

## **АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ВЛИЯНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ БЕТОНА УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ**

**Выровой В.Н.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина), **Фиц С.** (Политехнический институт, г. Люблин, Польша)

### **Введение**

Ударные воздействия являются достаточно часто встречающимися видами нагрузок, которые воспринимают железобетонные конструкции и сооружения в период эксплуатации. Под ударными нагрузками понимают совокупность явлений, возникающих при столкновении (случайном или нормируемом) движущихся твердых тел, а также при воздействии твердого тела с жидкостью (гидравлический удар) или газом (ударная волна). Характерной особенностью удара можно считать малый промежуток времени взаимодействия соударяющихся тел при высоких значениях ударных (мгновенных) сил в площадях контакта. Действие ударных сил вызывает изменение скоростей точек тела и формирование в нем ударной волны - переходной области скачкообразного изменения давления, плотности, температуры, скорости движения вещества [1]. Динамический отклик материала на действие импульсных нагрузок вызывает в нем структурные перестройки и появление напряжений, которые могут привести к разрушению [2]. Прохождение ударной волны через структурированную среду, в которой могут проявляться неупругие эффекты в структурных компонентах, происходит микроразрушения и реализовываться эффекты трения между не полностью связанными компонентами, вызывает рассеивание ее энергии [3]. Нежелательные динамические реакции, связанные с взаимодействием отраженных и преломленных волн, могут быть уменьшены при надлежащем прогнозировании структуры композиционных материалов [4]. Демпфирующая роль низко модульных компонентов, повышающих стойкость бетонов при ударных нагрузках, отмечена в [5]. Роль геометрических характеристик структуры гетерогенных материалов, в которых обязательно присутствуют поверхности раздела, заключается в диссипации энергии ударной волны, что влияет на кинетику

разрушения при импульсных нагрузках. Бетон, как полиструктурный материал, организованный по типу “структура в структуре” [6], является по сути грубогетерогенным, в котором на разных уровнях структурных неоднородностей неотъемлемой структурной составляющей присутствуют внутренние поверхности раздела (ВПР) [7, 8]. В силу того, что ВПР формируются в период становления грубогетерогенного материала, то характер их распределения, вид и количество в значительной степени будут предопределять способность воспринимать ударные нагрузки без разрушения. При этом особенную роль должны играть ВПР, соизмеримые с самой большой структурной неоднородностью бетона, к которой относят неоднородность типа “матричный материал - заполнители” [6]. Поэтому представляет интерес анализ механизмов образования и изучения характера распределения ВПР в макроструктуре бетона с целью повышения сопротивляемости разрушения при действии ударных нагрузок.

**Анализ механизмов формирования макроструктурных бетонов**  
Макроструктура бетонов представлена структурной неоднородностью типа “матричный материал - заполнители” [8, 9]. Под матричным материалом понимают растворную часть при использовании крупных заполнителей и цементный камень - для растворов. Отличительной особенностью бетонов как грубогетерогенных материалов можно считать образование ВПР в макроструктуре одновременно с получением бетонной смеси. Поэтому все последующие процессы организации макроструктуры без учета ВПР нам представляются бесперспективными. В работах [7, 8, 9, 10], при анализе механизмов организации структуры, в моделях структурных ячеек бетонов в качестве заполнителей использованы модели заполнителей в виде дисков или цилиндров в предположении, что процессы и явления, происходящие в одной структурной ячейке имманентны процессам и явлениям в отдельных структурных ячейках. Совокупность таких структурных ячеек с определенным набором свойств в каждой ячейке образует собственно бетон. Применение таких моделей структурных ячеек позволило проанализировать механизмы распределения усадочных деформаций в зависимости от геометрических характеристик заполнителей (количества и способов укладки) и от уровня взаимодействия матричного материала с заполнителями [7, 8, 10]. Достаточно изменить форму заполнителей и предположить, что в каждой структурной ячейке будет происходить произвольное ориентирование заполнителей друг относительно друга, то даже при постоянных расходах заполнителей распределение

усадочных деформаций в каждой структурной ячейке будет индивидуальным. Для подтверждения этого был проанализирован механизм распределения деформаций уменьшения объема в модели макроструктуры, в которой заполнители были приняты в виде квадратов с различным ориентированием друг относительно друга при одинаковом приведенном расстоянии  $h=0.2R$ , где  $R$  - приведенный радиус заполнителей, рис. 1а. В зависимости от ориентирования заполнителей в структурной ячейке, как показал анализ, проведенный графо-аналитическим методом [7], изменяются распределение деформаций в матричном материале, рис. 1б.

