

**УДК 666: 519.8**

**НАПРАВЛЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ БЕТОНОВ**

**СПРЯМОВАНА ОРГАНІЗАЦІЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЯК СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ БЕТОНІВ**

**DIRECTING ORGANIZATION MICROSTRUCTURE AS A WAY OF CONCRETE DEMATERIALIZATION**

**Коробко О.А., к.т.н., доц., Суханов В.Г., к.т.н., доц., Выровой 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)

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

**Korobko O. A., candidate of technical sciences, associate professor, Sukhanov V. G., candidate of technical sciences, associate professor, Vyrovoy V.N., doctor of technical sciences, professor** (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa), **Parkhomenko R. V., candidate of technical sciences, associate professor** (Lviv State University of safe living Emergencies of Ukraine, Lviv)

**В статье представлен анализ механизмов организации и определены управляющие факторы направленного изменения микроструктуры как сложной самоорганизующейся системы.**

**У статті представлено аналіз механізмів організації та визначено керуючі фактори спрямованої зміни мікроструктури як складної системи яка самоорганізується.**

**In the article are presented an analysis of the mechanisms governing the organization and identify factors directional change in microstructure as a complex self-organizing system**

**Ключевые слова:**

**Микроструктура, система, бетон, вяжущее, взаимодействие.**

**Мікроструктура, система, бетон, в'яжуче, взаємодія.**

Microstructure, system, concrete, astringent, interaction.

### **Введение.**

В работе [1] строительные конструкции рассматриваются как сложные самоорганизующиеся открытые системы, целостность и функциональное назначение которых определяют взаимодействие и взаимовлияние определенной совокупности подсистем. В виде подсистемы можно выделить бетон, который по своей сути является полиструктурным с различными механизмами структурообразования на каждом уровне структурных неоднородностей [2]. Таким образом, сам бетон, как подсистема более сложной системы, сам является достаточно сложноорганизованным, полиструктурным, по мнению профессора В.И. Соломатова [3]. В качестве самостоятельной подструктуры (подсистемы) можно выделить микроструктуру, представленную неоднородностью типа «частицы дисперсной фазы – дисперсионная среда». В силу того, что основные процессы вещественного и структурного преобразования происходят в микроструктуре, то ее следует считать источником и базисом формирования структуры всей системы. Это связано с тем, что физико-химические и физико-механические процессы гидратации и структурообразования на уровне вяжущего сопровождаются объемными изменениями и термоэффектами, которые передаются и воспринимаются другими подсистемами (уровнями структурных неоднородностей), что инициирует процессы их структурного оформления. Можно предположить, что направленное изменение начальной организации микроструктуры за счет изменения качественного и количественного составов частиц вяжущего позволит обеспечить требуемые параметры как ее собственных подструктур, так и структурных составляющих других уровней. В связи с этим, была определена задача исследований – проанализировать механизмы организации микроструктуры для учета влияния природы частиц вяжущего и определить управляющие факторы направленного изменения микроструктуры как высококонцентрированной полиминеральной системы.

### **Выбор модели микроструктуры.**

Микроструктура, представленная неоднородностью типа «дисперсная фаза – дисперсионная среда» может рассматриваться как система, организованная по принципу аутопоэза. Согласно [4] под термином аутопоэзис понимается процесс самосозидания, самостроения. Такое представление предполагает, что организация структурных составляющих микроструктуры будет осуществляться путем развития нелинейных сетей взаимоотношений на некотором множестве элементов. Под сетью в данном случае понимается особый способ структурообразования, при котором компоненты сети постоянно порождают и преобразуют друг друга, реализуя при этом сеть процессов, которые их производят. Кроме этого, отличительной особенностью аутопоэзной сети является создание границы

этой сети как активного компонента, участвующего в ее реализации, обозначающего сферу операций сети и определяющего ее как единое целое.

В начальный момент структурообразования микроструктура при определенных допущениях и предположениях [5, 6] представляет собой многофазную гетерогенную систему с лиофильной границей раздела фаз, состоящую из грубодисперсных лиофобных частиц, произвольно распределенных в дисперсионной среде на расстояниях ближней и дальней коагуляции, что предполагает их взаимодействие. Межчастичное взаимодействие ведет к образованию переплетенной паутины многослойных силовых линий с выделением результирующих сил, которые реализуют стремление неравновесной системы к снижению избыточной поверхностной энергии путем распределения отдельных частиц по структурным агрегатам (кластерам). Межкластерные взаимодействия выводят организацию микроструктуры на новые масштабные уровни с сохранением сетевого режима, что обуславливает формирование более сложных форм сетей взаимосвязей, включающих мелкие сети.

