

**О МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ  
НА ПРОЦЕСС ПОВТОРНОЙ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА**

**Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Выровой В.Н., д.т.н., проф.,  
Мишутин А.В., д.т.н., проф.**

*Одесская государственная академия строительства и  
архитектуры*

Бетонные и железобетонные конструкции в процессе эксплуатации подвержены разнообразным внешним воздействиям, в результате чего происходит изменение свойств конструкции. Причинно данные изменения связаны со структурными изменениями материала, из которого изготовлена конструкция [1]. Для композиционного материала на основе цемента процессы и явления, возникающие и развивающиеся в микроструктуре бетона при гидратации вяжущего, можно рассматривать как определяющие для всех последующих преобразований материала на всех уровнях структурных неоднородностей.

В структуре композиционных строительных материалов, в том числе на основе цемента, присутствуют межкластерные внутренние поверхности раздела (ВПР) и технологические трещины (ТТ). Наличие внутренних границ раздела в виде берегов ТТ и берегов ВПР создает предпосылки локализации внутренних деформаций и деформаций, связанных с внешними воздействиями [1-3]. Участие границ раздела в перераспределении внутренних усилий между отдельными структурными составляющими во много объясняет различие между свойствами отдельных компонентов композита и свойствами композита как материала, между свойствами материала и свойствами конструкции.

Технологические трещины являются нестабильными структурными элементами композита ввиду их специфической способности концентрировать напряжения у своего устья. Структурные изменения в материале могут происходить за счет изменения параметров ТТ, которые под действием внешних воздействий превращаются в эксплуатационные трещины (ЭТ) [2]. Технологические и эксплуатационные трещины присутствуют на всех масштабных уровнях материала и, соответственно,

конструкции. При внешних воздействиях и нарушении внутренних равновесных процессов происходит трансформации ЭТ в ВПР и наоборот. Изменения структуры за счет взаимопревращения отдельных структурных элементов лежит в основе значительной части явлений, связанных с адаптацией материалов в эксплуатационной среде, также называемых самозалечиванием, самоуплотнением, самовосстановлением [4].

Исходя из предложенного в [5] деления эксплуатации бетона (цикла гидратации цемента) на этапы активного взаимодействия, кажущегося покоя и фрагментации, наибольшую часть «жизни» конструкции достаточной долговечности можно соотнести ко 2-му этапу. То есть происходят «активные взаимодействия цементного бетона строительных конструкций с эксплуатационной средой ...», что инициирует напряженное состояние системы зерно-оболочка». В соответствии с адаптационной теорией поровое пространство бетона заполняется продуктами коррозии, которые активно влияют на физико-химические свойства материала.

В зависимости от размеров и свойств воды, заполняющей пору, Ф.М. Иванов [6] различал: ультрамикropоры с диаметром менее  $100 \text{ \AA}$ , в которых имеются промежутки, близкие к размерам молекул и в которых молекулы воды подвергаются действию поверхностных сил твердой фазы; микropоры размером  $100-1000 \text{ \AA}$ , в которых свойства воды в значительной степени обуславливаются влиянием поверхности твердой фазы, в особенности с учетом неоднородности сечения пор; макropоры диаметром более  $1000 \text{ \AA}$ , в которых свойства основного количества воды, кроме ее сорбционного слоя, не отличаются от свойств свободной воды. При этом в действительности поры имеют весьма сложную форму переменного сечения, пространство которых в значительной доле подвержено действию молекулярных поверхностных сил.

В реальных условиях эксплуатации строительных конструкций, постоянно связанных с той или иной влажной средой, долговечность бетона во много определяется его проницаемостью. Известно, что водонепроницаемость и прочность бетона в значительной степени обуславливается микроструктурой цементного камня [7]. В.М. Москвин [8] считали основным условием обеспечения долговечности бетона создания тонкопористой структуры материала с преобладанием пор размером менее 1 микрона. На рис.1 показан общий характер изменения прочности бетона в зависимости от среды эксплуатации

и его водонепроницаемости. Данная обобщенная диаграмма построена по результатам многолетних обследований конструкций тонкостенных сооружений [4,9].