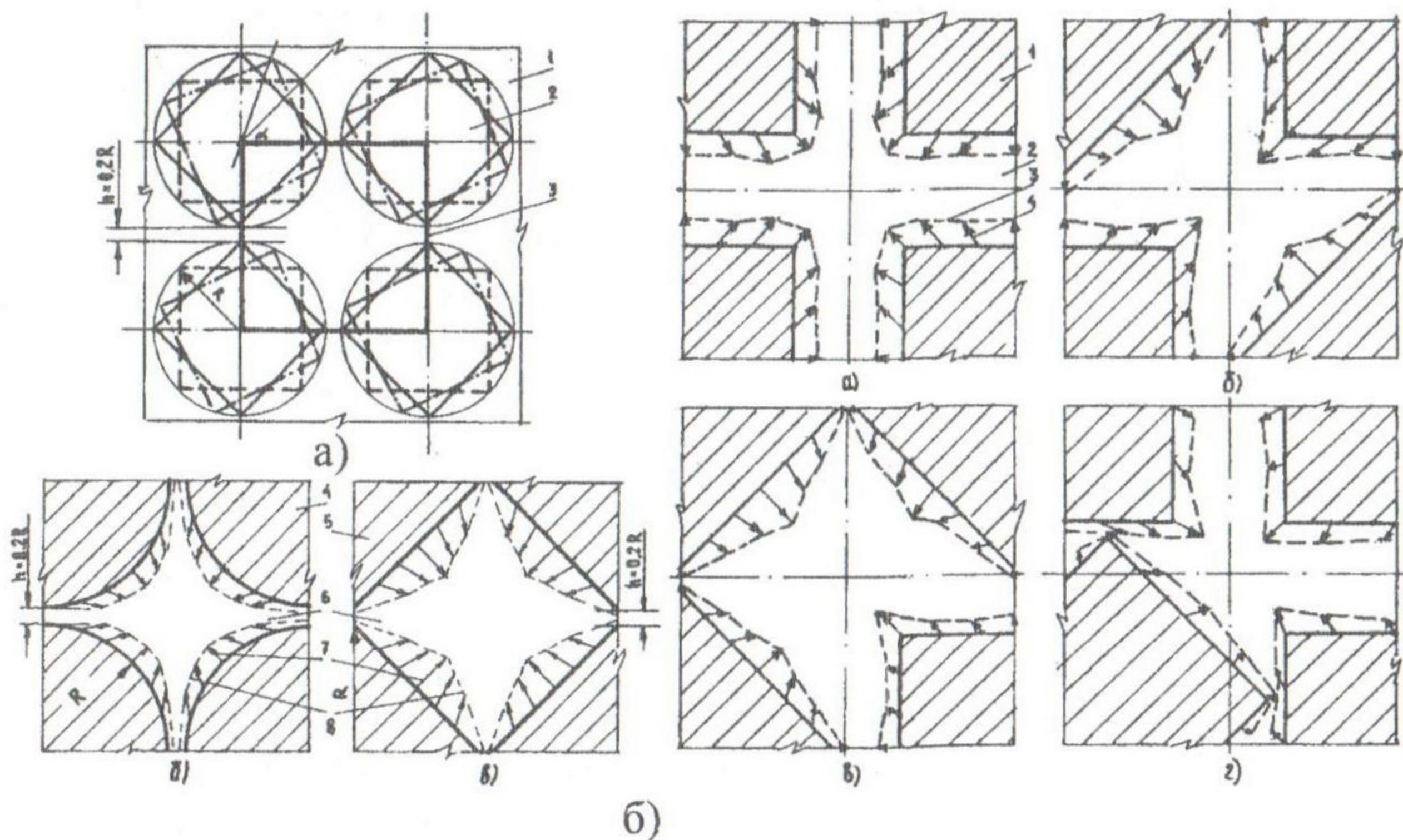


Рис. 1. Влияние формы заполнителей на распределение деформаций в твердеющей матрице.

