

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СТРУКТУРНЫХ ЯЧЕЕК НА ОРГАНИЗАЦИЮ  
МАКРОСТРУКТУРЫ БЕТОНА**

**Суханов В.Г.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
Украина*

Изменяя уровень взаимодействия твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей можно изменять характер распределения деформаций сжатия и растяжения в каждой структурной ячейке бетона [1]. Такой технологический прием используется при гидрофобизации пористых заполнителей, активации поверхности заполнителей в электромагнитных полях и в электроразрядах, использовании специальных химических добавок для обработки заполнителей и т.п. Результаты исследований показали, что изменение когезионно-адгезионных сил связи позволяет изменять физико-механические свойства тяжелых бетонов и бетонов на пористых заполнителях, повышать их стойкость в условиях многократного увлажнения и высушивания, замораживания и оттаивания, при агрессивном действии среды эксплуатации.

Кроме того, на распределение собственных деформаций твердеющего матричного материала, как показано в работах [2, 3], оказывают влияние геометрические характеристики структурных ячеек бетона. В данном случае под структурной ячейкой понимается часть матрицы и группа заполнителей, которая ее окружает. Под геометрическими характеристиками понимается форма заполнителей, расстояние между ними, способы укладки, ориентирование заполнителей друг относительно друга и соотношение их размеров. Достаточно изменить любой параметр из геометрических характеристик, чтобы изменилось распределение собственных деформаций твердеющего матричного материала в структурной ячейке бетона. Для анализа влияния изменения геометрических параметров на распределение деформаций твердеющего матричного материала были проведены исследования на моделях структурных ячеек с учетом взаимодействия матрицы с поверхностью заполнителей.

В принятых моделях изменялось ориентирование заполнителей в каждой модели структурной ячейки. Показано, что при изменении ориентирования заполнителей изменяется распределение собственных деформаций матричного материала [4]. При этом отмечено, что при одинаковом уровне взаимодействия твердеющего материала с

поверхностью заполнителей, характер распределения деформаций зависит от ориентирования заполнителей друг относительно друга как при кубической, так и при гексагональной укладке.

Возникающие градиенты деформаций, связанные с геометрическими характеристиками структурных ячеек и с адгезионно-когезионными силами связи матрицы с поверхностью заполнителей могут быть причиной нарушения сплошности матрицы. Для подтверждения этого были изготовлены плоские модели структурных ячеек бетона.

В качестве материала матрицы использовалось цементное тесто с  $В/Ц = 0,28$  и глиняная суспензия с  $В/Г = 0,6$ . Использование в качестве матричного материала принципиально различных материалов, как по виду, так и по способу перехода из одного реологического состояния в другое, связано со следующим. В работах [5, 6] подчеркивается, что распределение объемных деформаций в самом гетерогенном материале и в изделиях из него не зависит от природы материала и способов его твердения, а определяется геометрическими характеристиками структуры (локальные деформации) и геометрическими особенностями изделий (интегральные деформации). Общее, что должно быть одинаковым для таких материалов, это уменьшение или увеличение объемов при их твердении. Этим требованиям отвечают твердеющие цементные композиции и глиняные суспензии. При одинаковых направлениях деформаций их количественные значения будут существенно различными, что должно способствовать обнаружению трещин в моделях структурных ячеек и еще раз подтвердить, что распределение собственных деформаций и возникающие при этом градиенты по величине и направлению действия зависят от геометрических характеристик структурных ячеек и от уровня взаимодействия твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей.

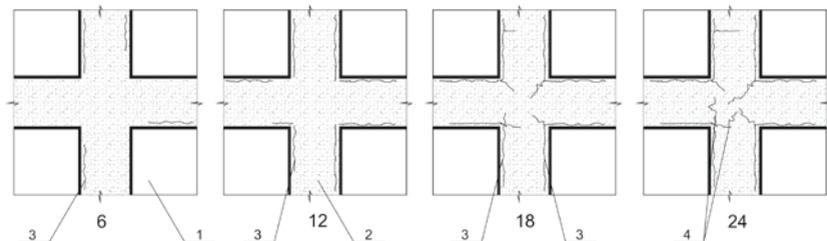
Использование цементного теста в модели структурной ячейки принято в предположении, что характер развития деформаций в цементной матрице практически одинаковый для мелких и крупных заполнителей. Поэтому расстояние между заполнителями ( $h$ ) принято в относительных величинах их приведенного радиуса ( $R$ ). В наших опытах расстояния между заполнителями приняты  $h = 0,2R$ ,  $h = 0,4R$  и  $h = 0,6R$ . При данном анализе мы ограничились расстоянием  $h = 0,2R$ , что наиболее характерно для бетонов на крупных заполнителях.

