

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНОВ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ОТТАИВАНИИ

Выровой В.Н., Виноградский В.М. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина), **Фиц С.** (Люблинская политехника, г. Люблин, Польша).

Предложен и проанализирован механизм разрушения бетона при его многократном замораживании и оттаивании с учетом распределения в его структуре технологических трещин.

Введение.

Долговечность многих конструкций гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений в значительной степени определяется способностью материала этих конструкций противостоять многократным циклам замораживания и оттаивания - его морозостойкостью. В общем случае под морозостойкостью понимается способность различных материалов выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без признаков разрушения или значительного изменения прочности [1]. Принцип оценки морозостойкости строительных материалов путем их попеременного замораживания и оттаивания был обоснован проф. Н.А. Белелюбским в 1884 г. на Международном конгрессе по испытанию материалов [2] и, в основном, является главным и в наше время. Способность бетона как капиллярно-пористого тела противостоять разрушению при многократном замораживании и оттаивании объясняется присутствием в его структуре так называемых резервных, не заполненных водой, пор и капилляров, в которые вытесняется часть воды при ее замораживании [3, 4, 5]. Эти объяснения основаны на работах М.И. Сумгина, выполненных в 1929 г. [2], по миграции влаги под влиянием напряжений, возникающих в замерзающих грунтах, вследствие расширения воды при ее превращении в лед. Поэтому основным параметром, определяющим морозостойкость бетона, принято считать строение его порового пространства при обязательном наличии необходимого количества условно-замкнутых пор, которые отнесены к рангу резервных. В работах [3, 4, 5, 6] приведены сведения о влиянии порового пространства на сопротивление бетона морозному разрушению, методах расчета требуемого распределения пор и капилляров по размерам и определены основные параметры составов и технологий, которые позволяют получать бетоны заданного строения. Это позволило назначать

рецептуру бетона с учетом минералогии цементов, количества и качественного состава химических добавок, условий формирования изделий и их твердения, обеспечивающих стойкость бетонов при их замораживании и оттаивании требуемое количество циклов. Накопленный опыт эксплуатации таких бетонов в различных климатических зонах и в различных режимах низкотемпературных воздействий подтвердил эффективность предложенных технологических решений.

Анализ механизмов организации бетона как полиструктурного материала показал, что к объективно существующим параметрам его структуры следует отнести технологические трещины, которые определенным образом распределены на всех уровнях структурных неоднородностей [7, 8, 9]. В силу того, что функции пор и капилляров и трещин принципиально различны при приложении к материалу нагрузок, то представляет теоретический и практический интерес рассмотрение механизмов разрушения бетонов при переходе воды, заполняющей трещину, в твердое состояние. Это предопределило задачу исследований - анализ механизмов морозного разрушения бетонов с учетом определенного распределения в его структуре технологических трещин.

Выбор и обоснование модели при анализе механизмов морозного разрушения полиструктурных материалов.

При анализе механизмов взаимодействия изменяющей свой объем жидкой фазы с материалом, который также изменяет свой объем при снижении температуры, примем следующие допущения: - температура перехода жидкой фазы в твердое состояние зависит от рН жидкой фазы; - температуры изменения агрегатного состояния жидкой фазы, находящейся в свободном состоянии, в виде пленок и в виде поли- и моноадсорбированных слоев различны.

Принятые допущения основаны на известных фактах о влиянии рН воды затворения и видов связи с поверхностью тела на температуру ее перехода из жидкого в твердое состояние. Это позволяет исключить из анализа механизмов морозного разрушения уровни структурных неоднородностей типа "продукты новообразований - дисперсионная среда" и микроструктуру цементного камня, представленную структурными блоками различных масштабных уровней. Жидкая фаза, находящаяся в объемах несплошностей на этих уровнях структурных неоднородностей находится, как правило в физически связанном состоянии с высокими значениями рН [10]. Выдвинутые предположения позволяют заключить, что при температурах $T \leq 273\text{K}$, когда вода, находящаяся в свободном состоянии, переходит в лед, жидкость, находящаяся в объемах межкластерных поверхностей раздела,

практически не изменяет свое агрегатное состояние, что обеспечивает минимальное изменение ее объема. Технологические трещины, образовавшиеся на уровне структурной неоднородности типа матричный материал - заполнители (макроструктура бетона), отличаются значительной шириной раскрытия, что позволяет жидкой фазе, заполняющей их объем, находится в свободном состоянии. Как показали проведенные измерения, ширина раскрытия технологических трещин в макроструктуре на порядок превышает ширину раскрытия наследственных трещин в микроструктуре и может достигать до 10...50 мкм. Таким образом, можно заключить, что физико-механические процессы, связанные с изменением объема при переходе жидкой фазы в твердое состояние при переходе через точку ее замерзания будут в первую очередь проявляться на уровне макроструктуры.

