

## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БЕТОНЕ

Острая Т.В., Суханов В.Г., Гергега А.Н., Выровой В.Н. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Проанализировано изменение характера распределения локальных технологических деформаций в зависимости от геометрических особенностей ячеек бетона. Выявлено, что, изменяя геометрические характеристики исходной структуры бетона, можно управлять распределением локальных деформаций, что позволяет изменять характер структурообразования и его скорость.

**Введение.** Качество строительных материалов, изделий и конструкций в значительной степени определяется технологической наследственностью. Под технологической наследственностью понимают всю совокупность физико-механических свойств готового материала и изделий из него, включая остаточные деформации и напряжения [1]. В нашем случае под остаточными (технологическими, начальными, наследственными) деформациями и напряжениями понимаются деформации и напряжения, которые возникают в технологический период получения материала и его переработки в изделие и которые присутствуют до приложения к изделию эксплуатационных нагрузок. В работах [2,3] остаточные деформации отнесены к элементам структуры бетона и бетонных и железобетонных конструкций. При этом выделяются локальные деформации, которые возникают на уровне структурных неоднородностей бетона как матричного грубогетерогенного материала, и интегральные деформации, возникающие на уровне изделия и конструкции.

Специалисты [4,5] отмечают высокую ответственность остаточных напряжений за обеспечение эксплуатационной долговечности материалов и изделий. Существующие методы изучения, анализа и количественной оценки остаточных напряжений не всегда позволяют выявить механизмы их возникновения и, особенно, распределения как в структуре материала, так и на уровне изделия [4]. Особенно важно оценить характер распределения локальных технологических деформаций в макроструктуре бетона. Макроструктура бетона представлена структурной неоднородностью матрица-заполнитель. Модели структурных ячеек бетонов, предложенные в работах [6,7,8,9], предполагают, что



процессы и явления, которые происходят в единичной структурной ячейке, можно, без значительной потери их информативности, перенести на всю совокупность структурных ячеек бетона как матричного осесимметричного композиционного материала. В работе [2] показано, что изменение формы и ориентирования заполнителей (применение заполнителей в форме квадрата вместо заполнителей в форме диска) изменяет распределение локальных остаточных деформаций в моделях структурных ячеек бетона. Если предположить, что в каждой структурной ячейке ориентирование заполнителей будет индивидуальным, то бетон должен представлять собой набор структурных ячеек с индивидуальными распределением локальных технологических деформаций. В связи с этим была определена задача анализа распределения остаточных деформаций в моделях структурных ячеек бетонов в зависимости от их геометрических характеристик.

**Методика анализа механизмов формирования локальных остаточных деформаций.** При анализе формирования характера распределения локальных деформаций были приняты модели ячеек бетона размером 7,1x7,1 см с заполнителями квадратной формы. Модели структурных ячеек отличались ориентированием заполнителей относительно друг друга, способом упаковки, а также расстоянием, которое выразилось в долях приведенного радиуса ( $h=(0,2...0,4)R$ ) между заполнителями, рис.1. Было проанализировано 20 ситуаций возможного изменения геометрических характеристик моделей структурных ячеек бетона.

