дальнейших испытаниях образцы с относительно высоким начальным водосодержанием (В/Ц=0,21) продолжали последовательно наращивать деформации вплоть до 70 циклов замораживания, после чего наступил резкий подъем величины деформаций. Примерно соответствует этому и изменение скорости ультразвука – после некоторой стабилизации скорости около 4400-4700 м/с, к 70 циклу наступает резкое падение скорости. Для этого же периода характерно и явно проявляющееся изменение массы образцов – расшатывание структуры сопровождается образованием микродефектов, открывающих доступ для воды.

К 20 циклу испытаний объем образцов с В/Ц=0,15 и 0,16 полностью восстанавливается, т. е. деформации равны нулю. Скорость ультразвука также становится практически равной первоначальной. Интересно, что до 50 цикла увеличение деформаций сопровождается падением скорости ультразвука и наоборот. То есть, метод измерения скорости ультразвука является достаточно чувствительным

инструментом и при исследовании особо плотных образцов цементного камня и бетона. В дальнейшем деформации несколько стабилизируются.

К 100 циклу испытаний наступает резкое увеличение деформаций образцов с  $V/C=0,18$ , отмечается также скачкообразное падение скорости и лавинное нарастание массы образцов.

Известно, что капиллярная пористость определяет морозостойкость обычного бетона. Горчаков Г.И. получил для обоснования этой связи и соответствующую формулу (рис. 4). Нами были проведены исследования, позволяющие установить аналогичную связь для особо плотного цементного камня. В этих экспериментах исследования морозостойкости цилиндров проводили по стандартной методике, то есть замораживание производили при температуре около минус  $20^{\circ}\text{C}$ , а оттаивание – при  $+20^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 4. Взаимосвязь капиллярной пористости цементного камня и количества циклов замораживания / оттаивания

Степень гидратации цемента в образцах определяли перед испытанием цементного камня на морозостойкость по общеизвестной упрощенной методике: дробление цилиндров на гранулы, высушивание при температуре  $+105^{\circ}\text{C}$ , прокаливание в муфельной печи при температуре  $+600^{\circ}\text{C}$ . После определения количества химически свя-

занной воды устанавливали степень гидратации цемента, которая для образцов с водоцементным отношением 0,15; 0,16; 0,18 и 0,21 оказалась равной 34,3; 35,8; 40,1 и 45,2 % соответственно. Затем по общеизвестной формуле, учитывающей степень гидратации и плотность цемента, а также водоцементное отношение, рассчитывали капиллярную пористость цементного камня.

Как оказалось, взаимосвязь структурных особенностей цементного камня (представлено капиллярной пористостью) и его морозостойкости кардинально отличается от традиционной (рис. 4) – при равной капиллярной пористости морозостойкость особо плотного цементного камня существенно выше. И это требует разумного обоснования.

Одной из популярных в настоящее время теорией, объясняющих изменение морозостойкости от структурных параметров, является наличие вовлеченного воздуха – с увеличением объема воздуха возрастает и устойчивость к действию мороза. Однако такая позиция плохо коррелируется с полученными данными по морозостойкости прессованного цементного камня. В случае предварительного вакуумирования сухой бетонной смеси (вяжущего) и применении деаэрированной воды появление воздуха в сухом вяжущем исключено. И именно в данном случае морозостойкость цементного камня имеет относительно максимальное значение. Вероятно, решающее влияние на морозостойкость оказывает то, что создается однородная пористость, характеризующаяся мелкими капиллярами, прочность же цементного камня достаточна, чтобы выдержать растягивающие деформации в цементном камне от замерзающего в глубине образцов льда. Наличие закрытой пористости мало сказывается на процессе размораживания образцов, т. к. ее значение мало зависит от величины прессующего давления.

Таким образом, технология «сухого формирования бетона» позволяет получать материал с существенно большей, чем обычный бетон, морозостойкостью.