а – геометрические характеристики модели структурной ячейки; б – распределение деформаций при различном ориентировании заполнителей.

1 – матрица; 2 – заполнители; 3 – модель структурной ячейки; 4 – деформации в матричном материале.

Индивидуальность распределения деформаций в твердеющем матричном материале еще больше усиливается в случае индивидуального микрорельефа поверхности каждого заполнителя. При этом возникают и развиваются локальные деформации, связанные с рельефом поверхности, и интегральные деформации, которые зависят от расстояния, формы и ориентирования заполнителей. На рис.

2 приведен пример распределения локальных и интегральных деформаций в модели структурной ячейки бетона.

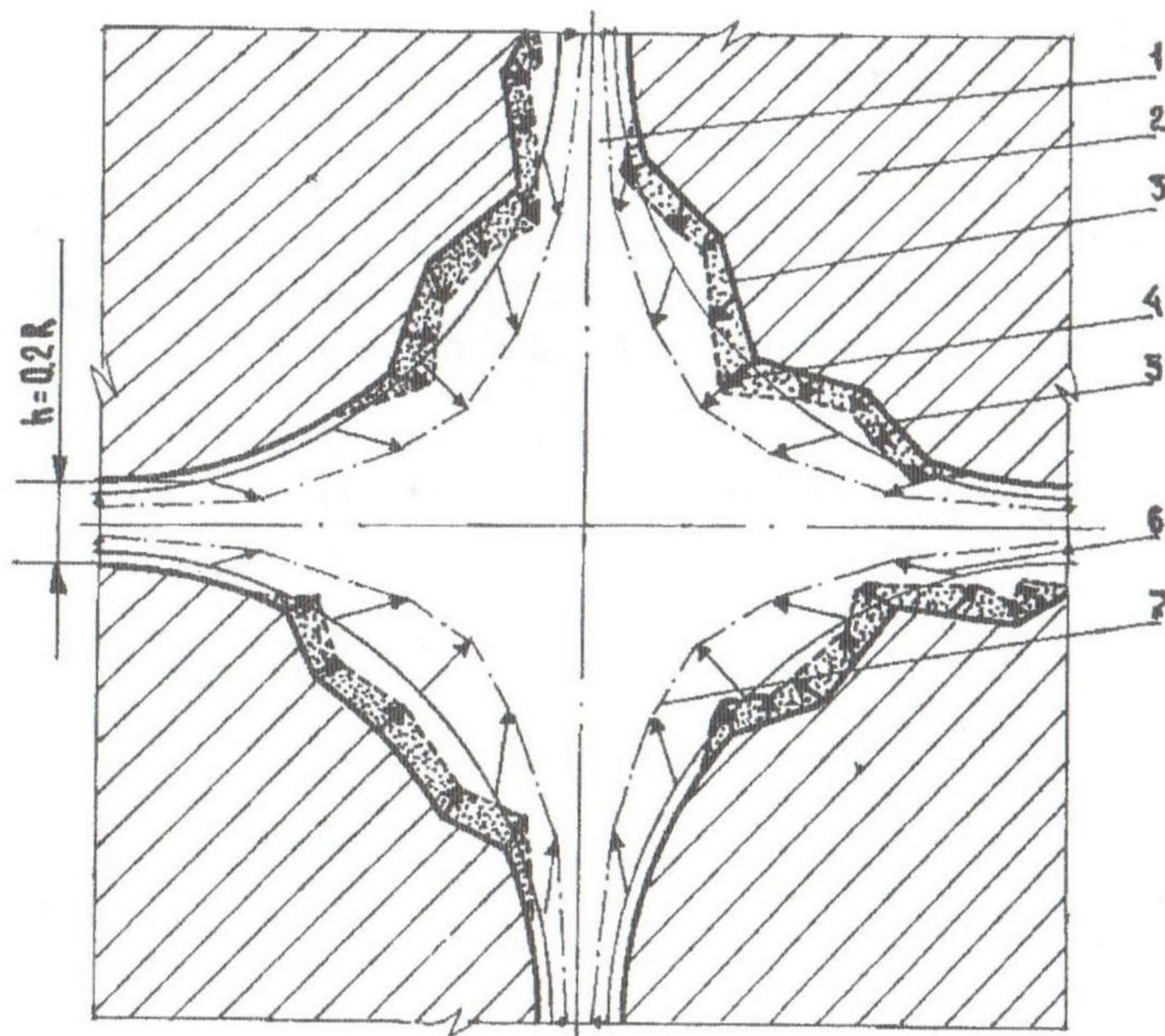


Рис. 2. Влияние рельефа поверхности заполнителей на формирование локальных и интегральных полей деформаций.

1 – матрица; 2 – заполнители; 3 – рельеф поверхности заполнителей; 4 – направление локальных деформаций; 5 – эпюры локальных деформаций; 6 – направление интегральных деформаций; 7 – распределение интегральных деформаций.

Для подтверждения влияния формы заполнителей на характер распределения локальных и интегральных деформаций в макроструктуре бетонов были изготовлены модели бетонов, в которых в качестве заполнителя использованы гравий и щебень из плотного известняка. Для качественного анализа распределения остаточных деформаций методом фотоупругости в качестве матричного материала принята оптически чувствительная эпоксидная смола типа ЭД-16. При анализе исходили из предположения, что адгезионная,  $R_a$ , и когезионная,  $R_k$ , прочности равны,  $R_a=R_k$ .