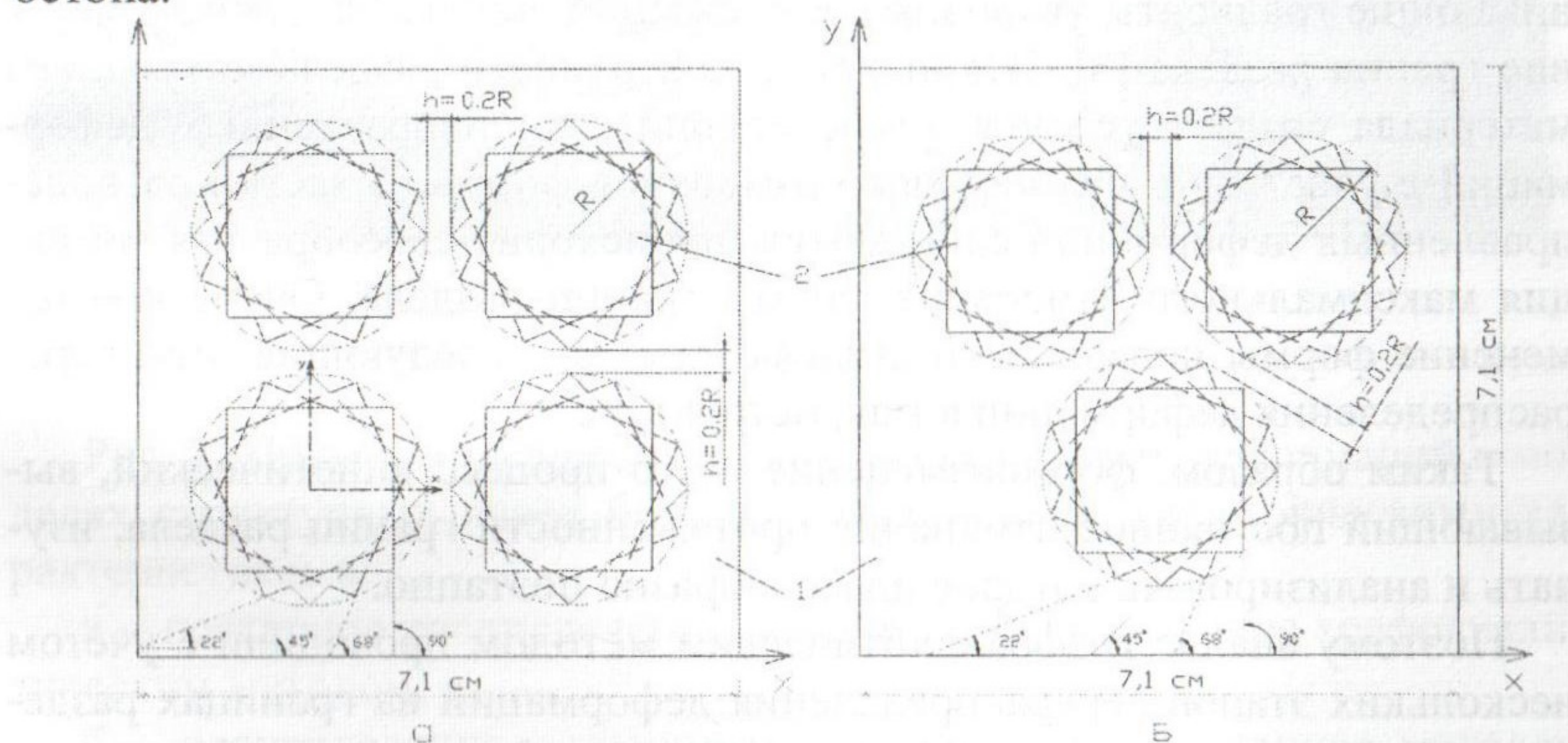


Рис.1. Модели структурных ячеек бетона с различной ориентацией заполнителей при кубической (а) и гексагональной (б) их упаковке с расстоянием между заполнителями  $0,2R$ :

1 – матричный материал; 2 – заполнители.



Анализ проводили графоаналитическим методом и методом фотоупругости.

Для исследования формирования поля технологических деформаций методом фотоупругости были изготовлены плоские модели ячеек бетона с имитаторами заполнителей, в качестве матричного материала применялся фоточувствительный материал эпоксидная смола ЭД-20.

Оптическая анизотропия, связанная с изменением плотности в твердеющих оптически чувствительных материалах, появляется и "замораживается" в материале уже в процессе его получения. Поэтому развитие деформаций можно фиксировать с момента формования образцов и до полного их затвердевания.

