

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТРЕЩИНОСТОЙКИХ БЕТОНОВ С МНОГОУРОВНЕВЫМ ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Коротких Д.Н.¹, *к.т.н., доц.*, **Кесарийский А.Г.²**, *к.т.н.*,
Чернышов Е.М.¹, *академик РААСН, д.т.н., проф.*

¹*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, РФ*

²*ООО «Лаборатория комплексных технологий», Украина, г. Павлоград Днепропетровской области*

Введение. Для современных высокопрочных бетонов характерен хрупкий тип разрушения: разрушение как процесс определяется появлением, развитием и распространением сети трещин в структуре материала. Особенно отчетливо это проявляется для бетонов мелко- и микроконгломератной структуры прочностью свыше 100 МПа. Обобщенно бетоны высокой прочности потенциально более хрупкие и менее трещиностойкие. В этом заключается их противоречивость как конструкционного материала.

Обеспечение необходимого уровня трещиностойкости высокопрочных бетонов достигается несколькими методами, наиболее эффективным среди них является дисперсное армирование структуры. Иерархия трещинообразования бетонов и совокупности трещин свидетельствуют о целесообразности и необходимости многоуровневого дисперсного армирования. Такое армирование понимается как целенаправленное введение в конструкционный материал разноразмерных армирующих элементов на нескольких его масштабных структурных уровнях, призванное обеспечить принципиальное изменение условий образования и распространения трещин в структуре материала [1].

Многоуровневое армирование по нашему мнению должно исходить из принципов: 1) конгруэнтности (соразмерности) армирующих элементов параметрам «блокируемых» трещин; 2) соответствия объемной доли армирующих элементов «концентрации» дефектов (трещин) определенного уровня структуры – сростка кристаллов, цементирующего вещества (новообразований), цементного микробетона, мелкозернистого бетона, крупнозернистого бетона; 3) субстанционального соответствия материала армирующих элементов характеристикам матричного материала [2-5].

С учетом характерных размеров дефектов каждого масштабного уровня структуры и на основе сопоставления различных вариантов распределения армирующих элементов в объеме матриц нами выделены границы уровней дисперсного армирования и разработана модель многоуровневого дисперсного армирования структуры материала, в которой обоснованы следующие условия конгруэнтности армирующих элементов и трещин: 1) по размеру армирующих элементов l_{fi} и трещин a_{mpi} каждого масштабного уровня структуры - $l_{fi} > 3 \dots 5 a_{mpi}$; для обеспечения надежной анкеровки диаметр армирующих элементов $d_{fi} = l_{fi} / (80 \dots 120)$; 2) по соответствию числа армирующих элементов V_{fi} числу (концентрации) трещин C_{mpi} каждого масштабного уровня структуры - $V_{fi} \approx C_{mpi}$ [1].

Для решения задач конструирования структур высокотрещиностойких бетонов необходимо сущностное понимание сложного процесса трещинообразования, основой которого может стать [6-10] метод лазерной голографической интерферометрии (ЛГИ).

Метод ЛГИ является бесконтактным и безынерционным и это позволяет проводить эксперименты в широком диапазоне статических и динамических нагрузок, регистрируя поля перемещений точек поверхности образца материала в интервале 0,1-100 мкм [5, 6]; прямые и прецизионные измерения могут проводиться одновременно по всей исследуемой поверхности деформирования образца материала и могут выполняться на телах любой геометрической формы. Методы лазерной интерферометрии позволяют рассматривать широкую гамму задач. К их числу можно отнести изучение собственных деформаций бетона, выявление силовых трещин. Применение этого метода для исследований процесса разрушения различных бетонов показало высокую эффективность [1-6]. Перечисленные возможности методов ЛГИ для регистрации полей перемещений особенно актуальны при изучении процесса деформирования высокотрещиностойких бетонов с дисперсным армированием их структуры, поскольку позволяют визуализировать процесс развития трещин от момента их зарождения до полного разрушения и тем самым оценить влияние армирующих элементов.

