

УДК 666: 519.8

**АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ПОЕТАПНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ
МІКРОСТРУКТУРИ БЕТОНІВ**

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПОЭТАПНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
МИКРОСТРУКТУРЫ БЕТОНОВ**

**THE ANALYSIS OF MECHANISMS OF THE STAGE-BY-STAGE
ORGANIZATION OF THE MICROSTRUCTURE OF CONCRETE**

Коробко О.О., к.т.н., доц., Суханов В.Г., к.т.н., доц., Вировой В.М., д.т.н., проф. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса), **Пархоменко Р.В., к.т.н., доц.** (Львівський державний університет безпечної життєдіяльності МНС України, м. Львів)

Коробко О.А., к.т.н., доц., Суханов В.Г., к.т.н., доц., Вировой В.Н., д.т.н., проф. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса), **Пархоменко Р.В., к.т.н., доц.** (Львовский государственный университет безопасной жизнедеятельности МЧС Украины, г. Львов)

Korobko O., A., candidate of Science, docent, Sukhanov V., G., candidate of Science, docent, Vyrovoy V., N., doctor of technical sciences, professor (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture), **Parkhomenko R., V., candidate of Science, docent** (Lviv State University Life Safety MOE, Lviv)

Представлено аналіз етапів організації мікроструктури бетонів. Показано, що самозародження та розвиток тріщин і внутрішніх поверхонь розділу як базисних елементів мікроструктури відрізняються за механізмом дії на різних рівнях її структурних неоднорідностей.

Представлен анализ этапов организации микроструктуры бетонов. Показано, что самозарождение и развитие трещин и внутренних поверхностей раздела как основных элементов микроструктуры отличаются по механизму действия на различных уровнях ее структурных неоднородностей.

The analysis of stages of the formation of the microstructure of concrete is presented. It is shown, that self-origin and progress of cracks and inner surfaces of the partition as basic elements of the microstructure differ on the mechanism of action at its various levels structural heterogeneities.

Ключові слова:

Бетон, структурні неоднорідності, мікроструктура, активні елементи, тріщини, внутрішні поверхні розподілу.

Бетон, структурные неоднородности, микроструктура, активные элементы, трещины, внутренние поверхности раздела.

Concrete, structural heterogeneities, microstructure, cracks, inner surfaces of the partition.

Введение. В работах [1, 2] в качестве самостоятельной структурной неоднородности выделена неоднородность на уровне вяжущего (микроструктура бетона). Явления и процессы, которые протекают в микроструктуре, являются основополагающими для получения широкой номенклатуры материалов на основе минеральных вяжущих. Физико-химические процессы, реакции поликонденсации неорганических материалов, диффузионный массоперенос, который лежит в основе «холодного спекания», топахимические процессы и явления и т.д. – это далеко не полный перечень процессов, которые протекают в результате реакций гидратации и последующих трансформаций исходного порошкообразного вяжущего в камневидный материал [3, 4, 5, 6, 7].

Таким образом, процессы и явления, которые возникают и развиваются в микроструктуре бетона при гидратации минеральных вяжущих, следует рассматривать как основополагающие, которые инициируют все последующие преобразования материала на всех уровнях структурных неоднородностей. Это предопределило задачу исследований – проанализировать основные механизмы организации микроструктуры бетонов и выделить основные элементы ее структуры, в значительной мере отвечающих за проявление физико-технических свойств материала и способность сохранять их при действии эксплуатационных нагрузок.

Поэтапная организация микроструктуры. В работах [2, 9] цементно-вяжущие композиции предложено рассматривать как высококонцентрированные грубодисперсные лиофобные системы с лиофильной границей раздела фаз. Это предполагает, что на начальных этапах структурного оформления физико-механические процессы для таких систем являются доминирующими, в значительной степени определяющими их структуру и свойства.

При анализе выделены следующие этапы организации структуры с учетом того, что система «живет» в реальном для проявления тех или иных событий времени.

I этап – первичная организация структуры цементно-водных композиций как дисперсных систем;

II этап – протекание физико-химических процессов взаимодействия минералов цемента с водой с выделением частиц новой фазы;

III этап – организация структуры частиц новой фазы и образование новой для начальной системы структурной неоднородности;

IV этап – взаимодействие структурных неоднородностей различного вида и формирование элементов структуры;

V этап – формирование структуры цементного камня.

Первый этап связан с протеканием физико-механических процессов межчастичных взаимодействий. В силу полиминеральности и полидисперсности частиц дисперсной фазы на каждую индивидуальную частицу действует неуравновешенная сила межчастичных взаимодействий. В первично неупорядоченной системе спонтанно протекают процессы, направленные на образование определенной организованности за счет образования структурных блоков, состоящих из частиц разного минералогического состава. Можно заключить, что в любом выделенном объеме дисперсной системы существует свое неповторимое распределение частиц по кластерам, которые включают в себя индивидуальное сочетание частиц по размерам и минералогическому составу.