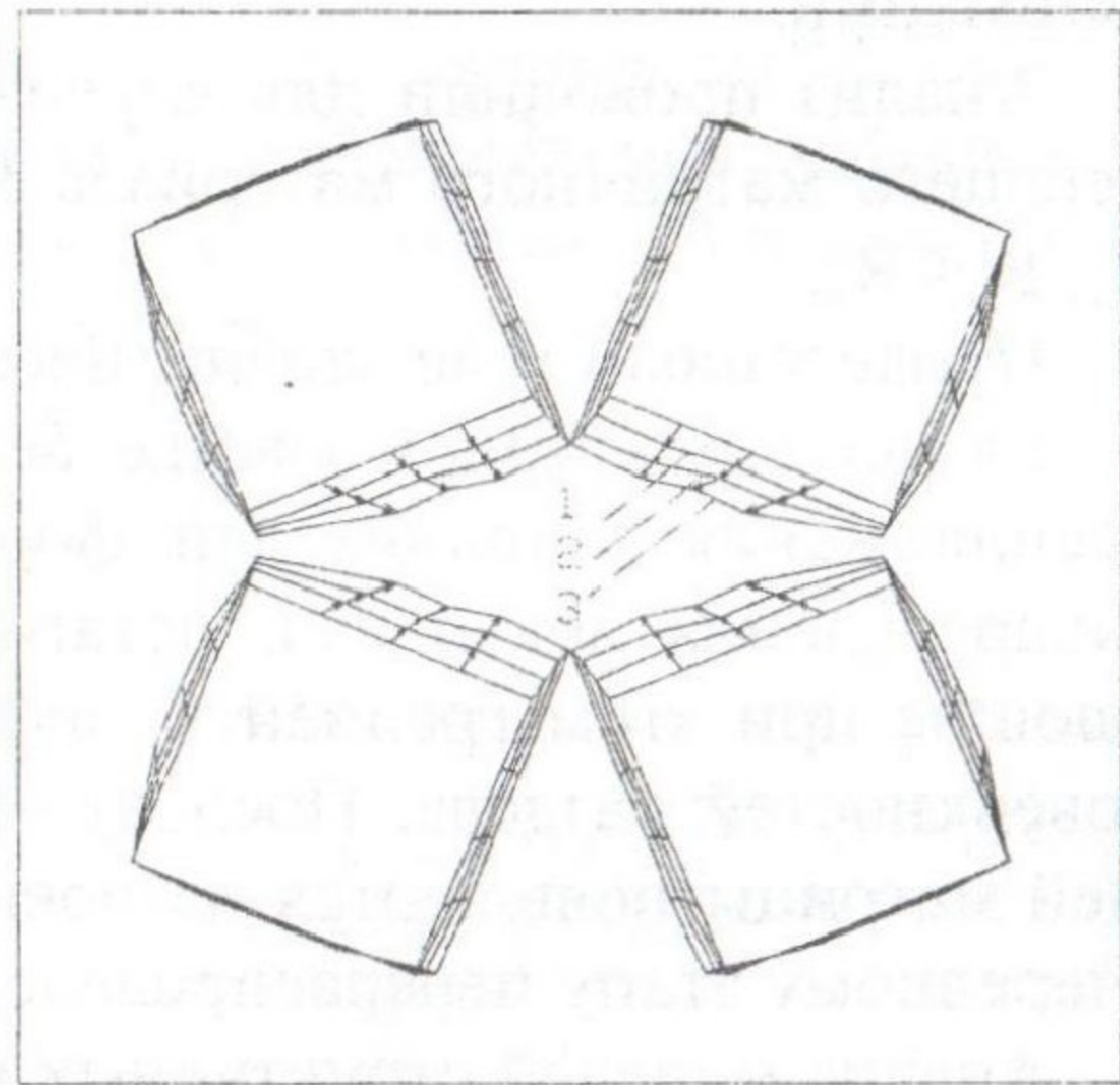
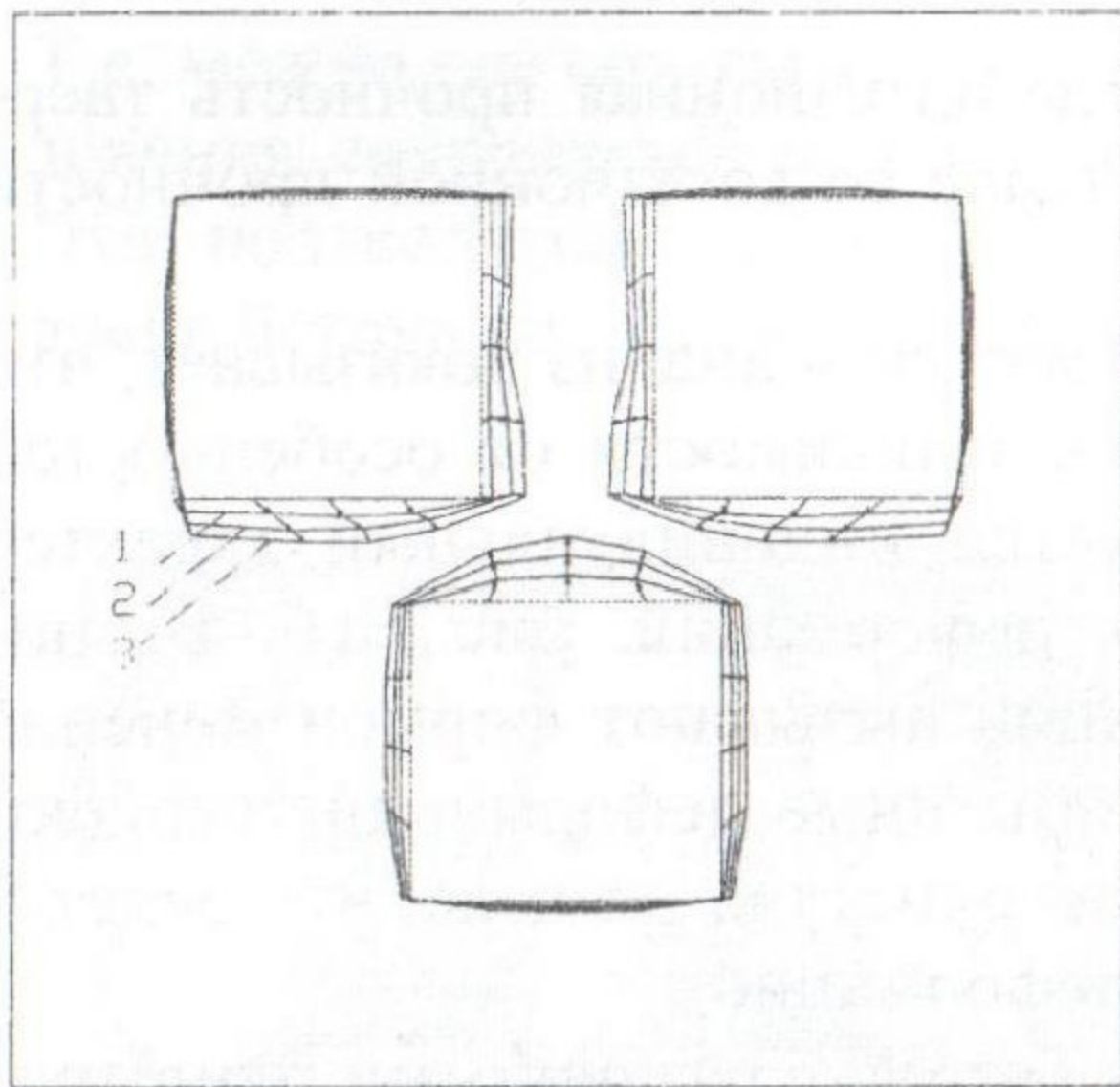
Анализ кинетики твердения матричного материала показал, что при различных геометрических характеристиках моделей возникающие поля деформаций индивидуальны в каждой ячейке. При этом отмечена различная скорость отверждения эпоксидной матрицы в различных участках моделей. Это дало основание говорить о влиянии геометрических особенностей ячеек на формирование начального деформативного состояния, влияющего на последующие процессы твердения.