Анализ деформирования и разрушения в настоящей статье оценивался для высокопрочных бетонов с многоуровневым дисперсным армированием структуры: на макромасштабном структурном уровне фиброй из стального листа 40x0,8 мм; объемная доля 2,5 и 4%; на мезомасштабном структурном уровне базальтовой фиброй БС 16-13; объемная доля 4%; на микроуровне - углеродным волокном.

Методика исследований. Методика количественного анализа поверхностных деформаций основывалась на использовании схемы регистрации поля нормальных перемещений, в соответствии с которой цена интерференционной полосы составляет половину длины волны применяемого лазерного излучения [6-12]. Для практической реализации этой методики каждую из светлых полос описывали набором точек, содержащих информацию о ее координатах в плоскости образца и номера полосы.

Важным методическим моментом приведенных исследований бетонов методом ЛГИ являлось испытание серий образцов, отличающихся наличием или отсутствием искусственной трещины длиной до половины сечения образца в месте предполагаемых наибольших деформаций при нагружении. Такой прием позволяет провести сравнительную оценку процесса трещинообразования с наличием/отсутствием искусственного концентратора напряжений.

При регистрации интерферограмм по методу двойной экспозиции, для записи голограмм применялась схема Ю.Н. Денисюка (см. рис.1). Излучение лазера, проходя через световой затвор, оптическую систему и фотопластинку 4, освещает исследуемые поверхности объекта 1 коллимированным световым потоком (падающее излучение показано сплошными стрелками, отраженное – пунктирными).

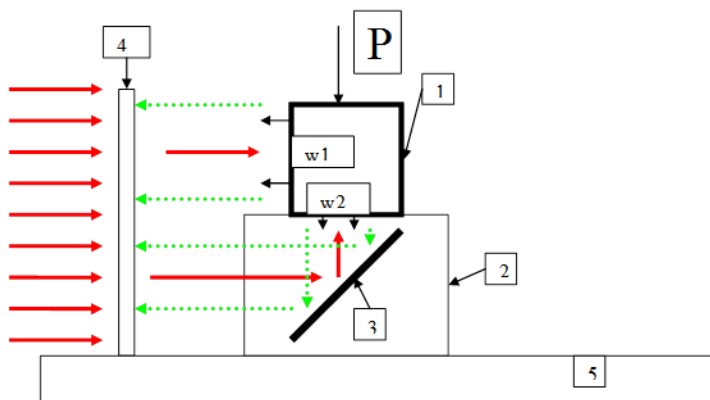


Рисунок 1 – Схема регистрации интерферограмм.

Продольная ось коллимированного светового потока лазерного излучения ориентировалась перпендикулярно к фронтальной поверхности исследуемого образца. Это позволило обеспечить максимальную чувствительность схемы измерений к нормальной компоненте вектора перемещения. Для реализации возможности одновре-

менной регистрации той же компоненты вектора перемещений на нижней поверхности, использовалось зеркало 3, установленное на жестких опорах под углом 45 градусов.



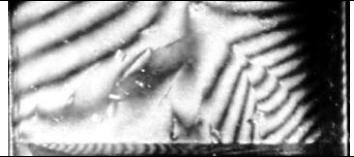



В процессе исследования после установки фотопластинки 4 открывался затвор и регистрировалось исходное состояние исследуемой поверхности объекта 1. Затем к бетонному образцу прикладывали нагрузку, после чего затвор открывался повторно на время, соответствующее первой экспозиции, а далее фотопластинка извлекалась и подвергалась химической обработке [10-11].

