

УДК 666: 539.4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ И ИЗДЕЛИЯХ

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

Проведен анализ влияния геометрии мелкоштучных изделий, геометрических особенностей ячеек бетона, а также формы образцов на характер распределения остаточных (технологических, наследственных, начальных) деформаций. Показано, что, изменяя конструктивную форму изделий, геометрические характеристики исходной структуры бетона, можно управлять распределением локальных и интегральных деформаций. Было выявлено, что в зависимости от различного распределения начальных деформаций могут изменяться условия структурообразования материала, что влияет на характер технологической поврежденности и механические свойства изделий.

Введение. Технологический период получения строительных материалов самой широкой номенклатуры (материалы на основе неорганических и органических вяжущих, керамические материалы и т.п.) и переработки их в изделия сопровождается возникновением и развитием в них начальных (первичных, технологических, остаточных) напряжений и деформаций. Эти напряжения присутствуют в изделиях и конструкциях до приложения к ним внешних нагрузок и несут ответственность за обеспечение их эксплуатационной долговечности [1,2].

В работах [3,4] 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.

В работах [3,5] предложена модель структуры бетона, в которую в качестве самостоятельных структурных элементов включены технологические трещины, внутренние поверхности раздела на различных уровнях структурных неоднородностей и локальные и интегральные технологические деформации. Присутствие выделенных структурных элементов предполагает их последующее влияние на

структурные изменения материала при действии на конструкцию эксплуатационных нагрузок. 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 [1]. Это ставит задачи изучения механизмов образования выделенных структурных элементов, как на уровне структурных неоднородностей материала, так и на уровне конструкции. В связи с этим была определена задача анализа – исследовать влияние геометрических характеристик структурных ячеек бетонов, геометрии образцов (изделий, конструкций) на формирование характера распределения локальных и интегральных технологических деформаций и проанализировать его роль в организации структуры материала в изделиях и формировании их механических свойств.

Методика проведения исследований. Анализ распределения интегральных технологических деформаций проводили в образцах размером $a \times a \times 4a$ с различными коэффициентами формы графо-аналитическим методом [6,7]. Коэффициент формы K_ϕ определяли отношением длины нижней грани образца l_0 к измененной длине нижней грани l : $K_\phi = l_0/l$.

При анализе приняты следующие значения коэффициентов формы: $K_{\phi 1} = 1,0$; $K_{\phi 2} = 0,997$; $K_{\phi 3} = 0,990$.

Контролировали прочность на растяжение при изгибе R_{bt} образцов с различными значениями K_ϕ .

Образцы готовили из цементного теста нормальной плотности. Испытания проводили после их твердения в течение 28-ми суток в нормальных условиях.

Формирование характера распределения интегральных технологических деформаций анализировали также в моделях пустотелых стеновых материалов (кирпичей). Были выбраны модели с различным количеством и расположением пустот. Анализ проводили графо-аналитическим методом и методом фотоупругости.

При анализе формирования характера распределения локальных деформаций были приняты модели ячеек бетона размером $7,1 \times 7,1$ см с заполнителями квадратной формы. Модели структурных ячеек отличались ориентированием заполнителей относительно друг друга, способом упаковки, а также расстоянием, которое выражалось в долях приведенного радиуса ($h=(0,2...0,4)R$) между заполнителями. Было проанализировано 20 ситуаций возможного изменения геометрических характеристик моделей структурных ячеек бетона. Анализ проводился графо-аналитическим 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.

Поврежденность образцов технологическими дефектами оценивали при помощи коэффициентов поврежденности двумя методами. По первому методу коэффициент поврежденности K_{n1} определяли из отношения общей длины технологических трещин и внутренних поверхностей раздела L к площади поверхности на которой они проявились S , $K_{n1} = L/S$ (см/см²) [3,8]. Поврежденность по этому методу оценивали как интегральную характеристику образцов и на отдельных участках поверхности. Обнаружение и фиксацию технологических трещин проводили по методике, описанной в [9]. По второму методу коэффициент технологической поврежденности K_{n2} определяли после испытания образцов с различными значениями K_{ϕ} из отношения кратчайшего расстояния между противоположными точками трещины разрушения L_0 и фактической длиной трещины разрушения L_T , $K_{n2} = L_0/L_T$ [6,10].