Характер распределения технологических трещин, как показано в [11], зависит от геометрических параметров макроструктуры и от уровня взаимодействий твердеющего материала матрицы с поверхностью заполнителей. В случаях $R_a < R_k$ и $R_a = R_k$, где R_a и R_k - адгезионная и когезионная прочности соответственно, появляются трещины сцепления и трещины в матричном материале. При давлении льда на берег трещины сцепления и на поверхность заполнителя, распределение деформаций будет зависеть от соотношения деформативных характеристик материалов заполнителей и матрицы. Для всех возможных случаев ($E_z > E_m$, $E_z < E_m$; $E_z = E_m$, где E_z и E_m - модули упругости заполнителей и материала матрицы соответственно) будет происходить перераспределение деформаций между составляющими макроструктуры с возможным прорастанием трещин сцепления по всей площади поверхности раздела. Подобные трещины превращаются во внутренние поверхности раздела, на которых происходит перераспределение деформаций при внешних силовых и температурно-влажностных нагрузках без прорастания их в матричный материал.

В случае $R_a > R_k$ технологические трещины распределены в матричном материале. Подобные трещины присутствуют и при ситуациях $R_a < R_k$ и $R_a = R_k$, что превращает их в типовые трещины макроструктуры. Характерной особенностью их можно считать, что при подрастании они могут быть соизмеримы со структурной ячейкой и превращаться в опасные трещины, которые, соединяясь, могут быть трансформированы в трещины разрушения (магистральные трещины).

Таким образом, в качестве объекта анализа принята технологическая трещина, расположенная в матричном материале на уровне макроструктуры бетона. Примем клиновидную плоскую модель трещины по аналогии с моделью трещины, принятой в механике разрушения [12]. Принятая модель технологической трещины характеризуется длиной l_0 , шириной раскрытия a_0 и радиусом устья $\alpha \rightarrow 0$.

Анализ механизма развития начальной трещины при замерзании в ней воды.

Изменение ширины раскрытия клиновидной трещины по ее длине предполагает, что при $\alpha \rightarrow 0$, на некотором расстоянии от ее устья вода находится в моно- и полимолекулярном адсорбированном состоянии с переходом в пленочное и свободное по мере увеличения ширины раскрытия. Это, в свою очередь, предполагает что для каждого вида связи воды в клиновидной трещине существует своя температура ее перехода в твердое состояние, что, по нашему мнению, следует учитывать при анализе процессов, происходящих при замерзании водонасыщенного бетона.

При $T \leq 273\text{K}$ лед образуется на участке трещины, в котором вода находится в свободном состоянии. Давление от увеличения объема замерзающей воды передается на берега трещины и на воду, которая находится в пленочном состоянии. Увеличение ширины раскрытия трещины и увеличение гидростатического давления, которое возникли в результате увеличения объема при изменении агрегатного состояния жидкости, вызывают появление деформаций растяжения у устья трещины. Деформации растяжения, с учетом эффектов адсорбционного снижения прочности [13], приводят к увеличению длины трещины на некоторую величину Δl_1 . Это вызывает локальное высвобождение поверхностной энергии, что поддерживает температуру выше температуры изменения агрегатного состояния свободной воды. В тоже время, увеличение длины трещины при увеличении ширины ее раскрытия предполагает изменение ее объема, что может привести к переходу части пленочной воды в свободную, а свободной в лед, что ведет к очередному этапу подрастания трещины на величину Δl_2 . Если принять, что количество моно- и полиадсорбционной воды постоянно до критических значений температур, то можно допустить, что подрастание трещины будет происходить на величину, обеспечивающую проявление адсорбционных эффектов молекул воды.

При дальнейшем снижении температуры, при которой пленочная вода переходит в твердое состояние, происходит очередной этап перераспределения деформаций между замерзшей частью воды, берегами трещины, участком трещины, заполненной льдом, и псевдожидкой фазой адсорбированной воды. Возникает ситуация, при которой происходит подрастание трещины на величину Δl_i . При этом происходит дальнейшее перераспределение влаги по видам ее связи с поверхностью берегов трещины. Таким образом, если предположить, что в клиновидной трещине по ее длине происходит распределение воды по видам ее связи, то по мере понижения температуры ($T < 273\text{K}$) будет происходить поэтапное изменение агрегатного

состояния жидкости, что является причиной скачкообразного подрастания технологической трещины и ее трансформации в трещину эксплуатации.