Первые трещины сцепления появились через 6 часов твердения цементной композиции. Поверхность заполнителя не обрабатывалась, исходя из предположения, что в начальные периоды схватывания и твердения когезионная прочность выше прочности адгезии цементной матрицы к поверхности заполнителя. Возникновение трещин сцепления связано, по нашему мнению, с развитием объемных

деформаций, направленных к равноудаленным от поверхности заполнителя участкам.

После 12-ти часов твердения продолжали развиваться трещины сцепления, образуя новую поверхность раздела – «берега трещин сцепления – поверхность заполнителя». В силу того, что на примыкающих поверхностях заполнителя возникают разнонаправленные деформации, которые проявляются на новой поверхности раздела, на гранях заполнителя концентрируются деформации сдвига. Это ведет к образованию трещин в матричном материале после 18-ти часов твердения. Появившиеся трещины направлены от граней заполнителя в периферийные участки матрицы.

Все последующие объемные деформации твердеющей цементной композиции проявляются на берегах трещин, что ведет к увеличению ширины раскрытия и подрастания, что видно после 24-ех часов твердения, рис. 1.



Время твердения цементной матрицы, час

Рис. 1. Зарождение и развитие трещин в модели структурной ячейки бетона при твердении цементной матрицы ( $R_K > R_A$ ),  $R_K$  – когезионная прочность;

$R_A$  – адгезионная прочность. 1 – заполнители; 2 – цементная матрица;  
3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале

На рис. 2 представлена картина распределения трещин данного вида модели после 28-ми суток твердения.

Трещины сцепления возникают первыми независимо от ориентирования заполнителей в моделях структурных ячеек, и вида матричного материала, рис. 3.

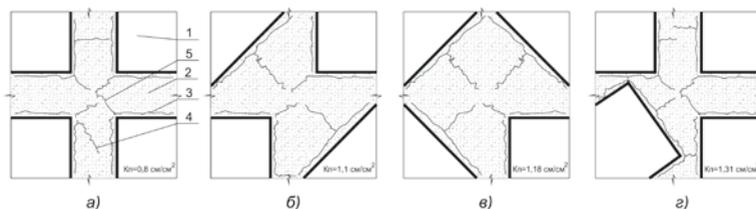


Рис. 2. Характер трещинообразования модели структурной ячейки бетона с цементной матрицей ( $R_K > R_A$ );  $R_K$  – когезионная прочность;  $R_A$  – адгезионная прочность; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале; 5 – внутренняя поверхность раздела

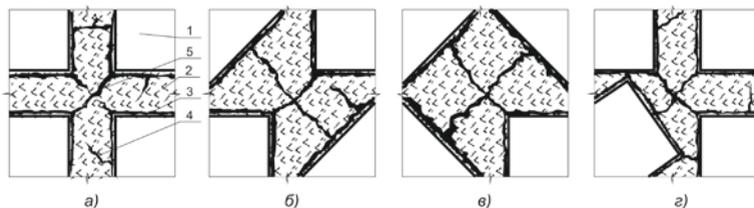
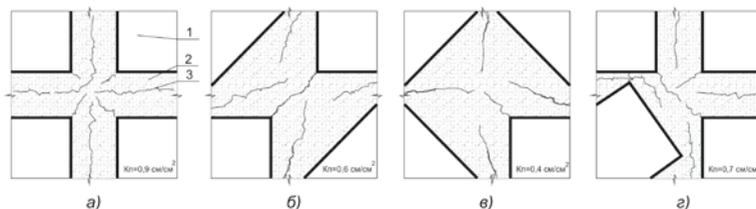