Способность к образованию новых структур с эмерджентными свойствами позволяет отнести микроструктуру бетона к самоорганизующимся системам и представить ее как сложную совокупность разномасштабных кластерных структур, связанных не жесткой иерархией подчинения нижних уровней верхним, или наоборот, а сетью отношений взаимовлияния. В этом случае функцией каждого структурного элемента системы будет являться участие в организации или трансформации других элементов структуры, которые, в свою очередь, будут влиять на изменение его параметров и деятельность в общей сети процессов организации микроструктуры.

Развитие микроструктуры как сложной самоорганизующейся системы представляет собой поступательные акты взаимодействий, вызывающих непрерывные изменения структуры системы и формирует сеть уникальных путей организации ее структурных составляющих. На всех этапах возникновения и развития этой сети микроструктура представляет собой результат предыдущих структурных изменений, которые определяют последующие состояния системы. Таким образом, микроструктуру бетона можно рассматривать как динамичную систему.

Обусловленность развития аутопоэзных систем их собственной структурой позволяет им самостоятельно организовывать себя, используя ресурсы своего окружения, с которым они находятся в отношениях взаимной причинности и взаимодействуют через постоянный обмен веществом, энергией и информацией. Это позволяет представить микроструктуру как открытую систему.

Таким образом, микроструктура бетона представляет собой сложную динамичную открытую аутопоэзную систему. Организация структуры микроуровня реализуется как сеть физико-механических процессов

образования взаимосвязанных агрегатов из частиц вяжущего как уникальных содружеств с неповторимым набором элементов. Выделение процессов кластерообразования как преобладающих в общей сети процессов и явлений, протекающих в микроструктуре, обусловлено тем, что именно межчастичные и межкластерные взаимодействия задают пути ее дальнейшего развития, определяя кинетику обменных реакций между дисперсной фазой и дисперсионной средой. Поэтому важной задачей для обеспечения заданной организации микроструктуры представляется изучение влияния природы дисперсных частиц на начальные процессы кластерообразования.

### **Избирательность межчастичных взаимодействий при начальной организации микроструктуры.**

Известно [7, 8], что цементное вяжущее состоит из частиц различных моно- и полиминеральных составов. Это обуславливает сложную паутину взаимосвязей как между отдельными частицами, вступающими во взаимодействие, так и между структурами, которые они образуют. Представление организации микроструктуры как аутопоэзной сети взаимодействий предполагает, что среда, окружающая каждый компонент системы, будет лишь инициировать, но не определять их реакции на действие внешних сил. Свобода выбора индивидуальных откликов на возмущающие воздействия заложена в самой аутопоэзной сети и диктуется параметрами компонентов. Таким образом, можно предположить, что поведение частиц дисперсной фазы микроструктуры в начальный период ее организации по отношению друг к другу должно быть избирательным, основанным на способности распознавать «родственный» состав и реагировать на него определенным образом.

Различная природа частиц вяжущего обуславливает их отличие по величине поверхностного натяжения  $\sigma$  (или поверхностной активности [9]:  $A_{\pi} = \partial\sigma/\partial c_{(c \rightarrow 0)}$ , где  $c$  – концентрация вещества). Эта характеристика, наряду с прочими факторами, определяет поведение частиц в системе и степень их влияния по отношению друг к другу и дисперсионной среде. Поверхностная активность является функцией энергетического состояния поверхности дисперсных частиц и зависит от природы, структуры и дефектности их поверхностного слоя.

Полиминеральность частиц дисперсной системы отражается на значениях сил межчастичных взаимодействий  $F_c$ , как через неоднородность  $\sigma$  межфазных границ раздела, так и вследствие различия величины  $A_{\pi}$  взаимодействующих частиц. В таких условиях силы межчастичных взаимодействий будут определяться градиентом поверхностного натяжения между твердой и жидкой фазами и между твердыми телами. При этом можно предположить, что частицы одного вида (большей поверхностной активности) выступают в качестве «структурообразующих» центров [10] для частиц другого вида (меньшей поверхностной активности).