Второй этап организации структуры начинается практически одновременно с первым. Это связано с тем, что при образовании системы формируется межфазная граница раздела сначала между отдельными зернами и жидкой средой, а затем – между поверхностью структурных агрегатов и жидкой фазой. Формирование межфазной границы раздела – сложный и важный момент создания системы, обусловленный комплексом физико-химических и физико-механических явлений и процессов. В образующихся структурных агрегатах в этот период идут процессы формирования межчастичных контактов. Это вызывает диффузию ионов новой фазы в зону контактных перешейков. Диффузионный массоперенос может реализовываться через сольватные оболочки зерен (поверхностный массоперенос) и через дисперсионную среду. Таким образом, геометрические особенности структурных агрегатов (соотношение размеров и вида контактирующих частиц, их форма и условия контактирования) предопределяют направленную миграцию ионов, создавая в зоне контактных перешейков их повышенную концентрацию, что, по-видимому, способствует углублению реакций гидратации в других поверхностных слоях зерен.

Появление достаточного количества ионов новой фазы и их спонтанное перераспределение по поверхности зерен и в объеме дисперсионной среды является отличительной характеристикой третьего этапа структурообразования.

В результате физико-химических процессов взаимодействия минералов цемента с водой, с учетом всех возможных механизмов протекания реакций, появляются продукты новой фазы, которые, в результате физических и физико-механических процессов, участвуют в зарождении и росте кристаллических составляющих и формировании нанокластерных структур. Таким образом, в системе образуется новая структурная неоднородность на

уровне продуктов новообразований с характерной для этой неоднородности структурой.

Новая структурная неоднородность на этом этапе играет существенную роль в развитии структуры материала. Продолжающиеся физико-химические явления гидратации, диффузионный массоперенос, углубление процессов локального изменения плотности делают эту структурную неоднородность нестабильной, развивающейся. Проявляющиеся объемные изменения связаны как с процессами химической и физической усадки, так и с локальными термическими деформациями. Эти деформационные процессы не только изменяют структуру на уровне продуктов гидратации, но и передаются на другую структурную неоднородность на уровне исходных зерен цемента.

Взаимодействие структурных неоднородностей различных уровней характеризует *четвертый этап* организации микроструктуры бетона.

В этот период происходят процессы, связанные с окончательным распределением исходных частиц и частиц продуктов новообразований по своим структурным блокам. Это ведет к появлению площадей поверхностей межкластерных поверхностей раздела. Образовавшиеся площади поверхности можно принять как внешние границы раздела отдельных блоков. Собственные деформации кластеров проявляются на образовавшихся поверхностях, что увеличивает ширину раскрытия межкластерных поверхностей раздела, которые можно представить как зародышевые трещины. Механизм развития таких трещин рассматривается в работах [2, 8]. Отметим, что за счет накопления пластических деформаций по фронту трещин происходит скачкообразное их подрастание. Основная причина роста таких трещин связана, по нашему мнению, с деформационными процессами, которые неизбежно сопровождают физико-химические процессы углубления реакций гидратации.

В этот период происходят кластер-кластерные взаимодействия на различных уровнях структурных неоднородностей. В результате таких взаимодействий формируются межкластерные поверхности раздела, которые замыкают деформации на себя. Это ведет к появлению новых элементов структуры – трещин и внутренних поверхностей раздела. На уровне продуктов новообразований появление межкластерных поверхностей препятствует переносу требуемых ионов к зародышу, что не позволяет ему вырасти в кристалл. Это дает основание заключить, что образовавшаяся нанокластерная структура характеризуется своеобразным аморфным строением.

Таким образом, в этот период в микроструктуре самозарождаются принципиально новые элементы микроструктуры – трещины и внутренние поверхности раздела, которые присутствуют на различных уровнях структурных неоднородностей. Трещины, как самостоятельный элемент структуры, начинают вести свою собственную жизнь в формирующемся

материале. В силу своей специфической способности концентрировать деформации и напряжения у устья, они перераспределяют вновь возникающие деформации между отдельными кластерами. Кроме того, возникшие трещины находятся в перманентном неравновесном состоянии и способны к собственному трансформированию. Часть трещин, при диффузионном массопереносе вещества в область устья, способны выродиться в поры. Часть трещин, выклиниваясь на берега других трещин, может трансформироваться во внутренние поверхности раздела. Часть трещин остается в микроструктуре, что предполагает их дальнейшее участие в ее структурных преобразованиях. Эти процессы характеризуют пятый этап организации микроструктуры бетона.

Для наглядности процессов поэтапной организации микроструктуры предложена схема ее структурообразования, рис. 1.