Анализ показал, что при использовании щебня получаются достаточно развитые локальные деформации в связи со сложным рельефом поверхности. Интегральные деформации зависят как от формы заполнителей, так и от расстояния между ними. Анализ показал, что независимо от вида заполнителей, в каждой структурной ячейке формируются собственные поля деформаций, что подтверждает предположение об индивидуальности распределения остаточных деформаций в каждой структурной ячейке бетона. Это дает основание представить бетон, как типичный представитель грубогетерогенных материалов, сложно организованным материалом, в котором макроструктурные параметры проявляются путем взаимодействия составляющих структурных ячеек с индивидуальными свойствами.

Градиенты локальных и интегральных деформаций являются причиной нарушения целостности матричного материала [7]. Наш анализ показал, что локальные деформации в микроучастках ВПР служат источником зарождения технологических трещин. Дальнейшее укрупнение трещин происходит под действием градиентов интегральных деформаций. Проведенный анализ шлифов бетона показал, что в макроструктуре присутствуют трещины сцепления (ТС) на границе раздела растворной части с крупными заполнителями и цементного камня на границе раздела с мелкими заполнителями; трещины, которые развиваются в матрице между заполнителями (ТМ). Кроме того, в матричном материале присутствуют трещины, незавершенные в своем развитии, которые собственно и отнесены к технологическим трещинам (ТТ) и трещины, замыкающиеся на берегах других трещин, которые отнесены к ВПР.

Суммарное количество ТТ и ВПР определяют гетерогенность макроструктуры и, тем самым, ее способность воспринимать, перераспределять и диссипатировать импульсные нагрузки. Анализ шлифов показал, что дефектов в виде ТТ значительно больше в бетоне на щебне, что связано с большим количеством микронеровностей на поверхностях заполнителей и зависит также от расстояния между заполнителями, которое определяется их количеством. Таким образом, ТТ и ВПР, как объективные структурные параметры макроструктуры, должны определять стойкость бетонов в условиях ударных нагрузок.