Рис. 3. Распределение трещин в модели структурной ячейки с глиняной матрицей ( $R_K > R_A$ );  $R_K$  – когезионная прочность;  $R_A$  – адгезионная прочность а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале; 5 – внутренняя поверхность раздела

Ширина раскрытия трещин сцепления и трещин в матричном материале при высыхании глины составляла, в нашем случае, от 0,4 до 1,2 мм. В цементном камне ширина раскрытия была от 0,001 до 0,01 мм. При практически одинаковом характере трещинообразования соответствующих моделей, использование глиняных композиций позволяет более четко проследить и зафиксировать распределение трещин в матрице в зависимости от ориентирования заполнителей.

Проведенный анализ показал, что при одинаковом взаимодействии твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей, одинаковом расстоянии между заполнителями, распределение собственных деформаций и связанное с ним распределение трещин зависит от ориентирования заполнителей друг относительно друга.

Аналогичный анализ проведен для случая, при котором адгезионная прочность твердеющего матричного материала выше его



когезионной прочности, рис. 4. Обеспечение адгезии матричного материала осуществляли путем повторного уплотнения цементного теста через 15 минут после его затворения.

Рис. 4. Распределение трещин в модели макроструктуры бетона ( $R_K < R_A$ )  
 а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители;  
 2 – цементная матрица; 3 – трещины в матричном материале

Характерно, что в моделях с различным ориентированием заполнителей при обеспечении адгезии матричного материала к поверхности заполнителей практически отсутствуют трещины сцепления. Это согласуется с распределением собственных деформаций твердеющего материала для случая  $R_K < R_A$ .

Во всех моделях присутствуют трещины в матричном материале, которые расположены параллельно боковым поверхностям заполнителей на равноудаленном от них расстоянии. Кроме того, присутствуют трещины, направленные от углов заполнителей в периферийные зоны матрицы. Причина появления таких трещин может быть связана с тем, что при обжатию заполнителей в углах возникают разнонаправленные деформации, инициирующие первичное нарушение сплошности материала и появление берегов трещин, которые воспринимают последующие деформации уменьшения объема твердеющего материала. Это вызывает увеличение ширины раскрытия таких трещин и их роста.

Более сложная картина распределения трещин в моделях с различным ориентированием заполнителей при избирательной адгезии твердеющего матричного материала к поверхности заполнителей ( $R_K = R_A$ ), рис. 5.

Для обеспечения избирательной адгезии на поверхность заполнителя наклеивалась полиэтиленовая пленка требуемого размера. Цементное тесто повторно уплотнялось через 15 минут после затворения.

Появление трещин на границе участков с антиадгезионным покрытием подтвердило результаты анализа графо-аналитическим методом, который показал развитие в этих местах разнонаправленных деформаций, рис. 6.

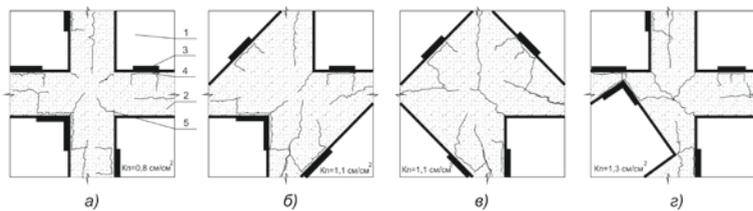


Рис. 5. Характер распределения трещин в модели структурной ячейки бетона при  $R_K = R_A$ ; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – цементная матрица; 3 – участки поверхности заполнителей с антиадгезионным покрытием; 4 – трещины сцепления; 5 – трещины в матрице