Анализ механизмов формирования интегральных остаточных деформаций. При анализе исходили из установленных фактов общего уменьшения объема твердеющих материалов на основе органических и неорганических вяжущих. Эпюры деформаций для каждого образца были построены в сечении, проходящем через его ось и перпендикулярном его боковой грани (рис.1). Введение системы координат позволило количественно оценить изменение распределения деформаций с выделением таких параметров как относительная величина деформаций ε и направление их действия через угол φ .

Распределение интегральных остаточных деформаций в образцах, как показал проведенный анализ, зависит от значений K_{ϕ} . Изменение формы образцов приводит к изменениям значений ε до 30%.

В стандартных образцах характерно симметричное распределение деформаций по отношению к центру тяжести сечения (точка О, рис.1.а). При общем симметричном распределении деформаций возникает градиент деформаций отдельных точек, принадлежащих внешним границам раздела выделенного сечения, по величине и направлению (например, деформации точек 3 и 6). Возникающие локальные градиенты деформаций создают реальные предпосылки концентрации деформаций и напряжений сдвига и развития

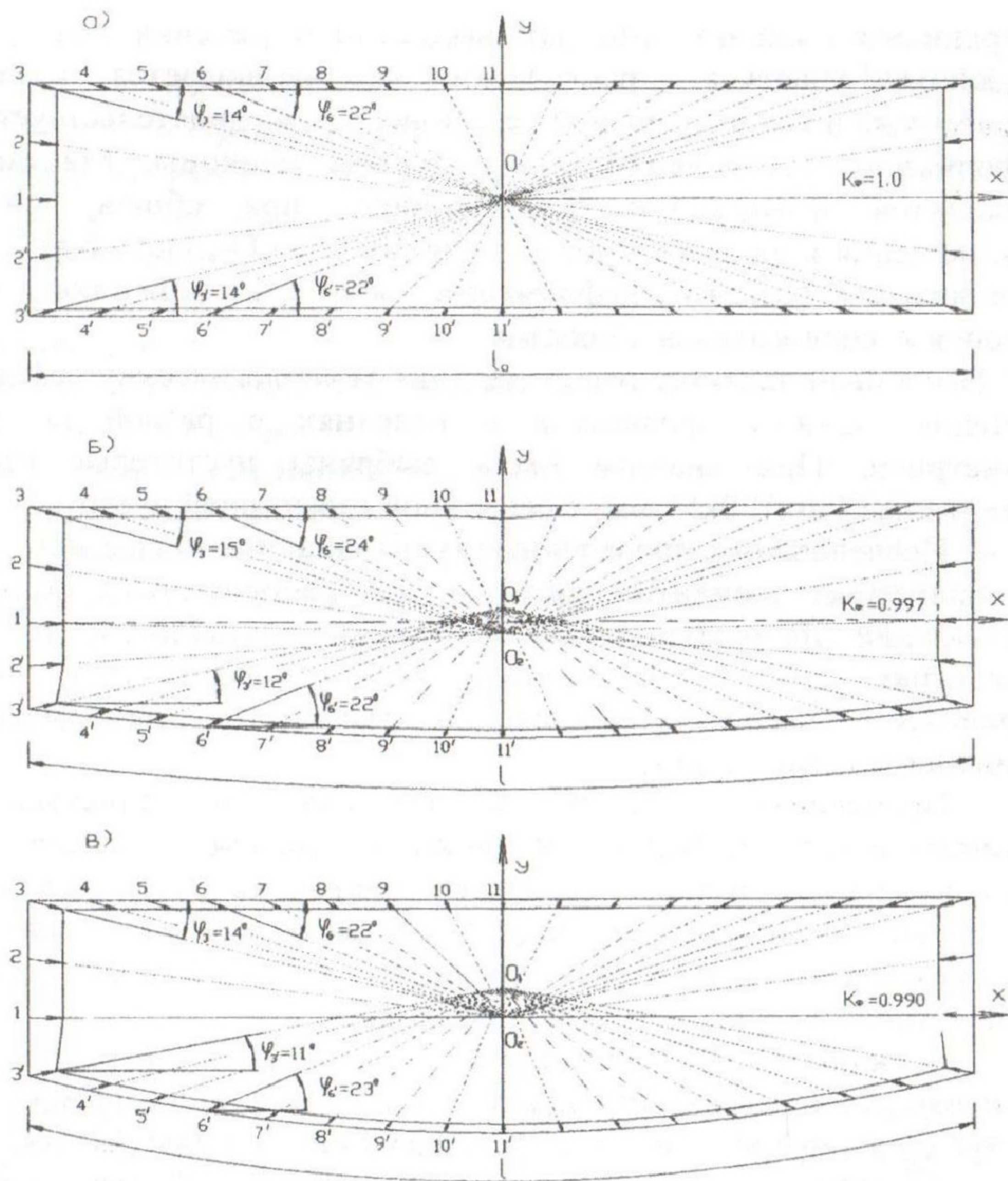


Рис.1. Распределение интегральных остаточных деформаций в образцах с различными коэффициентами формы.