Формирование деформативного состояния бетонов начинается одновременно с образованием границы раздела растворной части с заполнителями и продолжается в течение всего периода структурообразования и твердения. При уменьшении объема матричного материала в результате физико-химических и физико-механических процессов возникающие градиенты усадочных деформаций вызывают формоизменение границ раздела [8]. Искривление поверхности раздела матричного материала создает условия концентрации разнонаправленных деформаций в участках максимального изменения формы. Участки разнонаправленных деформаций сдвигаются, происходит своеобразная миграция максимального изменения формы границ раздела. Очередное изменение формы поверхности раздела вызывает следующий этап перераспределения деформаций в макроструктуре.

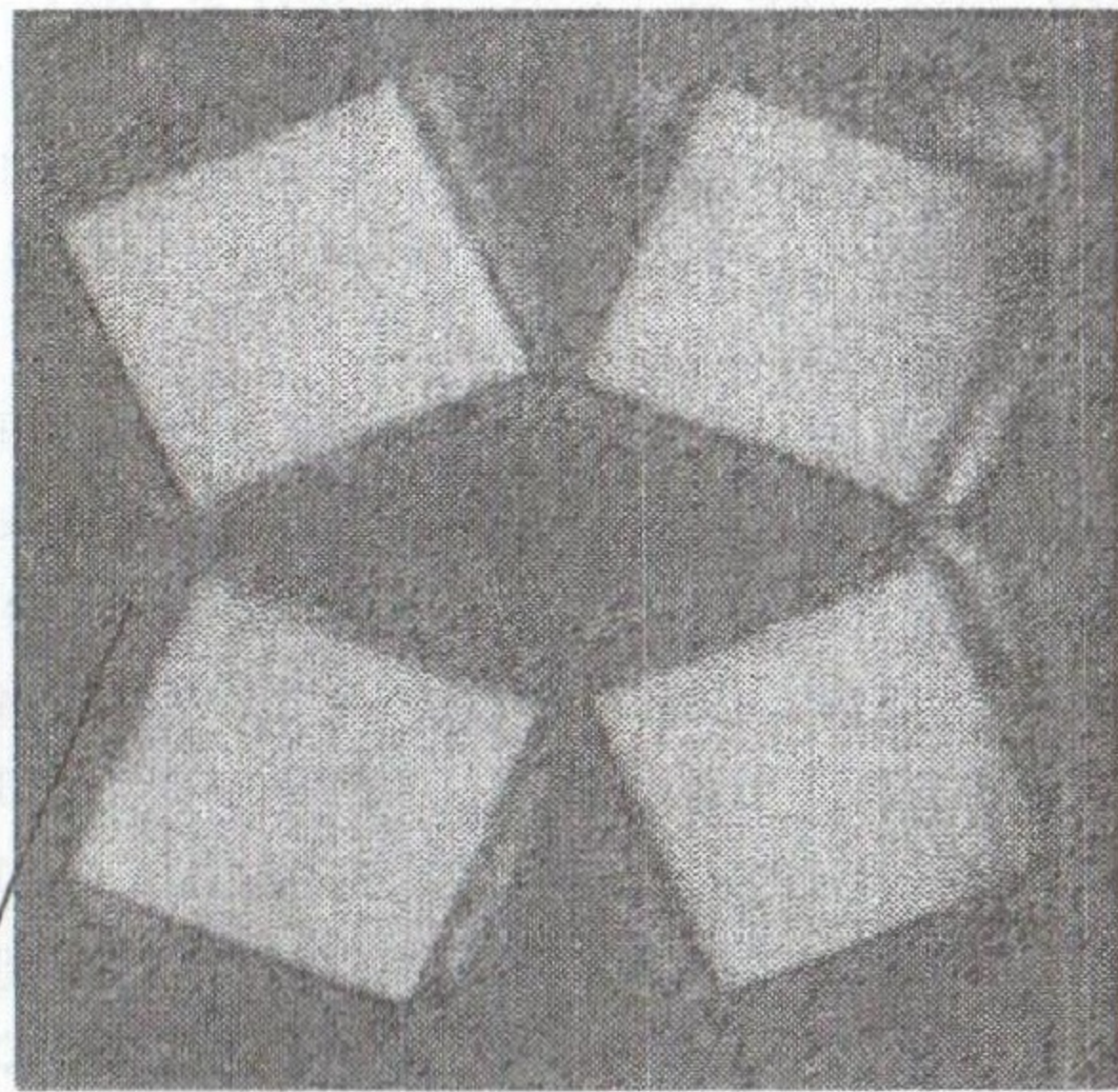
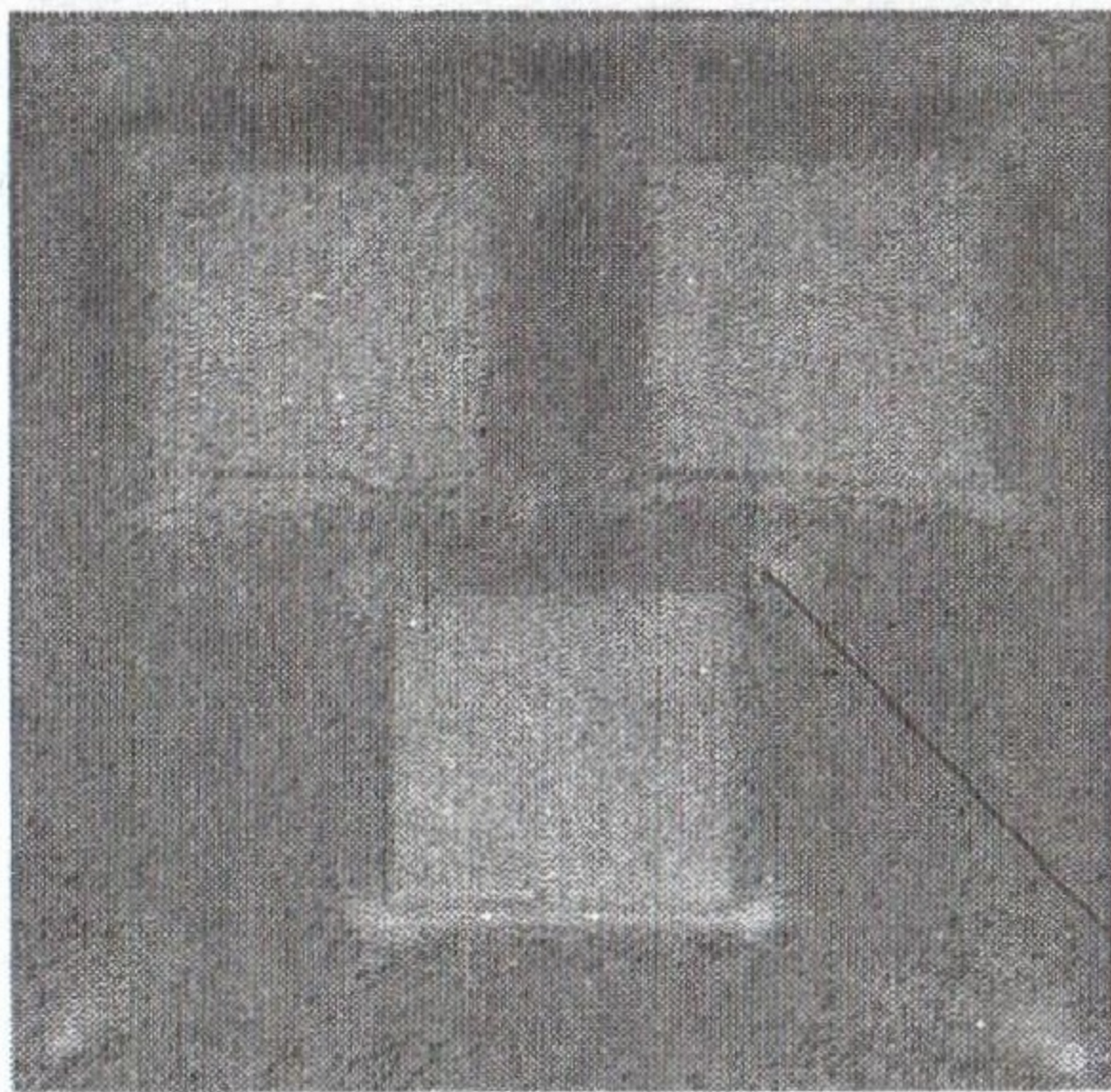
Таким образом, формоизменение – это процесс кинетический, вызывающий постоянное изменение протяженности границ раздела, изучать и анализировать которое целесообразно поэтапно.