**Экспериментальные исследования влияния макроструктурных параметров на сопротивление бетонов ударным нагрузкам.**

Для экспериментального подтверждения влияния формы и количества заполнителей на стойкость бетонов в условиях

импульсных нагрузок в качестве заполнителей были приняты речной гравий и щебень из плотного известняка фракций 4-8 ( $\Phi_1$ ) и 8-16 ( $\Phi_2$ ) мм. Соотношение  $\Phi_1/\Phi_2=1:2$ . Для регулирования количества крупных заполнителей количество кварцевого песка в смеси заполнителей составляло 20, 30, 45 и 60%. Для всех исследуемых составов количество цемента составляло  $C=320\text{кг/м}^3$  при постоянном  $B/C=0.5$ . Составы исследуемых бетонов представлены в табл.1.

Таблица 1

Составы исследуемых бетонов

Шифр бетона	Вид заполнителей	Доля песка в смеси заполнителей, %	Количество песка, $\text{кг/см}^3$	Количество крупных заполнителей, $\text{кг/см}^3$	Полная внутренняя поверхность крупных заполнителей, $F, \text{м}^2$	Среднее расстояние между заполнителями, $H, \text{мм}$
1 А	Гравий	20	389	1558	415.6	0.9
1 Б	Гравий	30	583	1362	317.4	1.5
1 В	Гравий	45	892	1059	194.1	3.1
1 Г	Гравий	60	1171	781	104.2	6.8
2 А	Щебень	20	394	1500	624	0.7
2 Б	Щебень	30	580	1320	480	1.1
2 В	Щебень	45	870	1040	298.5	2.1
2 Г	Щебень	60	1150	750	155.8	4.6

Из бетонных смесей каждого состава формовалась по 18 образцов размером  $15 \times 15 \times 15$  см. После твердения в нормальных условиях в течение 28 суток определялись прочность при сжатии,  $R_b$ , прочность на растяжение,  $R_p$ , энергия удара,  $E$ , и количество ударов до разрушения образцов. Ударная нагрузка передавалась на образцы методом маятника. Результаты испытаний представлены в табл.2.

В силу того, что, как показал анализ механизмов организации макроструктурных параметров, в каждой структурной ячейке грубогетерогенных материалов формируются индивидуальные структурные характеристики, то мы исходили из предположения, что, что свойства т.н. образцов-близнецов должны отличаться друг от друга. Поэтому, для оценки каждого свойства, было испытано по шесть образцов, что позволило рассчитать коэффициент вариации  $V, \%$  табл.2.

Таблица 2

## Физико-механические свойства бетонов

Шифр бетона	R <sub>b</sub> , МПа/V, %	E <sub>p</sub> , МПа/V, %	E, Nm/V, %	Количество ударов до разрушения
1 А	31.2 / 4.4	2.5 / 5.8	810.5 / 8.7	35
1 Б	34.1 / 4.9	3.0 / 6.7	1001.0 / 9.9	45
1 В	32.9 / 5.3	2.8 / 6.0	924.8 / 9.6	40
1 Г	30.5 / 4.6	2.6 / 5.9	840.0 / 8.8	36
2 А	28.0 / 5.1	2.2 / 6.8	530.6 / 9.4	21
2 Б	31.7 / 5.8	2.9 / 7.6	703.3 / 10.2	29
2 В	28.8 / 5.4	2.5 / 7.0	628.6 / 9.8	26
2 Г	27.3 / 4.6	2.4 / 6.8	586.7 / 10.0	23
П	25.5 / 4.3	1.9 / 6.6	709.3 / 8.3	29

Анализ результатов, представленных в табл.1 и табл.2, показывает, что при практически равных количествах крупного заполнителя, площадь их поверхности зависит от формы зерен. Использование щебня увеличивает поверхность раздела между заполнителями и растворной частью в среднем на 50% по сравнению с заполнителями в виде гравия. Увеличение площади ВПР происходит за счет микрорельефа каждого зерна щебня. Поэтому, в целом положительный фактор увеличения площади взаимодействия матричного материала с поверхностью заполнителей в последующих процессах твердения вяжущего, приводит, как было показано выше, к локализации деформаций и образованию трещин в растворной части в зонах микронеровностей поверхности заполнителей. Независимо от вида заполнителей, существует оптимальное их количество, которое способствует сопротивлению ударной нагрузке, рис.3.