Трещины эксплуатации, начиная развиваться из технологических трещин, наследуют индивидуальный для каждого берега микрорельеф поверхности, а начальный характер распределения технологических трещин предопределяет направление роста трещин эксплуатации. Прорастая в макроструктуре бетона часть трещин эксплуатации пересекается или выклинивается на берега других трещин. Такие трещины переходят в ранг эксплуатационных внутренних поверхностей раздела, роль которых в основном сводится к перераспределению деформаций, возникающих под действием внутренних усилий при замерзании жидкой фазы и при действии внешних нагрузок. Часть трещин остается незавершенными в своем развитии, сохраняя потенциальную возможность роста при очередных циклах замораживания и действии других эксплуатационных нагрузок. К наиболее опасным следует отнести трещины, которые при своем росте используют внутренние поверхности раздела как свои берега на определенном участке и технологические трещины более низкого масштабного уровня. Подрастая, такие трещины достигают уровня структурной ячейки и вовлекают большие объемы жидкости, находящейся в свободном состоянии, что позволяет говорить об их преимущественном развитии при понижении температуры по сравнению с другими трещинами. Образование таких трещин можно считать началом процесса разрушения материала при его многократном замораживании и оттаивании. Появление трещин эксплуатации, соизмеримых с макроструктурными неоднородностями может происходить и путем поэтапного накопления более мелких трещин эксплуатации в структурной ячейке бетона с последующим спонтанным объединением выгодно ориентированных трещин, принадлежащим соседним структурным ячейкам.

Различные механизмы образования трещин разрушения зависят от начального характера распределения технологических трещин и внутренних поверхностей раздела, который определяется геометрическими параметрами макроструктуры и уровнем взаимодействия твердеющего матричного материала с заполнителями. Задача повышения сопротивляемости бетона многократным циклам замораживания и оттаивания заключается в создании требуемого характера распределения технологических трещин, путем рецептурных и технологических приемов, который создавал бы условия их поэтапного подрастания без укрупнения до размеров трещин разрушения в нормируемый период эксплуатации в условиях циклического замораживания.

Заключение.

Технологические трещины на уровне структурной неоднородности типа матричный материал - заполнители являются важными параметрами структуры бетона, которые в значительной степени определяют его поведение при многократном замораживании и оттаивании. Насыщение водой объемов технологических трещин сопровождается ее распределением по видам связи в зависимости от изменения ширины раскрытия трещин. Распределение жидкой фазы по видам связи предполагает поэтапный характер изменения ее агрегатного состояния, что инициирует поэтапное увеличение ширины раскрытия трещин с их скачкообразным подрастанием и превращает их в трещины эксплуатации. Механизмы укрупнения трещин эксплуатации в трещины разрушения определяются характером распределения технологических трещин, который, в свою очередь, зависит от геометрических параметров макроструктуры и качественного и количественного составов матричного материала. Это дает возможность утверждать, что, изменяя характер распределения технологических трещин в макроструктуре, можно изменять сопротивление бетона многократному замораживанию и оттаиванию.

Литература.

1. Политехнический словарь. - 3-е изд. - М.: Советская энциклопедия, 1989. - 656с.
2. Лукьянов И.А. Некоторые вопросы морозостойкости бетонов // Исследования. Бетоны, растворы и вяжущие. - М.: Гос. изд. лит-ры по строит. и архитектуре, 1952. - С.5-59.
3. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. - Л.: Стройиздат, 1983. - 132с.
4. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. - Л.: Стройиздат, 1989. - 128с.
5. Власов О.Е. Физические основы теории морозостойкости // Труды НИИстройфизика. - Вып.3. - М.: НИИСФ, 1967. - С.163-178.
6. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. - М.: Стройиздат, 1965. - 195с.
7. Соломатов В.И., Тахиров Н.К., Шахех Шах. Интенсивная технология бетона. - М.: Стройиздат, 1989. - 284с.
8. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. - К.: Будівельник, 1991. - 144с.
9. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. - Одесса: Місто майстрів, 1998. - 165с.

10. Теория цемента / Под ред. А.А. Пащенко. - К.: Будівельник, 1991. - 168с.
11. Выровой В.Н., Фиц С., Дорофеев А.В. Характер распределения технологических трещин в грубогетерогенных материалах // Сб. Композиційні матеріали для будівництва, 2003 (38), - Макеевка: ДонДАБА, 2003. - С.161-164.
12. Броек Д. Основы механики разрушения. - М.: Высш.пк., 1980. - 368с.
13. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Избранные тр. - М.: Наука, 1979. - 384с.