На пятом этапе можно предложить модель микроструктуры. В модель включены трещины и внутренние поверхности раздела. Это не означает, что в нашем анализе не уделено должного внимания другим структурным элементам и их группам. Проведенные исследования позволили заключить, что различные механизмы организации структур на различных уровнях структурных неоднородностей приводят к одному финалу – образованию структурных блоков. Проявляется такое свойство системы как эквифинальность – из различных начальных условий различными путями и механизмами достигаются одинаковые результаты. В нашем случае под одинаковым результатом понимается образование автономных структурных блоков – кластеров различных уровней. В свою очередь, спонтанное появление дискретных структурных блоков неизбежно ведет к самозарождению поверхностей раздела между ними. Анализ показал, что образовавшиеся межблочные (межагрегатные, межкластерные) поверхности раздела способны превратиться в трещины и внутренние поверхности раздела. Трещины способны реагировать на любые воздействия, связанные как с внешними факторами, так и с внутренними деформационными процессами. Внутренние поверхности раздела способны перераспределять между отдельными структурными составляющими деформации, возникающие под действием как внешних, так и внутренних факторов. Таким образом, они являются активными элементами, которые могут адекватно реагировать на практически любые внешние и внутренние воздействия. Эти положения легли в основу предложенной модели микроструктуры бетона в виде определенного набора трещин и внутренних поверхностей раздела, которые присутствуют в виде самостоятельных элементов структуры на всех выделенных уровнях структурных неоднородностей (этап V, рис. 1).

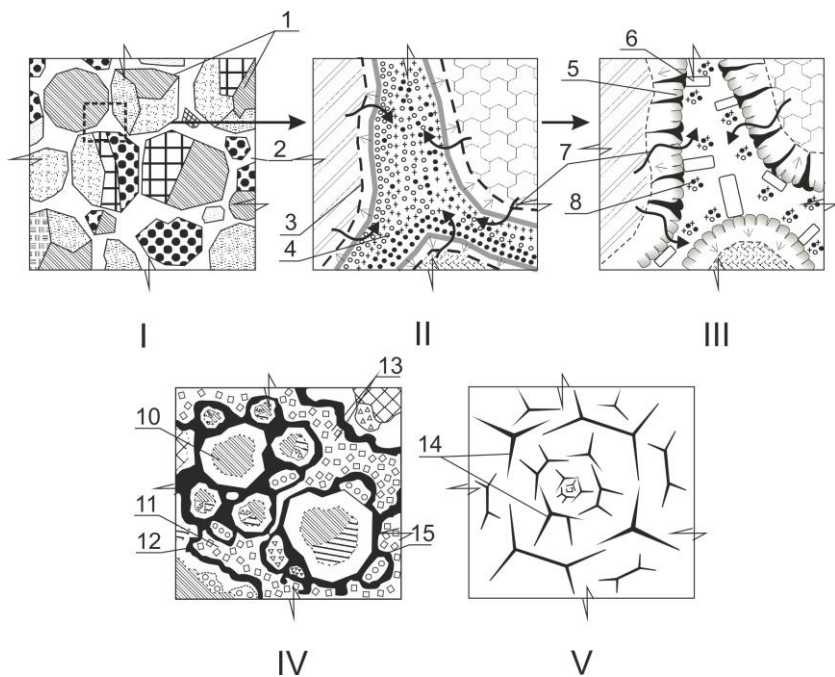


Рис.1. Схема поэтапной организации микроструктуры бетона.

I, II, III, IV, V – этапы формирования микроструктуры бетона:

1 – полиминеральные и полидисперсные исходные зерна цемента; 2 – дисперсионная среда; 3 – формирование фронта реакции; 4 – частицы новой фазы; 5 – слой зародышей на межфазной границе раздела; 6 – кристаллические составляющие продуктов новообразований; 7 – вынос продуктов новообразований в дисперсионную среду; 8 – образование зародышей новой фазы (нанокластеров) в объеме дисперсионной среды; 9 – реликтовые области минералов цемента; 10 – кластерные структуры из частиц цемента; 11 – кластеры продуктов новообразований; 12 – межкластерные границы раздела на различных уровнях структурных неоднородностей; 13 – внутренние границы раздела между структурными блоками различных уровней; 14 – трещины как элементы структуры различных уровней структурных неоднородностей микроструктуры; 15 – контактные перешейки.

С целью подтверждения изменения параметров активных элементов (трещин и внутренних поверхностей раздела) при действии на материал малоцикловой нагрузки, связанной с изменением температурно-влажностного режима эксплуатации, был проведен ряд экспериментов. Для управления начальным распределением активных элементов в цементный камень с $V/C = 0,28$ вводили кварцевый наполнитель с $S_y=100 \text{ м}^2/\text{кг}$ в количестве $N=20\%$ по массе. Использование наполнителя в качестве управляющего фактора позволило изменить поврежденность цементного камня технологическими дефектами до 50%. В свою очередь, изменение технологической поврежденности привело к изменению количества эксплуатационных трещин и внутренних поверхностей раздела в условиях малоциклового нагружения, рис.2.