интегральных деформаций растяжения. При изменении формы образцов изменяется характер распределения интегральных технологических деформаций, рис.1.б,в.

В анализируемом сечении можно выделить самостоятельные участки, к которым направлены перемещения точек, принадлежащие противоположным внешним границам раздела образцов. Изменяются относительная величина и направление деформаций при разных значениях K_ϕ (например, деформации точек 3 и 6, рис.1.а,б,в).

Нарушение симметричного распределения интегральных деформаций создает предпосылки неравномерного деформирования

«верхних» и «нижних» участков выделенного сечения. При этом для «нижних» участков практически не наблюдается градиентов деформаций по относительной величине, о чем свидетельствует эпюра деформаций для сечений с K_{ϕ} меньше единицы. Минимизация градиентов деформаций по величине, при общей тенденции перемещения к единому «центру» (точки O_1 и O_2 , рис. 1.б,в), создают предпосылки развития деформаций сжатия в «нижних» участках сечения и, следовательно, образца.

Различный характер распределения технологических деформаций особенно должен проявиться в изделиях с разной внутренней геометрией. При анализе были выбраны пустотелые стеновые материалы (250x120x65 мм) с различной геометрией пустот.

Исследования, проведенные графо-аналитическим методом для мелкоштучных элементов показали, что распределение остаточных деформаций происходит как по внешним границам, так и по отверстиям. При этом геометрические особенности изделий определяют места возникновения градиентов деформаций по значению и направлению.

Проведенный анализ показал, что в зависимости от геометрических особенностей моделей значения деформаций в пределах одного изделия могут изменяться до 80%. А изменение только внутренней геометрии (количества и распределения пустот) мелкоштучных элементов приводит к изменению значений деформаций на их внешней границе до 70%.

Возникновение градиентов приводит к неравномерному распределению деформаций как по внешней границе образца, так и по внутренней поверхности раздела. Создание оптимальной геометрии, по нашему мнению позволит свести градиенты деформаций по значению и направлению к минимуму.

Для подтверждения полученного графо-аналитическим методом характера распределения остаточных деформаций был использован метод фотоупругости на плоских моделях изделий (М 1:2), изготовленных из оптически чувствительного материала (смола ЭД-20).

Полученная в наших исследованиях интерференционная картина распределения технологических деформаций в моделях мелкоштучных элементов согласуется с распределением деформаций, полученным графо-аналитическим методом.

Проведенный анализ позволяет выдвинуть следующую гипотезу – распределение интегральных деформаций, сопровождающих физико-химические процессы и явления становления (твердения) материала,

зависит от геометрических особенностей образца, изделия или конструкции, изготовленных из этого материала. При этом в зависимости от формы образца и его внутренней геометрии, в отдельных его участках могут развиваться интегральные деформации растяжения или сжатия. Физико-химические процессы твердения вызывают развитие объемных деформаций материала, распределение которых определяется геометрией (формой) образца, что провоцирует изменение кинетики протекания химических процессов и организации структуры материала в зависимости от того, находится он в зонах растяжения или сжатия.

Для экспериментального подтверждения выдвинутых положений были проведены специальные исследования. По мнению [3,4] технологические трещины (ТТ) и внутренние поверхности раздела (ВПР) можно отнести к элементам структуры материалов. В [10] показано, что общее количество и характер ТТ и ВПР определяются исходным составом материала и технологическими условиями его получения и переработки в изделия. Изменения распределения остаточных деформаций в зависимости от K_ϕ можно отнести к изменению технологических условий переработки материала в изделие, что должно привести к изменению коэффициентов поврежденности и прочностных характеристик.

Анализ штучных элементов с различной внутренней геометрией подтверждает влияние изменения распределения начальных деформаций на формирование характера технологической поврежденности, рис. 2.