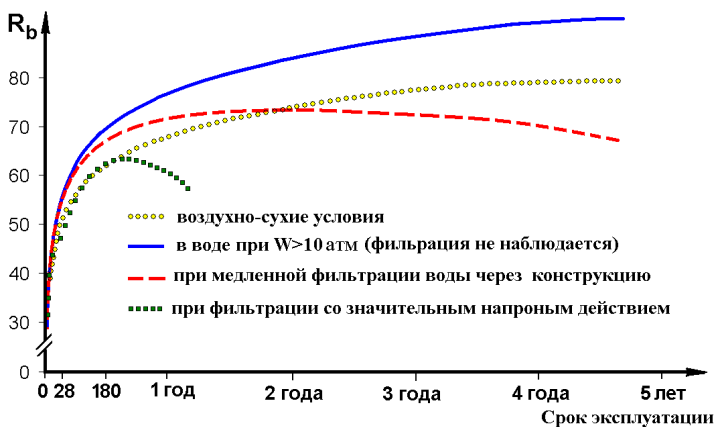


Рис.1. Общий характер изменения прочности бетона в зависимости от среды эксплуатации и его водонепроницаемости

Представляет интерес изучение механизма взаимовлияния технологической поврежденности и порового пространства, как непрерывно изменяющихся в процессе эксплуатации структурных параметров, и явления повторной гидратации цемента как основного источника самоуплотнения цементного композита.

На рис.2 показана общая схема влияния ТТ и ВПР на процессы поздней гидратации цемента. На схеме показаны устья ТТ (1,2), которые, как отмечалось выше, являются активными структурными элементами и в процессе продвижения фронта трещин вызывают образование новых отдельных кластеров в структуре композита. При этом с позиции влияния ТТ на процесс самозалечивания можно выделить устья условно «внешних» трещин, непосредственно связанных со средой эксплуатации (1) и ввиду этого по данным ТТ к устью может доставляться эксплуатационная среда, например вода, а также устья «внутренних» ТТ (2) связанных со средой эксплуатации лишь опосредованно через сеть внутренних капилляров. На характер развития первых весьма активное влияние оказывает среда эксплуатации, и в первую очередь расклинивающее действие воды и льда при замерзании и оттаивании [10]. Развитие фронта «внутренних» ТТ в меньшей

степени зависит от воздействия среды эксплуатации, но по мере развития ВПР в процессе эксплуатации происходит все большее проникновение «внешних» ТТ вглубь материала и соответственно конструкции.

Также отдельно можно выделить ТТ, прекратившие свой рост в результате выхода их устья в микропору цементного камня и за счет этого трансформировавшиеся в ВПР (3). Однако в последнем случае нельзя не учитывать тот факт, что фронт трещины может быть намного шире, чем геометрический размер поры. Соответственно под влиянием среды эксплуатации, оказывающей деструктивное воздействие в том числе и на открытые поры материала, возможно продолжение развитие ТТ, ранее локализованных в порах, в том числе их превращение в ЭТ.

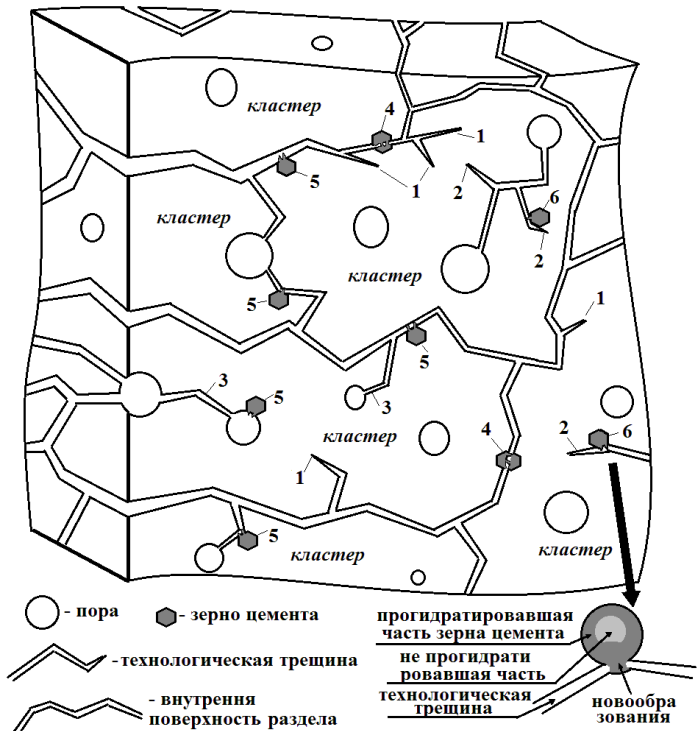


Рис.2. Схема влияния технологических трещин и внутренних поверхностей раздела на процессы повторной гидратации цемента

Рост и перераспределение ВПР и ТТ в структуре композита оказывает влияние и на процессы гидратации цемента, в том числе на позднюю гидратацию, которая способствует уплотнению структуры бетона, т.е. является основным источником самозалечивания [4].