Отличие дисперсных частиц по их природе обуславливает вероятность реализации аккомодационного механизма [11] организации кластерных структур. Этот механизм основан на избирательности межчастичных взаимодействий по принципу положительной и отрицательной комплиментарности [12]. В этом случае проявляется способность частиц «распознавать» природу друг друга, что выражается в их стремлении ориентироваться на частицы своего вида, независимо от их размеров и расстояния между ними. При сближении частицы будут ориентироваться таким образом, чтобы войти в контакт участками поверхности идентичного состава. В результате следует ожидать образования полностью однородных по минералогическому составу структурных агрегатов или структур, в которых прослеживается определенное чередование совокупностей частиц одинаковой природы. Это подтверждается проведенными исследованиями на модельных системах.

Для анализа был выделен фрагмент модельной системы. В качестве дисперсионной среды использовали эпоксидную смолу без отвердителя, на поверхности которой в произвольном порядке располагали частицы различного вида. По составу частицы подбирали таким образом, чтобы обеспечить их фильность и фобность по отношению к дисперсионной среде. Принятые расстояния между частицами позволяли проявиться силам межчастичных взаимодействий, которые больше или равны силе их тяжести. Организация структуры модельной системы происходила путем перераспределения частиц по упорядоченным структурным агрегатам.

Составы взаимодействующих частиц инициируют аккомодационный механизм кластерообразования, а соотношение их размеров и расстояния между ними – механизмы, реализуемые в соответствии с условиями:  $F_c = 2\pi(d_1 \cdot d_2 / (d_1 + d_2))$  и  $F_c = m_1 \cdot m_2 / r^2$  [6, 13].

Проявление выделенных механизмов в дисперсной системе осуществляется как сеть физических процессов производства новых структур в пределах изменяющихся внешних границ, что является отличительными признаками аутопоэзной системы. Причем сети реализации каждого механизма переплетаются, образуя сложную паутину взаимоотношений и взаимодействий между дисперсными частицами.

На рис.1 показан аккомодационный механизм организации кластерных структур из частиц различной природы.

В некоторых случаях влияние состава дисперсных частиц так велико, что преобладает над силами взаимодействия, обусловленными их зависимостью от соотношений размеров зерен, произведения их масс и квадрата межчастичных расстояний. Это ведет к образованию агрегатов, состоящих из частиц одного состава и не вступающих в контакт со структурами, включающими частицы иной природы, рис.1, а.

В случаях, когда состав зерен не доминирует над другими их параметрами, частицы различного вида осуществляют как гомо- так и

гетерогенные взаимодействия с организацией однородных и смешанных кластерных структур. В то же время, объединение самих агрегатов происходит по аккомодационному механизму кластерообразования, что провоцирует их пространственную ориентацию по отношению друг к другу. Образующиеся структуры характеризуются упорядоченным распределением в них частиц одной природы при общей уникальности их сочетания, рис. 1, б.

Сосуществование в дисперсной системе полиминеральных зерен также обуславливает их взаимное ориентирование при межкластерных взаимодействиях, что выражается в стремлении частиц вступить в контакт участками поверхности одинакового состава.

Для экспериментального подтверждения пространственной ориентации полиминеральных зерен вяжущего были приняты модели дисперсных частиц, в качестве которых использовали вспененные гранулы полистирола. Во взаимно перпендикулярных направлениях несмываемой краской наносились полосы, разделяющие поверхность гранул на лиофобные и лиофильные участки по отношению к эпоксидной смоле, выступающей в качестве дисперсионной среды.

На представленных фотографиях (рис.2) показан поэтапный процесс образования структурных агрегатов из полистирольных гранул. Перемещение частиц сопровождалось их поворотом друг относительно друга, что подтверждается изменением углов ориентирования между отдельно взятыми гранулами через определенные промежутки времени.

Пространственная ориентация зерен может также осуществляться относительно их активных центров, что характерно и взаимодействующих частиц одной природы. Под активными центрами понимают различного рода дефекты в структуре поверхностного слоя частиц, создающие вокруг себя зоны повышенной удельной энергии [11]. Уменьшение этой энергии возможно при объединении двух или нескольких структурных микродефектов в одно замкнутое пространство, закрытое для внешней среды [14]. При этом обуславливается взаимное ориентирование частиц, вступивших во взаимодействие.