Результаты исследований. С постепенным ростом нагрузки на образец и его деформированием существенно менялись условия локализации и концентрации напряжений. Так, для случая образцов без искусственной трещины момент начала трещинообразования фиксируется при нагрузке $\sigma/R=0,40\dots0,43$, что существенно ниже, чем для бетонов микроконгломератной структуры без дисперсного армирования, для которых этот момент фиксируется при уровне напряжений $\sigma/R=0,8\dots0,9$. Это подтверждается и результатами исследований процесса разрушения таких бетонов методом полных равновесных диаграмм деформирования [13-14], наблюдается заметное преобладание удельной работы микро- и макро-трещинообразования, малая доля удельной работы упругого деформирования в полной работе разрушения. Формирование трещин в бетонах с дисперсным армированием происходит не только в зоне наибольших деформаций, но и в значительном отдалении от нее, наблюдается перераспределение напряжений по объему материала.

К моменту нагружения, отвечающему $\sigma/R\approx 0,5$ отчетливо наблюдается обширная область псевдопластического деформирования в зоне растяжения с формированием сети микротрещин, которые растут, объединяются, продвигаются в материал. И к моменту относительных напряжений $\sigma/R\approx 0,75$ отмеченная область псевдопластических деформаций (табл. 1) простирается от опоры до опоры, то есть весь объем материала в данной области воспринимает все возрастающую нагрузку.

При дальнейшем увеличении нагрузки сопротивление материала разрушению определяется связанностью отдельных фрагментов образца армирующими элементами, наблюдается дальнейшее распространение трещин в структуре материала вплоть до уровня относительных напряжений $\sigma/R=1$. При этом материал не теряет полностью своей несущей способности, не фрагментируется. Структурные связи между матричным материалом и армирующими элементами еще сохраняются.

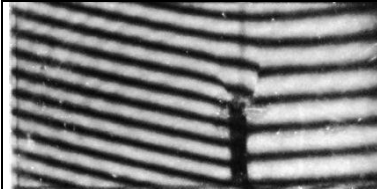
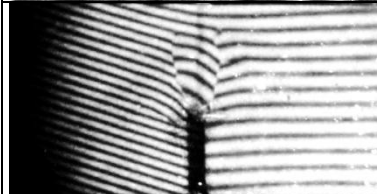
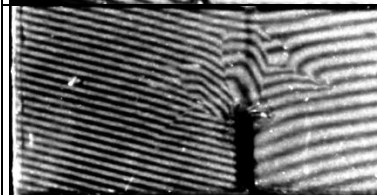
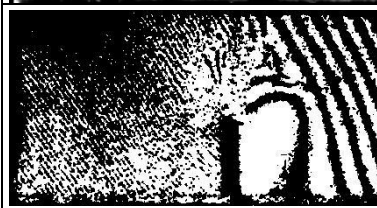
Таблица 1. - Картины накопления повреждений структуры

Интерферограммы фронтальной поверхности образца	Относительный уровень напряжений образования трещины σ/R
	0,40...0,43
	0,46...0,51
	0,62...0,67
	0,61...0,74
	0,89...0,92
	0,92...0,97

Для образцов с искусственной трещиной процесс разрушения во многих его особенностях аналогичен (таблица 2). Уменьшение сечения образца и искусственный концентратор напряжений смещают начало трещинообразования в более раннюю стадию нагружения. Однако и в этом случае «проскока» магистральной трещины не происходит, а наблюдается уже описанное выше вовлечение в процесс разрушения все большего объема материала вследствие многократного перерас-

пределения напряжений с армирующих элементов на матрицу и с матрицы на армирующие элементы.