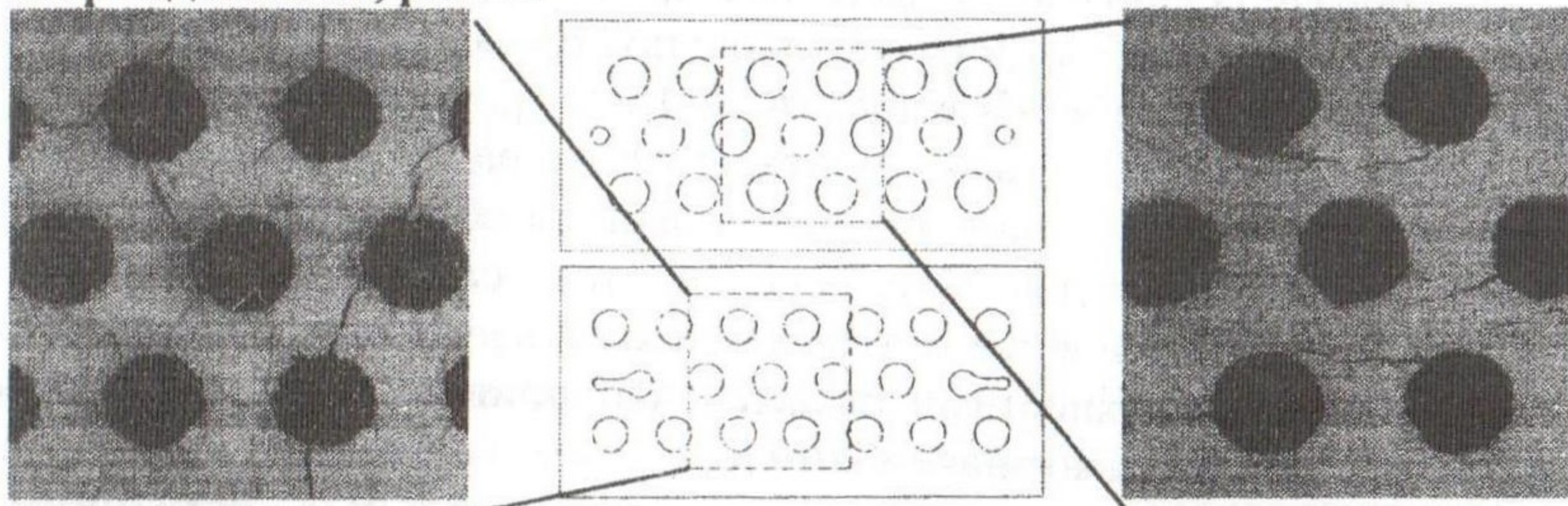


Рис. 2. Характер распределения технологических трещин в пустотелых материалах.

Анализ результатов по определению K_{n2} в образцах с различным K_ϕ не позволил выявить его значимое влияние на изменение технологической поврежденности материала. Так при $K_\phi = 1,0$ K_{n2} находится в пределах $K_{n2} = 0,85...0,98$; при $K_{\phi2} - K_{n2} = 0,77...0,95$; при $K_{\phi3} - K_{n2} = 0,82...0,98$. Данный метод оценки технологической

поврежденности, даже в случае видимых различий в рельефе берегов трещин разрушения, не дает возможность объективно количественно оценить эти различия. Более чувствительным к структурным изменениям, как показали проведенные исследования, является метод оценки технологической поврежденности при помощи коэффициента K_{nl} .

Еще большее влияние геометрических характеристик образца на распределение технологической поврежденности наблюдается на нижней поверхности, рис.3.

