

**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 $V/C = 0,28$ и глиняная суспензия с $V/G = 0,6$. 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.

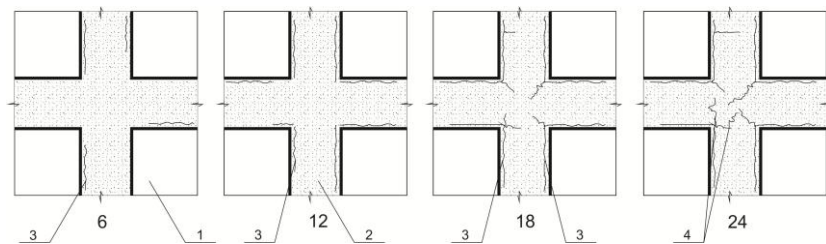
Использование цементного теста в модели структурной ячейки принято в предположении, что характер развития деформаций в цементной матрице практически одинаковый для мелких и крупных заполнителей. Поэтому расстояние между заполнителями (h) принято в относительных величинах их приведенного радиуса (R). 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.

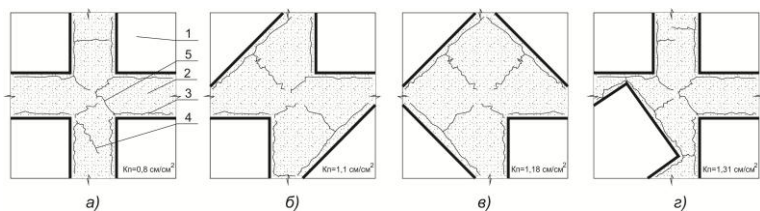


Рис. 2. Характер трещинообразования модели структурной ячейки бетона с цементной матрицей ($R_K > R_A$); R_K – когезионная прочность; R_A – адгезионная прочность; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале;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

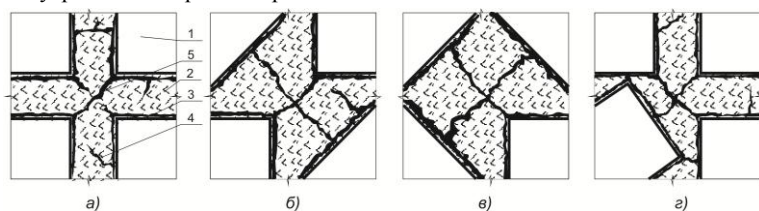
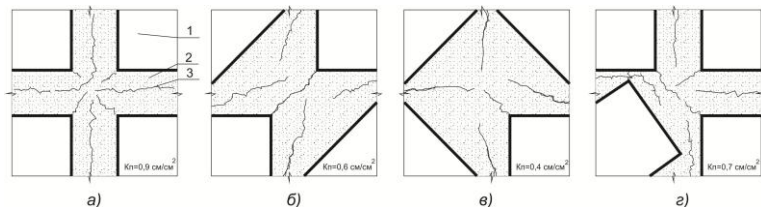


Рис. 3. Распределение трещин в модели структурной ячейки с глиняной матрицей ($R_K > R_A$); R_K – когезионная прочность; R_A – адгезионная прочность; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале; 5 – внутренняя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



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

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 обжатии 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 затвердения.

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

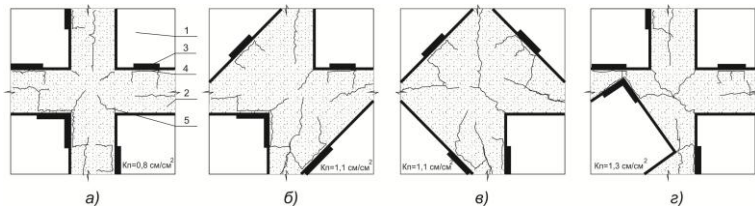


Рис. 5. Характер распределения трещин в модели структурной ячейки бетона при $R_K = R_A$; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – цементная матрица; 3 – участки поверхности заполнителей с антиадгезионным покрытием; 4 - трещины сцепления; 5 – трещины в матрице