Таблица 2. - Картины накопления повреждений структуры (образцы с искусственной трещиной)

Интерферограммы фронтальной поверхности образца	Относительный уровень напряжений образования трещины σ/R
	0,32...0,35
	0,56...0,65
	0,70...0,74
	0,80...0,89

Выводы

Методом лазерной голографической интерферометрии установлены отличительные особенности деформирования и разрушения высокопрочных бетонов с многоуровневым дисперсным армированием структуры, которое дает возможность структуре эффективно противостоять росту и распространению трещин в материале. Главными отличительными характеристиками процесса разрушения таких бетонов, оценён-

ными методом ЛГИ являются: более раннее появление первых трещин (момент образования первой трещины соответствует $\sigma/R=0,40\dots0,43$); формирование сильно разветвленной сети трещин в обширной области образца (от опоры до опоры); при уровне относительных напряжений $\sigma/R=1$ фрагментации образца не наблюдается. Указанные особенности справедливы, в том числе и для образцов с искусственной трещиной (концентратором напряжений). Применительно к таким высокотрещиностойким бетонам можно говорить о принципиально ином типе разрушения, о переходе от хрупкого типа разрушения к псевдопластическому.

Реализация приема многоуровневого дисперсного армирования наряду с другими механизмами структурообразования позволяет при сопоставимом уровне прочности при сжатии (до 140 МПа) обеспечить рост трещиностойкости (вязкости разрушения) в три-четыре раза; предельной растяжимости – на порядок; полной работы разрушения – более чем в 30 раз [13-14].

Summary

В статье анализируются особенности деформирования и разрушения высокотрещиностойких бетонов методом лазерной голографической интерферометрии. Приводятся данные о кинетике формирования трещин при действии механической нагрузки. Для высокопрочных цементных бетонов с дисперсным армированием структуры характерен псевдопластический тип разрушения.

1. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы, №3, 2011, с.96-99.

2. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Повышение трещиностойкости мелкозернистого цементного бетона при многоуровневом дисперсном армировании его структуры. Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы седьмых чтений РААСН / Белгород. гос. техн. акад. строит. мат. – Белгород, 2001. – Ч. 1. – С. 587-598.

3. Коротких Д.Н., Чернышов Е.М. Наноармирование структуры цементного камня кристаллами этtringита как средство повышения трещиностойкости бетонов // Научный вестник Ворон. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. №1, 2008 г. – С.67-75.

4. Коротких Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2009. №3. С. 126-128.

5. Коротких Д.Н., Ушаков И.И., Ушаков С.И., Чернышов Е.М. Иерархия трещинообразования и многоуровневое дисперсное армирование структуры бетона / Вестник ОГАСА, Вып. 39, том 2. – Одесса, 2010, С.4-13.
6. Кондращенко В.И, Кесарийский А.Г., Кондращенко Е.В., Гребенников Д.А. Особенности поведения ротационного и вибрационного бетона под нагрузкой // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури, № 3, 2010, с.90 – 99.
7. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. – М.: Наука, 1988. – 248 с.
8. Цилосани З.Н., Далакишвили Г.Л., Какичашвили Ш.Д. Исследование собственных деформаций силикатного композитного материала (бетона) методом голографической интерферометрии // Механика и технология композитных материалов / Труды II конференции. Варна: 1979. С. 550-553.
9. Нижарадзе М. Д. Деформация растяжения бетона к моменту выявления силовых трещин методом голографической интерферометрии: Дис.... канд. техн. наук. – Тбилиси: Грузинский политехн. ин-т, 1988. – 144 с.
10. Кесарийский А.Г., Кондращенко В.И., Гребенников Д.А., Гузенко С.В. Исследование деформационных характеристик бетонных образцов лазерно-интерференционными методами // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ, № 4, 2009, с. 154-159.
11. Коротких Д.Н., Кесарийский А.Г. Исследование методом лазерной голографической интерферометрии процесса трещинообразования при разрушении высокопрочных бетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Вып. №4, 2011. С. 32-39.
12. Вест Ч. Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
13. Коротких Д.Н., Ушаков А.В. Характеристика показателей разрушения высокопрочных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук.- Воронеж: РААСН, ВГАСУ, 2011.- С.76-89.
14. Коротких Д.Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1) // Вестник ВолГАСУ, Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 26(45). 2012, с. 56-67.