Экспериментальные результаты подтвердили, что изменение вида и количества заполнителей влияет на образование макроструктурных параметров и, тем самым, на свойства готового материала. Особое внимание следует уделять локальным полям деформаций, что может быть причиной появления ТТ на микровыступах на поверхностях зерен заполнителя. Изменение микрорельефа поверхности заполнителей (замена щебня на гравий) позволяет в 1.5 раза увеличить количество ударов до разрушения бетона.

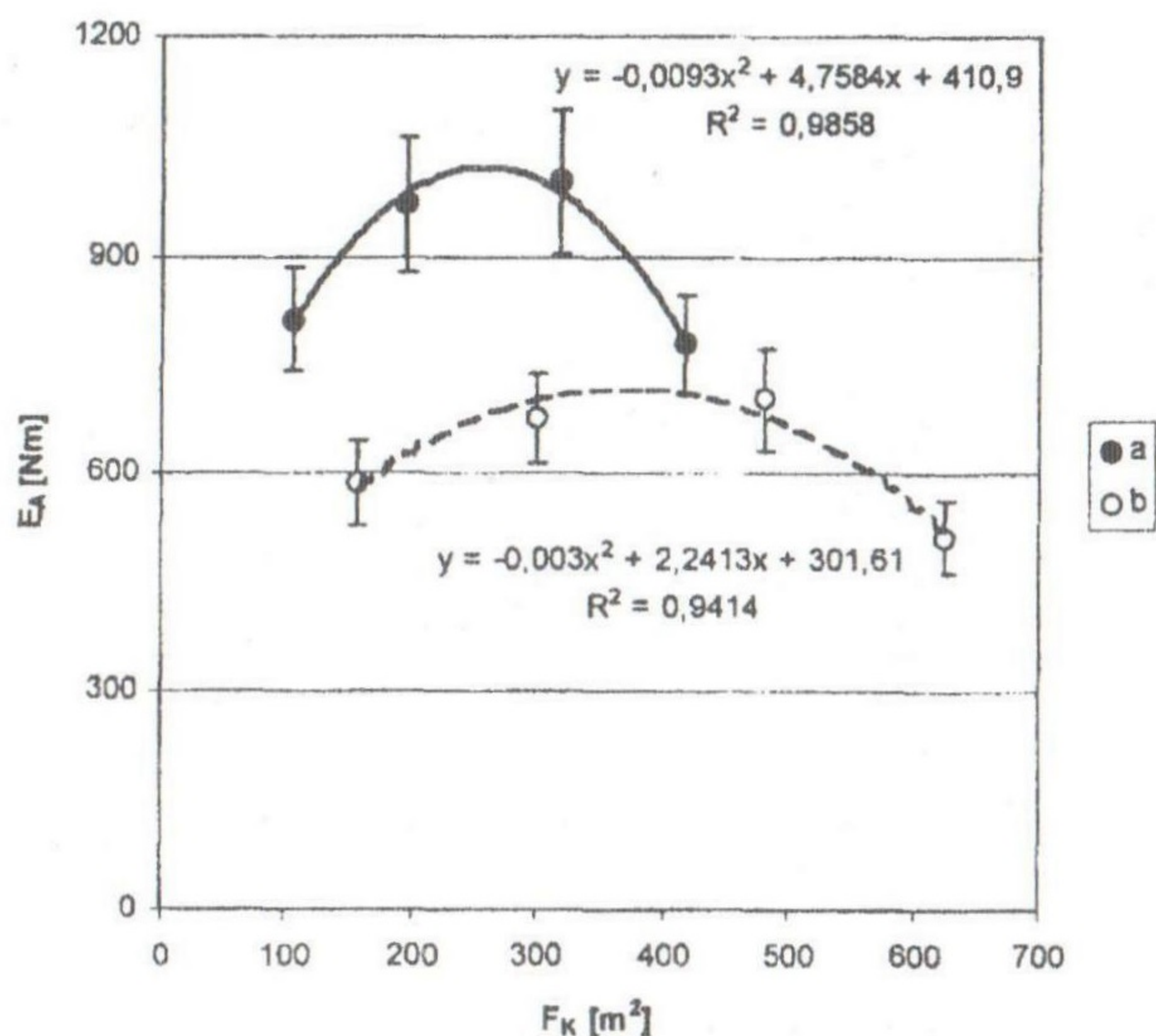


Рис. 3. Влияние внутренней поверхности крупных заполнителей в виде гравия (а) и щебня (б) на изменение энергии удара.

### Выводы.

Проведенные анализ механизмов формирования макроструктуры бетонов и изучение ее влияния на сопротивление ударным нагрузкам позволяют заключить:

1. Анализ механизмов формирования структурной неоднородности типа матричный материал - заполнители показал, что изменение формы заполнителей и их произвольное ориентирование друг относительно друга создают в каждой структурной ячейке присущее только ей индивидуальное распределение деформаций твердеющего матричного материала. При этом возникают локальные, определяемые рельефом поверхности заполнителей, и интегральные, которые зависят от количества и расположения заполнителя, поля деформаций в каждой структурной ячейке. Взаимодействие структурных ячеек с индивидуальным набором структурных характеристик определяет макропараметры бетона как грубогетерогенного материала.

2. Градиенты локальных и интегральных деформаций являются причиной зарождения и развития несплошностей в матричном материале. В общем случае в макроструктуре бетона можно выделить трещины сцепления, трещины, которые зарождаются на берегах трещин сцепления и развиваются в периферийные объемы матрицы, трещины в матричном материале, расположенные между заполнителями. Трещины, незавершенные в своем развитии, отнесены