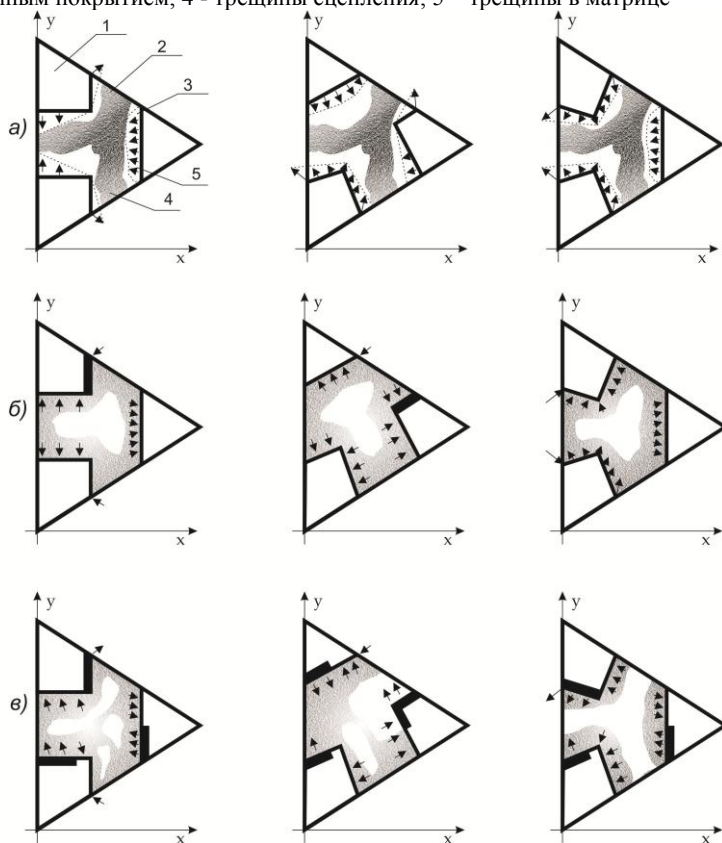


Рис. 6. Распределение деформаций твердеющей матрицы при гексагональной укладке заполнителей; а - $R_K > R_A$; б - $R_K < R_A$; в - $R_K = R_A$; а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – эпюры деформаций; 4 – зоны деформаций сжатия; 5 – зоны деформаций растяжения

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_{II} .

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.

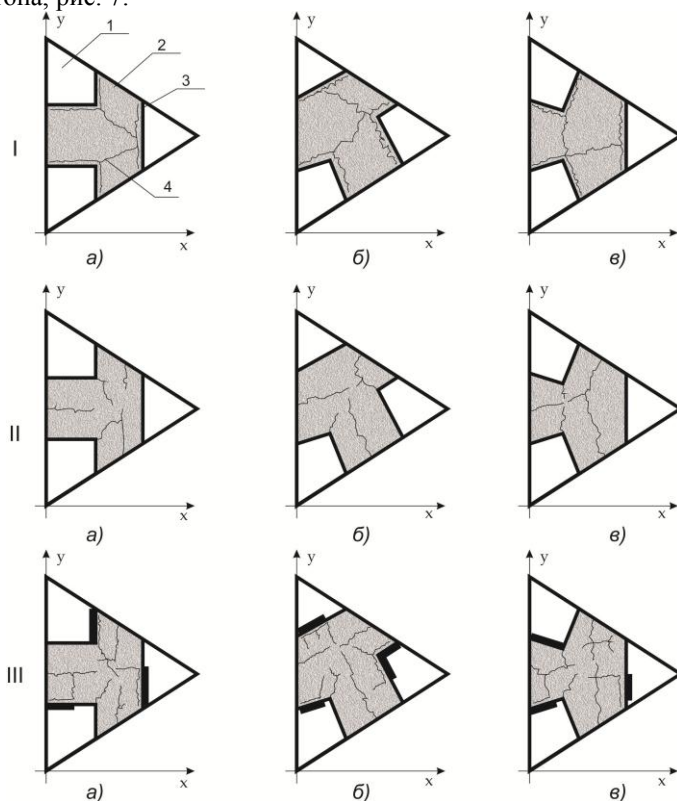


Рис. 7. Распределение трещин в моделях структурных ячеек бетона при гексагональной упаковке заполнителей: I - $R_K < R_A$; II - $R_K > R_A$; III - $R_K = R_A$
 а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – цементная матрица; 3 – трещины сцепления; 4 – трещины в матричном материале

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 сообщество 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 определяют взаимодействие структурных ячеек между собой с формированием интегральной структуры и, сле-

довательно, свойств бетона, организованного по типу «структура в структуре». Это послужило основанием предложить модель макро-структуры бетона как набора различных типов трещин и внутренних поверхностей раздела, рис. 8.

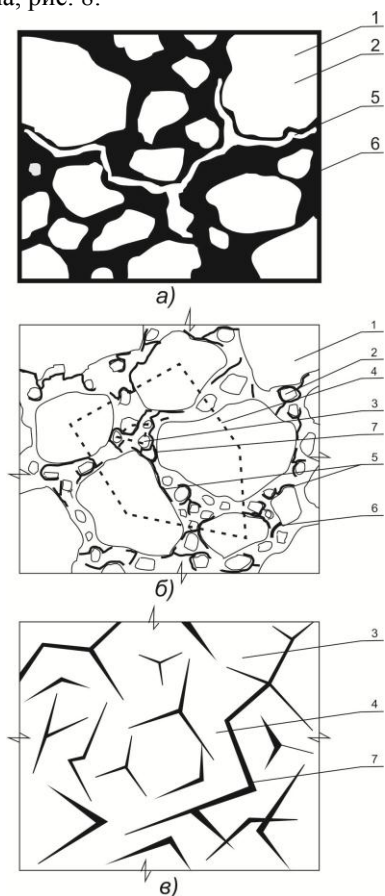


Рис. 8. Модели макроструктуры бетона: а – прозрачный шлиф тяжелого бетона; б – модель макроструктуры бетона с крупными и мелкими заполнителями; в – модель макроструктуры бетона с определенным набором трещин и внутренних поверхностей бетона; 1 – крупные заполнители; 2 – мелкие заполнители; 3 – структурные 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 анали-

за 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. Герега, 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.: Будивзельник. 1991 – 144 с.

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