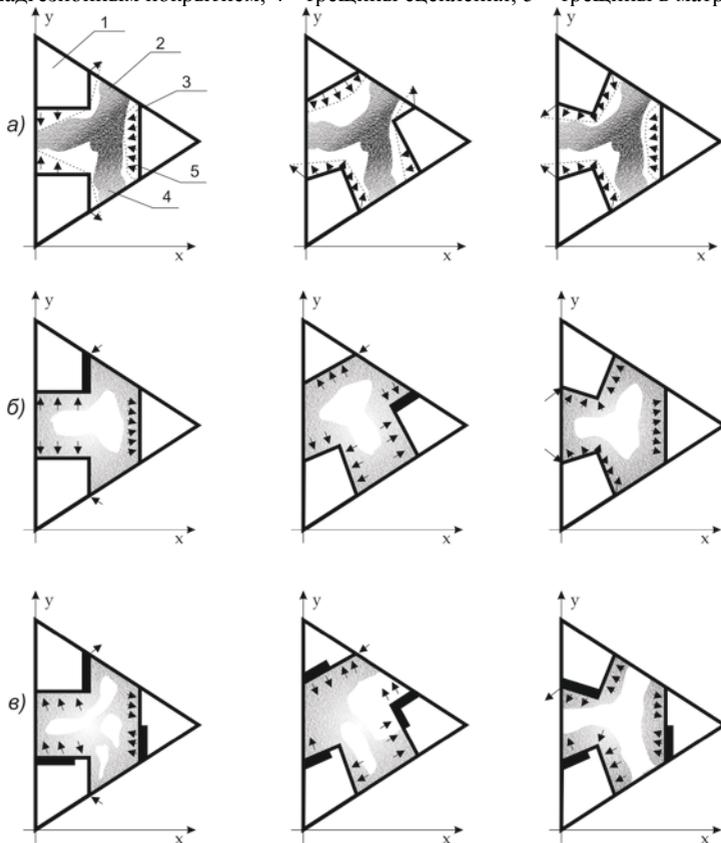


Рис. 6. Распределение деформаций твердеющей матрицы при гексагональной укладке заполнителей; а -  $R_K > R_A$ ; б -  $R_K < R_A$ ; в -  $R_K = R_A$ ; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – эпюры деформаций; 4 – зоны деформаций сжатия; 5 – зоны деформаций растяжения

Анализ показал, что в моделях с различным ориентированием заполнителей друг относительно друга при избирательной адгезии

матричного материала, как при других случаях его взаимодействия с поверхностью заполнителей, различный характер распределения трещин разного вида, что ведет к изменению коэффициента поврежденности  $K_{\Pi}$ .

Влияние ориентирования заполнителей и типов связи твердеющей матрицы с поверхностью заполнителей не зависит от способов укладки заполнителей. Это подтвердил анализ распределения трещин и их вид при гексагональной укладке заполнителей в моделях структурных ячеек бетона, рис. 7.

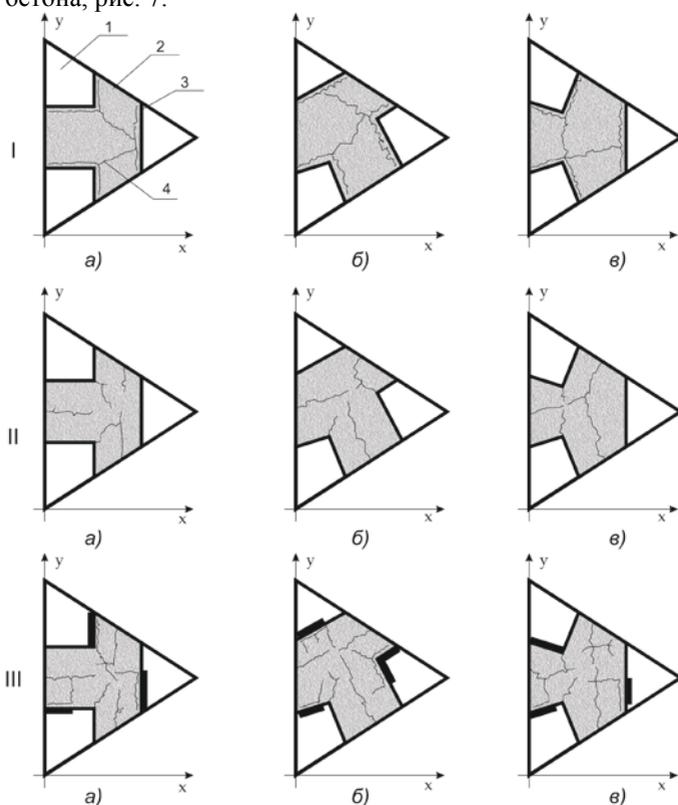


Рис. 7. Распределение трещин в моделях структурных ячеек бетона при гексагональной упаковке заполнителей: I -  $R_K < R_A$ ; II -  $R_K > R_A$ ; III -  $R_K = R_A$   
 а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – цементная матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале

Проведенный анализ распределения трещин в моделях структурных ячеек бетона с различным ориентированием друг относительно друга и разными уровнями взаимодействия твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей показал

индивидуальный для каждой ячейки характер трещинообразования. Если бетон представить как содружество подобных ячеек, то он становится в нашем представлении еще более структурно разнообразным. На это накладывается структурное неповторимое для каждой ячейки распределение трещин при взаимодействии цементных композиций с мелким заполнителем. Такое представление согласуется с фрактальным подходом при анализе структуры материалов. Характерно, что все трещины образуются в период становления материала матрицы и, следовательно, всего бетона. Таким образом, бетон вступает в работу с характерным для каждой структурной ячейки распределением трещин.

Объективное существование трещин, спонтанно возникающих в период становления бетона, ставит задачу ввести их, как самостоятельных элементов, в модель макроструктуры, представленной неоднородностью типов матрица-заполнитель. Проведенный анализ позволяет выделить следующие виды трещин в макроструктуре: - трещины на границе раздела матричного материала с поверхностью заполнителей (трещины сцепления); - трещины в матричном материале; - трещины в матричном материале, начинающие свое развитие от поверхности заполнителей. Кроме того, в структуре можно выделить трещины, которые завершены в своем развитии и которые отнесены к внутренним поверхностям раздела. Отличие внутренних поверхностей раздела от трещин заключается в отсутствии главных признаков трещин – устья и фронта.

Таким образом, в модель макроструктуры следует включить трещины и внутренние поверхности раздела. На рис. 8,а предоставлен фрагмент макроструктуры тяжелого бетона с реальным распределением крупных и мелких заполнителей и трещин. Пунктирными линиями выделены структурные ячейки на уровне мелких и крупных заполнителей, рис. 8,б. В каждой структурной ячейке присутствуют трещины сцепления, трещины в матричном материале, трещины, которые развиваются от поверхности мелких и крупных заполнителей и внутренние поверхности раздела.

Специфическая роль трещин и внутренних поверхностей раздела, как уже отмечалось, позволяет выделить их в качестве самостоятельных активных элементов структуры. Они присутствуют в каждой структурной ячейке и предопределяют взаимодействие структурных ячеек между собой с формированием интегральной структуры и, следовательно, свойств бетона, организованного по типу «структура в структуре». Это послужило основанием предложить модель макроструктуры бетона как набора различных типов трещин и внутренних поверхностей раздела, рис. 8.

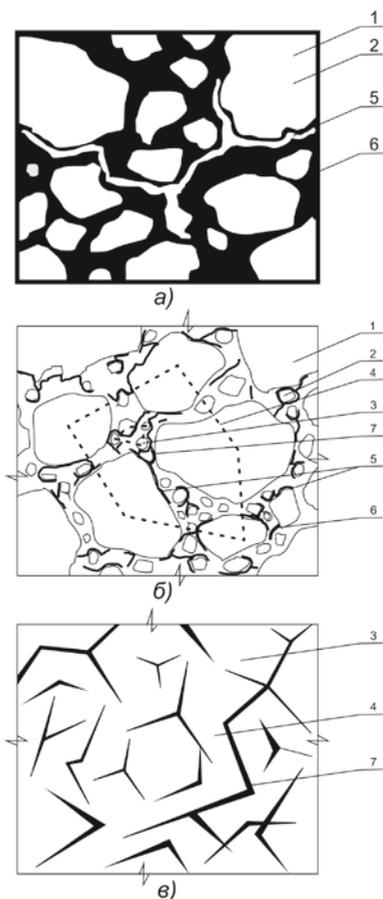


Рис. 8. Модели макроструктуры бетона: а – прозрачный шлиф тяжелого бетона; б – модель макроструктуры бетона с крупными и мелкими заполнителями; в – модель макроструктуры бетона с определенным набором трещин и внутренних поверхностей бетона; 1 – крупные заполнители; 2 – мелкие заполнители; 3 – структурные ячейки на уровне мелких заполнителей; 4 – структурные ячейки на уровне крупных заполнителей; 5 – трещины сцепления; 6 – трещины в матричном материале; 7 – внутренние поверхности раздела