к технологическим трещинам, способным развиваться под действием экспериментальных нагрузок. Трещины, которые замыкаются на берегах других трещин, классифицированы как внутренние поверхности раздела, способные воспринимать и перераспределять деформации, возникающие под действием температуры, влаги, ударных нагрузок.

3. Проведенные экспериментальные результаты показали, что, изменяя форму, природу и количество заполнителей, можно в достаточно широких пределах изменять механические характеристики бетона и его сопротивление динамичным нагрузкам. В условиях наших опытов, изменяя качественный и количественный состав заполнителей, можно более чем в два раза увеличить способность бетона противостоять импульсным нагрузкам.

1. Астахов А.В. Механика. Кинетическая теория материи. - М.: Главная ред. физ.-мат. литературы, 1977. - 384с.
2. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. - М.: Мир, 1982. - 334с.
3. Мун Ф. Удар и распространение волн в композиционных материалах // Анализ и проектирование конструкций. - Т.1. - Часть 1. - М.: Машиностроение, 1978. - С.264-334.
4. Ахенбах Дж. Д. Колебания и волны в направленно армированных композитах // Механика композиционных материалов. - Т.2. - М.: Мир, 1978. - С.354-400.
5. Комохов П.Г. Принцип структурной механики в технологии бетона // Оптимизация технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности. - Уфа: НИИПромстрой, 1983. - С.9-14.
6. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных материалов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - № 6. - 1985. - С.58-64.
7. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости // Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. - К.: Будівельник, 1991. - 144с.
8. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. - Одесса: Город мастеров, 1998. - 165с.
9. Дорофеев А.В., Выровой В.Н. Влияние макроструктурных параметров на деформативные характеристики бетонов // Вісник ОДАБА. - Вып. 8. - Одеса: ОДАБА, 2002. - С.40-47.
10. Состав, структура и свойства цементных бетонов // Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин В.И. и др. - М.: Стройиздат, 1976. - 144с.