Образовавшиеся в результате межчастичных взаимодействий кластерные структуры представляют собой самостоятельные структурные элементы, способные взаимодействовать между собой с организацией еще более сложных структур типа «кластер в кластере» и «кластер в кластере – кластер в кластере» [15]. Каждый из этих агрегатов характеризуется своим набором частиц и отличается от других размерами, формой и строением, определяемых предысторией их организации.

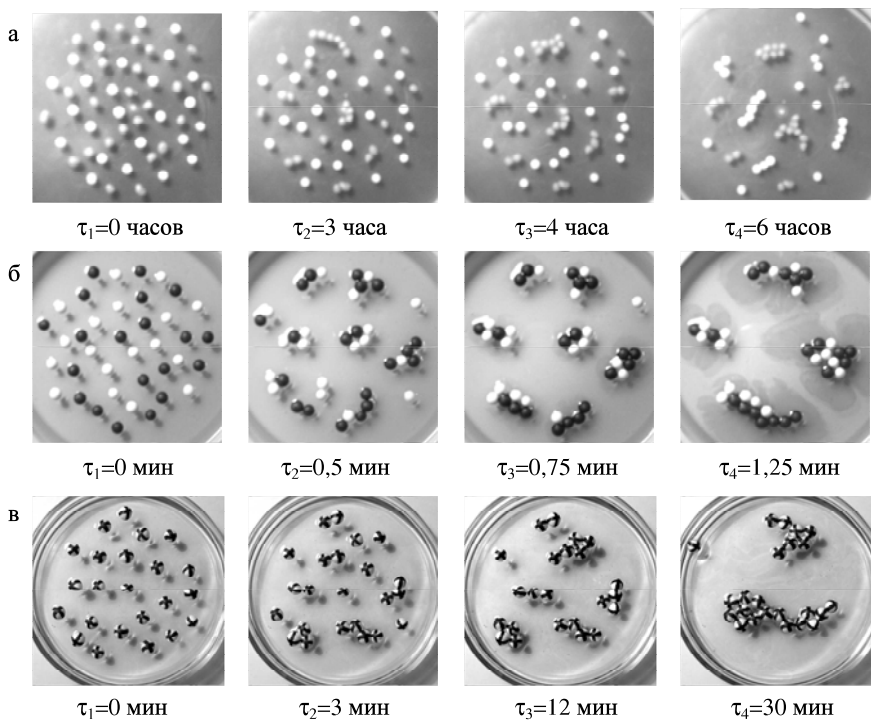


Рис. 1. Аккомодационный механизм организации кластерных структур из частиц различной природы.

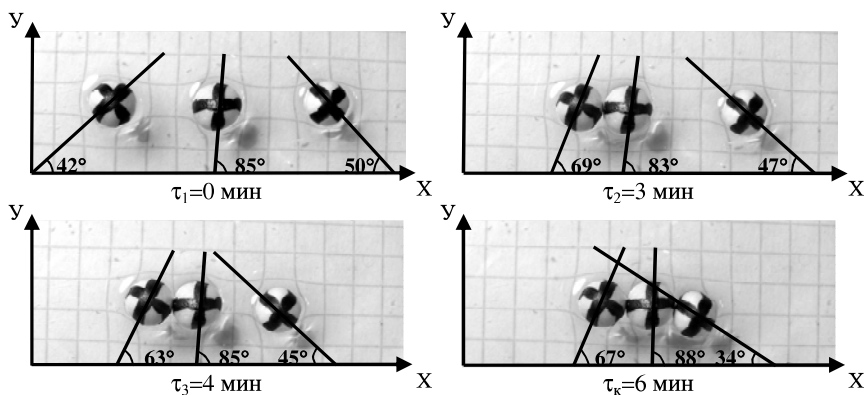


Рис. 2. Моделирование пространственного ориентирования частиц вязущего.

Усложнение процессов организации микроструктуры в результате межблочных взаимодействий приводит к образованию в системе вертикально и горизонтально переплетенной сети разномасштабных межкластерных поверхностей раздела, организованной по принципу «сети внутри сетей». Межкластерные поверхности раздела при достижении размеров, критических для образующих их структур, переходят в ранг зародышевых трещин и со временем, подрастая в результате объемных деформаций твердеющей системы, преобразуются в технологические трещины, которые при замыкании их друг на друга трансформируются во внутренние поверхности раздела. Новые элементы микроструктуры определяют ее гетерогенность, которая имеет наследственный сложноорганизованный сетевой характер.