На модели представлены структурные ячейки на уровне мелких и крупных заполнителей с индивидуальным набором трещин сцепления, трещин в матричном материале различного ориентирования и внутренних поверхностей раздела. Предложенная модель позволяет, по нашему мнению, проанализировать роль трещин и внутренних поверхностей раздела в последующем развитии макроструктуры при действии на бетон эксплуатационных нагрузок различного вида.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Формирование структуры бетона как матричного композиционного материала определяется уровнем связи твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей и геометрическими характеристиками каждой структурной ячейки. При этом в матричном материале возникают градиенты собственных деформаций по величине и направлению действия. Возникающие градиенты могут быть причиной локального изменения плотности матрицы, вызывать явления ее формоизменения на границе раздела с заполнителями, и вести к нарушению целостности матрицы.

2. Градиенты собственных деформаций, которые возникают в результате взаимодействия твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей, ведут к образованию трещин в матрице. В зависимости от соотношения величин когезионной и адгезионной прочностей матрицы в макроструктуре бетона могут возникать трещины на границе с поверхностью заполнителей (трещины сцепления) и самом материале матрицы. Вид и ориентирование трещин в матрице определяется, кроме уровня взаимодействия с поверхностью заполнителей, геометрическими характеристиками структурной ячейки бетона. При этом коэффициент поврежденности матрицы может изменяться более чем в три раза.

3. Образование и развитие трещин при протекании явлений и процессов взаимодействия твердеющего матричного материала с заполнителями следует считать реальным событием организации структуры бетона как матричного композиционного материала. В силу того, что бетон представляет собой определенный набор различных по геометрическим характеристикам структурных ячеек, то наличие индивидуального распределения трещин в каждой структурной ячейке, индивидуальное распределение в ней участков с различной плотностью, превращает бетон в материал с достаточно широким набором структурно несхожих составляющих.

4. На основании проведенного анализа предложена модель макроструктуры бетона в виде набора трещин различного вида и внутренних поверхностей раздела в структурных ячейках на уровне мелких и крупных заполнителей. Объективное существование трещин как составляющих макроструктуры бетона ставит задачи дальнейшего анализа их участия в последующих этапах работы бетона в эксплуатируемых конструкциях.

### **Summary**

**On the basis of experimental studies, a model of macrostructure as a superposition of concrete cracks and internal surfaces of the structural cells at the level of small and large aggregates. The objective existence of cracks as constituents of concrete macro-analysis is very important**

**to their participation in the subsequent stages of the concrete in the operating structures.**

### *Литература*

1. Т.В. Острая, В.Н. Выровой, С.Р. Макарова, В.Г. Суханов. Технологические деформации в композиционных материалах и изделиях. – Вестник ОГАСА №3 – Одесса. 2008 – 271-281 с.

2. Т.В. Острая, А.Н. Гергега, В.Н. Выровой, В.Г. Суханов. Анализ механизмов формирования локальных остаточных деформаций в бетоне. – Вестник ОГАСА №29, часть 2 – Одесса. 2008 – 390- 397 с.

3. В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, Т.В. Острая. Роль остаточных деформаций в организации структуры строительных материалов и конструкций. – Сб. научных трудов ОГАСА «Современные строительные конструкции из металла и древесины». Часть 1, - Одесса. 2008 – 218-224 с.

4. В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. Композиционные строительные материалы и конструкции: структура, самоорганизация, свойства. – Одесса. 2010 – 169 с.

5. В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. – К.: Будивэльнык. 1991 – 144 с.

6. В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса: Город мастеров. 1998 – 168 с.