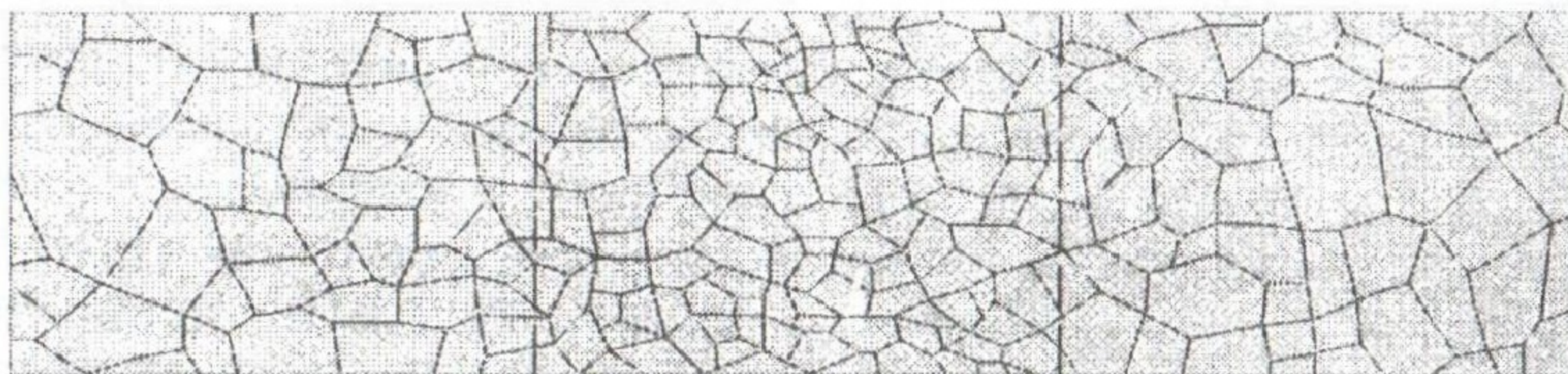


Рис. 3. Распределение технологической поврежденности на нижней поверхности образца с $K_{\phi}=0,990$.

Для стандартных образцов по всей нижней поверхности K_{nl} находится в пределах $K_{nl} = 2,0...2,4$. Изменение формы нижней поверхности образца с $K_{\phi} = 0,997$ вызывает изменение K_{nl} в различных участках до 60% (K_{nl} возле торцов образца равен $2,4 \text{ см/см}^2$, в центральной части $K_{nl} = 6,1 \text{ см/см}^2$).

Структурные изменения в объеме материала в зависимости от формы образцов привело к изменению прочностных характеристик. R_{bt} образцов с $K_{\phi} = 0,997$ в 1,9 раза больше по сравнению с прочностью на растяжение при изгибе образцов с $K_{\phi} = 1,0$ [11].

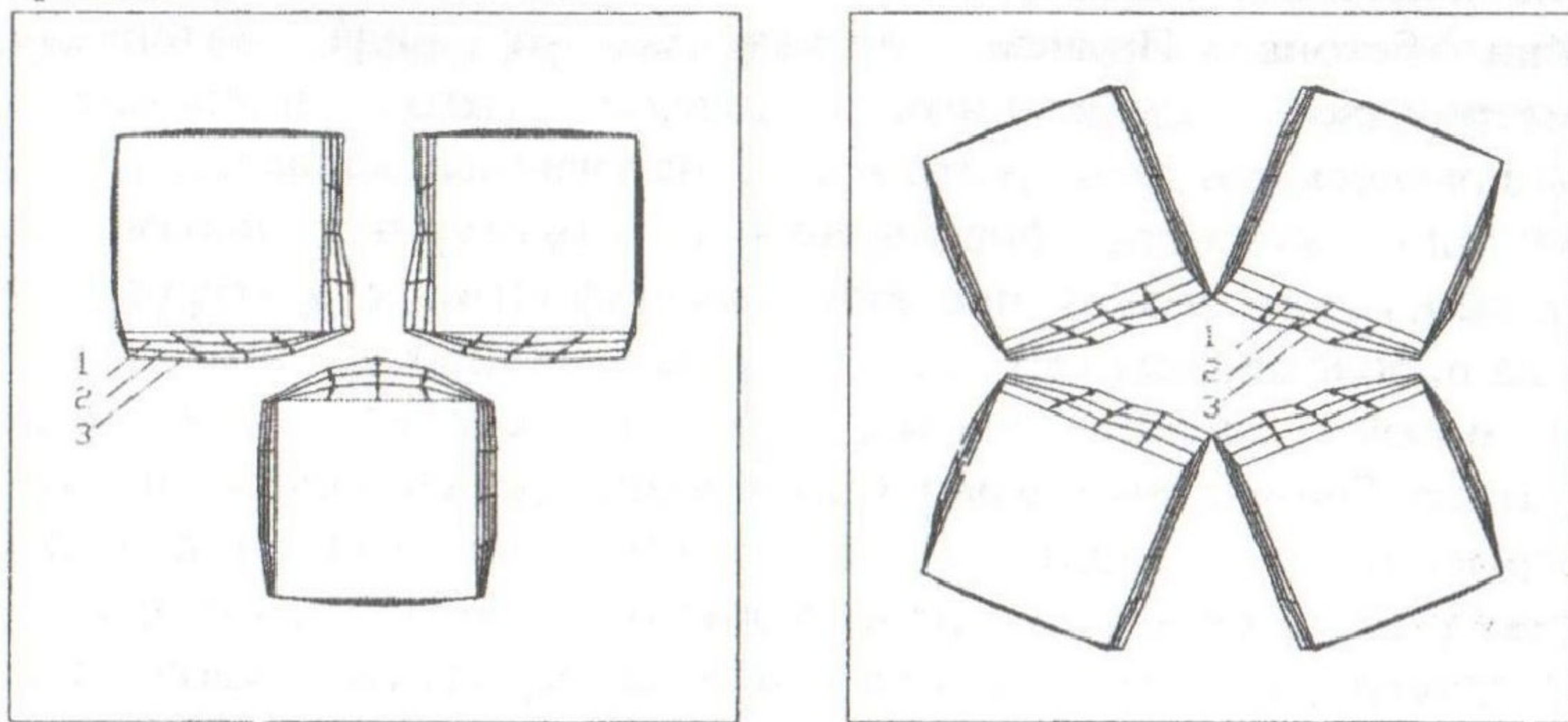
Проведенные экспериментальные работы подтвердили выдвинутое предположение о влиянии формы образцов на локальную организацию структуры материала и, тем самым, на изменение объемной поврежденности материала технологическими трещинами и внутренними поверхностями раздела, что привело к изменению R_{bt} образцов с различными значениями K_{ϕ} .