Как показали исследования, после 100 циклов увлажнения и высушивания, коэффициент поврежденности ненаполненного цементного камня увеличился в 2 раза, а после замораживания и оттаивания – в 3 раза. Коэффициент поврежденности цементных композиций с наполнителем при этом изменился на 56-67%. Изменение поврежденности привело к изменению стойкости цементных композиций как в условиях многократного увлажнения и высушивания [9], так и замораживания и оттаивания [10].

Проведенный комплекс экспериментальных исследований позволяет заключить, что активные элементы являются объективно существующими необходимыми структурными составляющими, во многом определяющими физико-технические свойства материала и функциональную стабильность конструкции в условиях эксплуатационных воздействий. Для проявления созидательной роли активных элементов структуры необходимо обеспечить такое их начальное распределение на различных уровнях структурных неоднородностей, при котором они были бы способны включать в работу метастабильные элементы [8] и режиме самосогласования обеспечивать структурные изменения системы без потери ее функционального назначения.

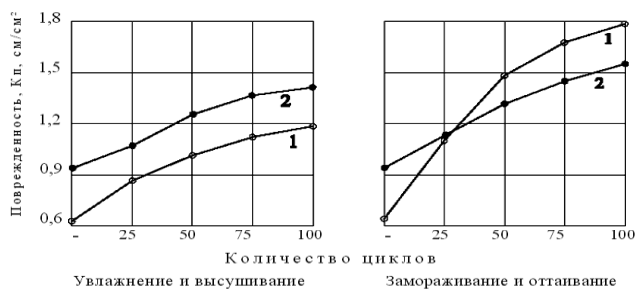


Рис.2. Изменение поврежденности в условиях малоциклового эксплуатационного воздействия:

- 1 – цементный камень без наполнителя ($V/C = 0,28$);
- 2 – цементный камень с наполнителем ($V/C = 0,28$; $N = 20\%$; $S_y = 100 \text{ м}^2/\text{кг}$).

Выводы.

Проведенный анализ позволил выделить основные этапы организации микроструктуры бетонов. Первый этап характеризуется проявлением межчастичных взаимодействий, результатом которых является начальное образование структурных агрегатов с индивидуальным сочетанием в них дисперсных частиц по составу и размерам. Одновременно с этим происходит протекание физико-химических реакций гидратации, обуславливающих возникновение продуктов новообразований и формирование новой для системы структурной неоднородности, что можно определить как второй этап организации микроструктуры бетонов. К отличительной характеристике третьего этапа следует отнести реализацию процессов и явлений, инициирующих развитие микроструктуры на нанометрическом уровне. Четвертый и пятый этапы связаны с взаимодействием подструктур на различных уровнях неоднородностей и самозарождением в микроструктуре бетонов качественно новых структурных элементов – трещин и внутренних поверхностей раздела. Была предложена модель микроструктуры бетонов в виде определенного набора трещин и внутренних поверхностей раздела, присутствующих на всех уровнях неоднородностей микроструктуры. Эти структурные элементы в силу их специфических особенностей в значительной мере предопределяют способность микроструктуры противостоять разрушающим воздействиям среды эксплуатации.

1. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов // Новые композиционные материалы в строительстве. – Саратов: СПИ. – 1981. – С.5-9. 2. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. – К.: Будівельник, 19991. – 144с. 3. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика // Избр. труды. – М.: Наука, 1979. – 334с. 4. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320с. 5. Будников П.П., Гистлинг А.М. Реакция в смесях твердых веществ. – М.: Стройиздат, 1971. – 488с. 6. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972. – 554с. 7. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред. Л.Г. Шпыновой. – Львов: Вища школа, 1981. – 160с. 8. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169с. 9. Сильченко С.В. Изменение поврежденности цементного камня в условиях многократного увлажнения и высушивания / С.В. Сильченко, В.Н. Выровой, Л.И. Резникова, А.В. Дорофеев // Вісник ОДАБА: Збірник наукових праць. – Одеса: Вид-во «Місто майстрів», 2005. – Вип.20. – С.148-154. 10. Загорчменная Н.О. Развитие трещин при многократном замораживании и оттаивании строительных композитов / Н.О. Загорчменная, Л.И. Резникова, В.Н. Выровой, Ю.О. Загорчменный // Вісник ОДАБА: Збірник наукових праць. – Одеса: Вид-во ТОВ «Зовнішрекламсервіс», 2007. – Вип.27. – С.78-84.