Межкластерные взаимодействия осуществляются по тем же механизмам, что и взаимодействия между отдельными частицами дисперсной фазы, включая аккомодационный механизм кластерообразования. Это предполагает активное влияние состава внешних поверхностей кластерных структур на образование межкластерных поверхностей раздела, от параметров которых зависят характеристики начальных трещин. Таким образом, для обеспечения заданной сети технологической поврежденности микроструктуры, а в итоге и требуемых свойств бетона, следует учитывать способность ее структурных составляющих к избирательным взаимодействиям в период начального структурообразования твердеющей системы.

Природа частиц вяжущего задает пути организации структурных агрегатов требуемых составов, условия их взаимодействия, состояние контактных зон между ними, условия и кинетику протекания физико-химических процессов гидратации, выделение продуктов новой фазы и условия их структурообразования. Тем самым определяется развитие технологических трещин и внутренних поверхностей раздела как активных элементов структуры бетона, отвечающих за проявление его свойств.

Проведенный анализ дает основание заключить о перспективности использования наполнителей, вид и дисперсность которых могут выступать управляющим фактором, инициирующим спонтанные процессы организации микроструктуры в требуемом направлении. Это должно привести к повышению физико-технических характеристик бетона при снижении его материалоемкости в результате рационального расхода клинкерной составляющей.

### **Выводы.**

Организация микроструктуры как сложной самоорганизующейся открытой аутопоэзной системы задается начальными условиями и в значительной мере природой частиц вяжущего. Зависимость сил межчастичных взаимодействий от состава и энергетического состояния поверхности дисперсных частиц с учетом их положительной и отрицательной комплиментарности предполагает возможность



направленного обеспечения требуемых составов кластерных структур для организации микроструктуры с параметрами сети внутренних границ раздела, отвечающими за повышение свойств бетона и снижение его материалоемкости.

- 1.** Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169с.
- 2.** Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий. Монография / Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. – Одесса: Изд-во «Внешрекламсервис», 2004. – 270с.
- 3.** Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Монография / Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др. – Ташкент: ФАН, 1991. 345с.
- 4.** Матурана У. Древо познания: Биологические корни человеческого понимания. Монография / Матурана У., Варела Ф. – М.: Изд-во «Прогресс - Традиция», 2001. – 224с.
- 5.** Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Монография / Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. – К.: Будівельник, 1991. – 144с.
- 6.** Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. Монография / Урьев Н.Б. – М.: Химия, 1980. – 320с.
- 7.** Бутт Ю.М. Порландцемент. Минералогический и гранулометрический составы, процессы модифицирования и гидратации. Монография / Бутт Ю.М., Тимашев В.В. – М.: Стройиздат, 1974. – 328с.
- 8.** Пашенко А.А. Теория цемента. Монография / Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С., Евсютин Ю.Р., Салдугей М.М., Саницкий М.А., Сербин В.П., Токарчук В.В., Удачкин И.Б., Чистяков В.В. – К.: Будівельник, 1991. – 168с.
- 9.** Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Монография / Фролов Ю.Г. – М.: Химия, 1982. – 400с.
- 10.** Соломатов В.И. Кластерообразование композиционных строительных материалов / Соломатов В.И., Выровой В.Н. // Технологическая механика бетона. – Рига: РПИ, 1985. – С.5-21.
- 11.** Гегузин Я.Е. Физика спекания. Монография / Гегузин Я.Е. – М.: Наука, 1984. – 312с.
- 12.** Гумилев Л.Н. Этногенез и биосфера Земли. Монография / Гумилев Л.Н. – Л.: Гидрометео издат., 1990. – 528с.
- 13.** Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / Ребиндер П.А. // Избр. труды. – М.: Наука, 1979. – 334с.
- 14.** Коробко О.А. Анализ механизмов организации структуры цементных композиций как полиминеральных и полидисперсных систем / Коробко О.А., Выровой В.Н., Виноградский В.М., Дорофеев А.В. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Вид-во «Місто майстрів», 2006. – Вип.24. – С.144-150.
- 15.** Соломатов В.И. Интенсивная технология бетонов. Монография / Соломатов В.И., Тахиров Н.К., Шахех Шах. – М.: Стройиздат, 1989. – 260с.