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

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.

Проведенный графо-аналитическим методом анализ показал, что в каждой структурной ячейке бетона в зависимости от особенностей расположения заполнителей формируется индивидуальный характер распределения локальных остаточных деформаций, рис.4. 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.



Р

рис. 4. Примеры распределения технологических деформаций в моделях структурных ячеек бетона с различными геометрическими характеристиками:
1,2,3 – поэтапное формоизменение границ раздела.

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.4.

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 графо-аналитического 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 густоты.

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. 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.

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.

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.

Коэффициент поврежденности фрагмента матрицы в модели с гексагональной укладкой заполнителей составил $K_n=7,1$ см/см². Для

фрагмента, претерпевающие начальные деформации сжатия в модели с кубической укладкой заполнителей, поврежденность составила $K_n = 13,1 \text{ см/см}^2$.

Выводы.

1. Анализ, проведенный графо-аналитическим методом и методом фотоупругости, показал, что характер распределения технологических (остаточных, начальных, наследственных) деформаций определяется формой изделий и особенностями их внутренней геометрии. От характера распределения начальных деформаций в образцах (изделиях, конструкциях) в значительной степени зависит организация структуры материала в них. При этом происходит взаимовлияние различных по виду и природе явлений и процессов, обуславливающих создание интегральной структуры образцов. Распределение объемных изменений, вызванных физико-химическими превращениями твердеющих вяжущих, определяется формой образца, формируя поле остаточных (наследственных, технологических, начальных) деформаций. Возникающие на уровне образца градиенты интегральных деформаций изменяют условия организации структуры в локальных объемах материала. Об этом свидетельствуют данные по изменению технологической поврежденности цементных композиций одного состава в зависимости от формы образцов. Таким образом, изменяя форму образцов (изделий, конструкций) можно изменять распределение технологических интегральных деформаций, управлять распределением технологических трещин в локальных объемах материала и, тем самым, повышать механические свойства образцов.

2. Анализ моделей структурных ячеек бетонов позволил заключить, что характер распределения локальных технологических деформаций зависит от формы заполнителей, расстояния между ними и ориентирования друг относительно друга. 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.

3. 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 практически 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. Советский энциклопедический словарь. М.: Советская Энциклопедия, 1980. – 1600с.
2. Ушаков Б.Н., Фролов И.П. Напряжения в композитных конструкциях. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
3. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса: Внешрекламсервис, 2004.–270 с.
4. 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.
5. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Моделирование конструкций как сложных систем // Вестник ОГАСА, выпуск № 28, 2007. – С. 64 – 70.
6. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И.Соломатов, В.Н.Выровой, В.С. Дорофеев, А.В.Сиренко. – К.: Будивэльнык, 1991. – 144 с.
7. Роуланс Р. Остаточные напряжения // Экспериментальная механика. – М.: Мир, 1990. – С. 283 – 335.
8. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука, 1982. -112 с.
9. Горчаков Г.И., Ориентлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – Стройиздат, 1976. – 144с.
10. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса: Город мастеров, 1998. – 168 с.
11. Острая Т.В., Выровой В.Н. Характер распределения технологических деформаций в строительных изделиях // Вестник ОГАСА, выпуск № 27, 2007. – С. 252 – 260.