Поэтому анализ графоаналитическим методом проводили с учетом нескольких этапов перераспределения деформаций на границах раздела твердеющей матрицы с заполнителями, рис. 2.а.





а



б

Рис. 2. Примеры распределения технологических деформаций в моделях структурных ячеек бетона с различными геометрическими характеристиками:

а – поэтапное распределение деформаций, полученное графоаналитическим методом;

б – распределение остаточных деформаций, полученное методом фотоупругости;

1,2,3 – поэтапное формоизменение границ раздела; 4 – интерференционные полосы.



### Анализ механизмов формирования локальных остаточных деформаций.

Анализ проводили для случая, когда адгезионная прочность твердеющего матричного материала  $R_a$  меньше ее когезионной прочности  $R_k$ ,  $R_a < R_k$ .

Проведенный графоаналитическим методом анализ показывает, что в каждой структурной ячейке бетона в зависимости от особенностей расположения заполнителей формируется индивидуальный характер распределения локальных остаточных деформаций, рис.2.а,б. Возникающие при этом градиенты деформаций вызывают формоизменение поверхностей раздела. Последующие объемные деформации твердеющей матрицы появляются на новых поверхностях раздела, что ведет к очередному этапу перераспределения деформаций

Анализ моделей структурных ячеек бетона с различными геометрическими характеристиками позволяет заключить, что при гексагональной укладке заполнителей в начальные периоды твердения возникающие градиенты деформаций, вызывая сдвиг матричного материала, создают предпосылки к его растяжению. Тенденция материала к сжатию проявляется в симметричных моделях с кубическим расположением заполнителей, рис.2.

Формирование полей начальных деформаций предполагает, что дальнейшие процессы полимеризации матричного материала происходят под влиянием возникающих и развивающихся деформаций различного знака. Это ведет к локальному изменению плотности матрицы, что, в свою очередь, изменяет условия и скорость протекания химических реакций полимеризации. Проведенный анализ показал идентичность графоаналитического метода и метода фотоупругости при изучении распределения технологических деформаций в зависимости от геометрических особенностей моделей структурных ячеек бетона.