На рис.2 выделено несколько вариантов влияния ВПР и ТТ на процесс гидратации цемента и соответственно на самозалечивание цементного камня. Как вероятный, хотя и не самый распространённый вариант, можно рассмотреть случай разрушения зерна цемента на отдельные части в результате роста трещины непосредственно через не полностью прогидратированное зерно цемента (4). Подобный механизм, на наш взгляд, возможен с учетом собственных напряжений, возникающих в зерне вяжущего в результате масообменных реакций. В данном случае отдельные части зерна оказываются на разных берегах ВПР или трещины, и за счет улучшения условий поступления к ним влаги интенсифицируют процесс гидратации. При условии относительно незначительного расстояния между частицами вяжущего возможно механическое сращивание между новообразованиями цементных минералов, т.е. реализация самозалечивания, в отдельных случаях обеспечивающая полную компенсацию структурной целостности композита.

Более вероятен случай обнажения поверхности частиц цемента в результате роста трещин и образования новых ВПР (5,6). При этом зерна вяжущего обнажаются для воздействия эксплуатационной среды, в результате чего также интенсифицируется процесс поздней гидратации. Интенсивностью процесса гидратации в этом случае будет несколько меньше, нежели при разломе зерна (4), однако при условии относительно незначительного расстояния до противоположного берега ТТ или ВПР продукты гидратации также могут механически срастить образовавшуюся полость. При этом можно отдельно выделить обнажение зерен в результате роста «внешних» трещин, непосредственно связанных со средой эксплуатации (5) и «внутренних» (6). В первом случае будет проявляться большая интенсивность гидратации ввиду лучших условий поступления влаги, т.е. самозалечивание будет проходить интенсивнее. Такая интенсификация способствует более быстрой «адаптивности» наружных слоев материала в конструкциях, которые с другой

стороны подвержены более жестким воздействиям коррозионной среды и эксплуатационных воздействий.

Например, влажные условия эксплуатации, характерные для гидротехнических сооружений, являются оптимальными для проявления «адаптивности» т.к. при поступлении влаги в ВПР, ТТ и пустоты в бетоне интенсифицируется гидратация внутренних не прогидратировавших частиц цемента. Дополнительно повысить адаптивность, и тем самым долговечность материала в конструкции, можно за счет применения современных модификаторов, в том числе кольматизирующих добавок [11].

### ***Выводы***

Описанный механизм влияния технологической поврежденности на процесс поздней гидратации цемента позволит, по нашему мнению, расширить представления специалистов о методах, направленных на дальнейшее раскрытие потенциальных возможностей реализации свойств материалов на основе портландцемента. Управление явлениями структурной самоорганизации путем направленной трансформации метастабильных и активных структурных элементов, в том числе процессом «самозалечивания» за счет поздней гидратации, позволит проявляться эффектам адаптации, что обеспечит повышение долговечности материала в конструкции в типичных для нее условиях эксплуатации.

### **Summary**

**The mechanism of the influence of technology damages on the process of the later cement hydration. Studied the effect cracks on the rate of chemical reactions. It is shown that the effect of adaptation enhances durability of the material design.**

### ***Литература***

1. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: из-во «ТЕС», 2010. – 176 с.
2. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. – Одесса: ИМК Город мастеров, 1998. – 168 с.
3. Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, С.Б. Фиц. – Одесса: Внешреламсервис, 2004. – 270 с.
4. Мишутин А.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений / А.В.Мишутин, Н.В.Мишутин. – Одесса: Эвен, 2011. – 292 с.
5. Чернявский В.Л. Адаптация бетона / В.Л. Чернявский – Днепропетровск: Нова ідеологія, 2002. – 216 с.
6. Долговечность железобетона в агрессивных средах / [С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссель]. – М.:Стройиздат, 1990 – 317 с.
7. Никишин В.А. Микроструктура цементного камня как фактор, определяющий водонепроницаемость и прочность бетона / В.А. Никишин – Промышленное и гражданское строительство. 2010. №10. - С. 41-44.
8. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / [В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев] – М.: Стройиздат, 1980 – 535 с.
9. Мишутин В.А. Долговечность существующих бетонов и корпусов плавучих судоремонтных доков, эксплуатируемых в морях с различными климатическими условиями / В.А. Мишутин – Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. –123 с.
10. Выровой В.Н. Механизм изменения структуры строительных композитов в условиях переменной влажности /В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Мишутин, Л.И. Резникова, Г.В.

Суханов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Випуск 29 - Одеса, 2008, – С. 54-63.

11. Дорофеев В.С. Повышение долговечности бетона тонкостенных гидротехнических сооружений за счет применения комплексных модификаторов / В.С. Дорофеев, А.В. Мишутин // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Випуск 27 - Одеса: Місто майстрів, 2007, - С. 160-164.