Возникновение и развитие градиентов деформаций по величине и направлению должно привести к нарушению целостности матричного материала, изготовленного из глины ( $V/\Gamma=0,62$ ) и цементного теста нормальной плотности.

Исследования на физических моделях показали, что возникающие градиенты локальных деформаций ведут к образованию трещин с индивидуальным распределением для каждой модели структурной ячейки бетона. Причем, независимо от вида материала, в геометрически одинаковых моделях его поврежденность технологическими трещинами носит аналогичный характер.

Индивидуальность формирования структурных параметров в зависимости от геометрических характеристик структурных ячеек бетона



прослеживается на различных масштабных уровнях структуры (рис.3). Т.е, можно сделать вывод, что в течение всего периода структурообразования сохраняется влияние начального распределения деформаций. Это подтверждает влияние особенностей строения индивидуальных ячеек бетона на формирование его структуры.

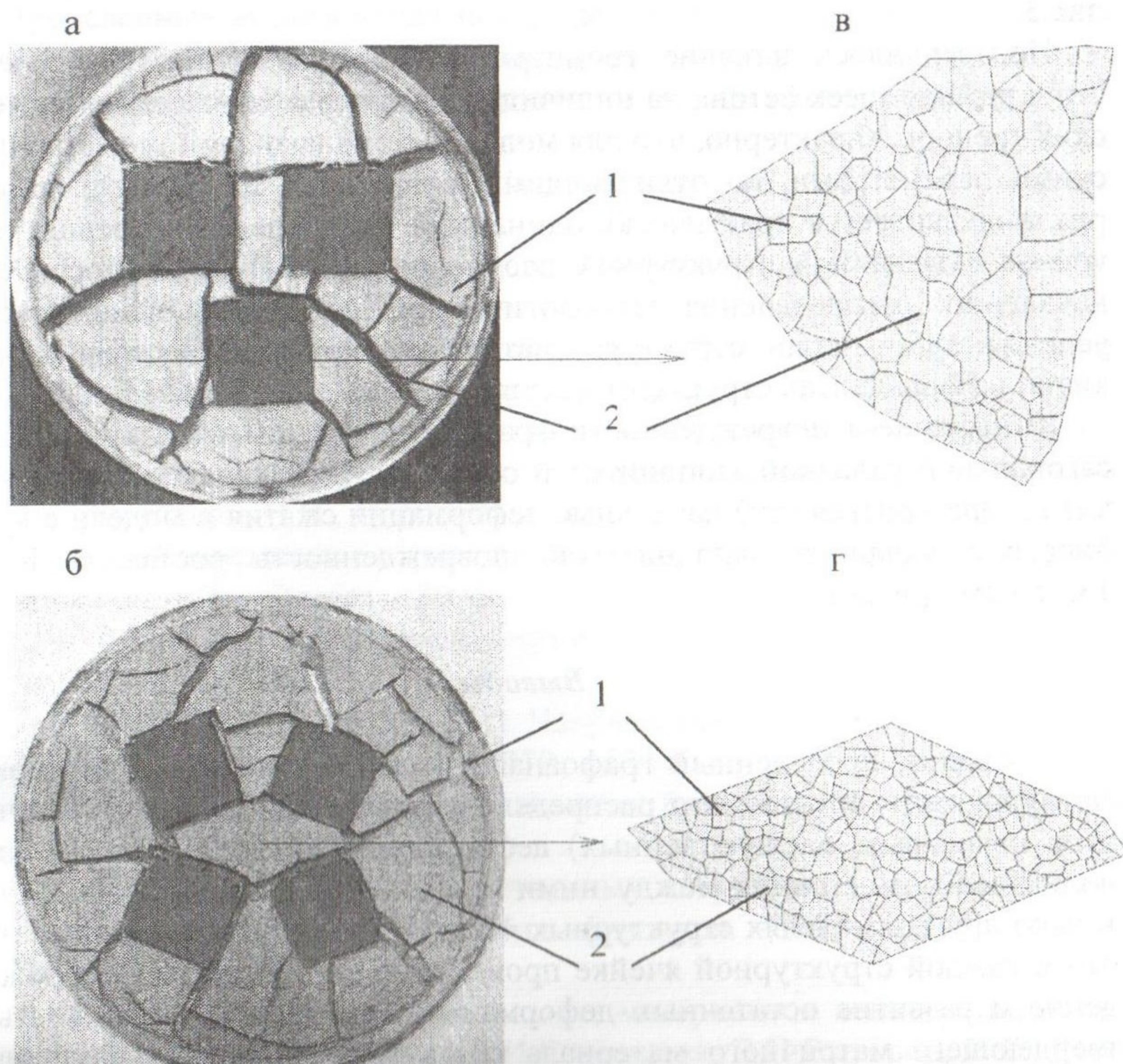


Рис. 3. Распределение технологических трещин на различных масштабных уровнях структуры в моделях структурных ячеек бетона из глины при гексагональной (а) и кубической (б) укладке заполнителей:

в,г – фрагменты структуры матричного материала;

1 – технологические трещины и внутренние поверхности раздела различного масштабного уровня;

2 – дискретные структурные блоки (кластеры) различного масштабного уровня



Подтвердился вывод о влиянии распределения технологических деформаций на физико-химические и физико-механические процессы, протекающие в самом матричном материале. Анализ показал, что в матрице зарождаются и развиваются технологические трещины и внутренние поверхности раздела как на уровне структурной неоднородности матрица-заполнитель, так и на уровне матричного материала, рис.3.

Подтвердилось влияние геометрических характеристик моделей структурных ячеек бетона на индивидуальность развития технологических трещин. Характерно, что для моделей с одинаковыми геометрическими параметрами, но отличающимися природой матричного материала наблюдается практически одинаковое распределение трещин на уровне выделенной структурной неоднородности. В зависимости от начального распределения технологических деформаций изменяются условия организации структуры материала матрицы. Это наглядно видно на фрагментах структуры матричного материала, рис.3.в,г.

Коэффициент поврежденности фрагмента матрицы в модели с гексагональной укладкой заполнителей составил  $K_n=7,1 \text{ см/см}^2$ . Для фрагмента, претерпевающего начальные деформации сжатия в модели с кубической укладкой заполнителей, поврежденность составила  $K_n=13,1 \text{ см/см}^2$ , рис.3.г.

### **Выводы**

1. Анализ, проведенный графоаналитическим методом и методом фотоупругости показал, что распределение технологических (остаточных, начальных, наследственных) деформаций зависит от формы заполнителей, расстояния между ними и ориентирования друг относительно друга в моделях структурных ячеек бетонов. Это предполагает, что в каждой структурной ячейке происходит индивидуальное зарождение и развитие остаточных деформаций. Возникающие градиенты твердеющего матричного материала создают предпосылки развития деформаций сдвига, что может быть одной из причин зарождения технологических трещин на уровне структурной неоднородности типа матрица-заполнитель.

2. Градиенты технологических деформаций по величине и направлению вызывают развитие трещин в моделях структурных ячеек бетона, в которых в качестве матричного материала использованы глина и цементные композиции. Установлено, что при одинаковых геометрических параметрах моделей распределение технологических трещин на уровне структурной неоднородности матрица-заполнитель практиче-



ски не зависит от вида материала матрицы. Анализ поврежденности матричного материала позволил установить причинную связь и взаимообусловленность между различными уровнями структурных неоднородностей. Процессы, протекающие на уровне матричного материала, инициируют макроструктурные взаимодействия, которые, в свою очередь, определяют кинетику процессов в матричном материале. Проведенные исследования позволяют создавать требуемое распределение технологических деформаций, что позволит повышать физико-технические свойства и эксплуатационную надежность бетонов.

### *Литература*

1. Дель Г.Д. Технологическая механика. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса: Внешрекламсервис, 2004. – 270 с.
3. Остаточные деформации и их роль в формировании свойств композиционных материалов и конструкций. Выровой В.Н., Макарова С.С., Мартынов В.И., Дорофеев А.В., Острая Т.В., Резникова Л.И. / Сб. науч. тр. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Часть 2. – Одесса – 2006. – С. 6-13.
4. Советский энциклопедический словарь. М.: Советская Энциклопедия, 1980. – 1600с.
5. Ушаков Б.Н., Фролов И.П. Напряжения в композитных конструкциях. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
6. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. – М.: Госстройиздат, 1959. – 294с.
7. Подвальный А.М. О собственных напряжениях, возникающих в бетоне при замораживании. // Инж.-физ.журн. – 1973. – XXV. №2. – С. 316-324.
8. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И.Соломатов, В.Н.Выровой, В.С. Дорофеев, А.В.Сиренко. – К.: Будивэльнык, 1991. – 144 с.
9. Горчаков Г.И., Ориентлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – Стройиздат, 1976. – 144с.