

**МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН В  
СЛОЖНООРГАНИЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ  
ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВИМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Жуковский В.К.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, Заволока Ю.М.<sup>2</sup>, с.н.с.,  
Гохман А.Р.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф., Заволока М.В.<sup>2</sup>, к.т.н., проф.,  
Выровой В.Н.<sup>2</sup>, д.т.н., проф., Хоменко А.А.<sup>2</sup>, инженер**

<sup>1</sup>*Южноукраинский национальный педагогический университет  
им. К.Д. Ушинського, Одеса,*

<sup>2</sup>*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

**Введение.** К основным, постоянно действующим воздействиям на строительные конструкции, следует отнести температурные воздействия. Проведенный анализ климатических условий эксплуатации зданий и сооружений различного вида и назначения позволил заключить, что различная интенсивность термических воздействий начнет наблюдаться в пределах одного изделия, их группы и всего здания в одно и тоже время. Кроме того усредненная температурная нагрузка зависит от суточного и сезонного изменения температуры окружающей среды. Перманентные температурные деформации, особенно на фоне постоянного изменения влажности могут привести к снижению эксплуатационных характеристик бетона, как основного составляющего изделий и конструкций. Бетон вне зависимости от вида и назначения воспринимает, перераспределяет, поглощает, излучает и т.п. внешние термические воздействия. Кроме того, для теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов, включая бетоны, стоит задача создания в ограждающих конструкциях термического сопротивления в пределах заданных значений.

В работах [1,2] бетон представлен как полиструктурный материал, организованный по типу «структура в структуре» или «композит в композите». Это предполагает многоуровневую структурную архитектуру с набором определенных элементов. К таким элементам можно отнести на уровне макроструктуры заполнители, матричный материал (растворные составляющие), технологические трещины, внутренние поверхности раздела. Важной характеристикой макроструктуры следует считать наличие локального и интегрального

полей от остаточных (технологических) деформаций. Существование таких разнородных составляющих в одном материале не позволяет однозначно определить его реакцию на термическое воздействие, даже зная коэффициенты термического расширения заполнителей и матричного материала

Известно, что изменение температуры вызывает изменение объема материала, что должно сказаться на изменении деформативно-напряженного состояния образца. Локальное или одностороннее температурное воздействие на достаточно сложно оформленный материал приводит к формированию локальных деформаций. Возникает при этом ряд задач, решение которых позволит более объективно раскрыть механизмы реакции гетерогенных материалов на термические воздействия. Первая задача связана с ответом на вопрос – возникшее локальное изменение объема имеет динамику собственного развития или они изменяются одновременно с изменением формирующегося температурного поля. Решение второй задачи напрямую связано с первой – определение управляющих факторов для регулирования процессов формирования тепловых потоков в сложноорганизованных материалах.

В качестве гипотезы мы предполагаем, что скорость передачи энергии деформирования выше скорости передачи термической энергии и, как следствие, в материале изделия должна развиваться деформационная волна. Вид такой волны должен зависеть от таких структурных составляющих, как трещин, поверхностей раздела и характера остаточных деформаций. Таким образом, образующаяся деформационная волна провоцирует, через изменение плотности, направление и скорость передачи тепловой энергии с очередным этапом локального изменения объема.

**Методика проведения исследования.** Экспериментальные работы проводили на модели структурных ячеек бетонов с учетом взаимодействия матричного материала с арматурой (рис. 1а), с пористыми (рис. 1б) и плотными (рис. 1в) заполнителями.

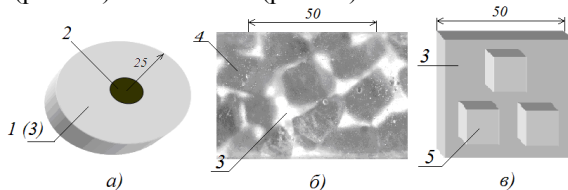


Рис. 1. Модели структурных ячеек бетона

1 – цементный камень; 2 – арматура; 3 – эпоксидная смола;

4 – керамзитовый гравий; 5 – заполнители квадратной формы.

В качестве матричного материала использовали цементное тесто с  $V/C=0,27$  с целью изучить характер трещинообразования твердеющего матричного материала при его взаимодействии с различными по природе и форме заполнителями. Для анализа влияния вида заполнителей на формирование полей локальных и интегральных деформаций в качестве матрицы использовали оптически чувствительную эпоксидную смолу типа ЭД-20 с отвердителем ПЭПА.

Характер развития остаточных деформаций проводили графо-аналитическим методом, методом фотоупругости и спекл-интерферометрии [3,4]. Принципиальная схема интерферометра для количественного и качественного анализа деформаций в моделях структурных ячеек в трехмерном измерении представлено на рис. 2.

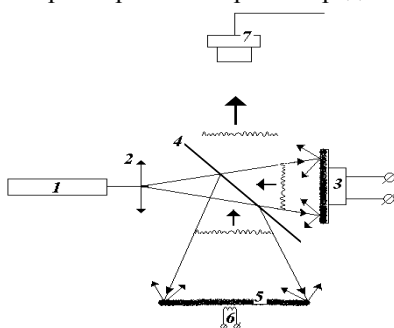


Рис. 2. Схема спекл-интерферометра.

1 – Гелий неоновый лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – диффузный рассеиватель, закрепленный на пьезокерамике, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – образец, 6 – нагреватель (вольфрамовая спираль размером  $\approx 10 \times 5$  мм), 7 – телекамера.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: локальный подвод температуры осуществлялся нагревателем площадью  $10 \times 5$  мм. Снизу в геометрическом центре модели структурных ячеек. При этом контролировали изменение температуры поверхности с точностью  $0,5$  °С с интервалом 5с и возникающие на поверхности моделей деформации с точностью до  $0,03$  мкм.

**Анализ влияния локального нагрева на характер развития деформаций.** В работах [5,6] показано, что при локальном или одностороннем изменении объема, связанного с локальным или однородным изменением влажности и температуры, в образцах и

изделиях возникают и развиваются «деформационные волны», которые распространяются по всему образцу и изделию. Было выдвинуто предположение, что материал изделия воспринимая энергию возникших деформаций, передает ее на соседние участки с частичной дистанцией. В результате образуются стоячие волны с переменными амплитудами и периодом, которые могут развиваться по мере изменения объема локальных участков. Аналогичная картина возникновения и развития деформационных процессов должна происходить на уровне структурных неоднородностей бетона.

Экспериментальные результаты показали, что развитие деформационных процессов в моделях структурных ячеек бетона начинается практически одновременно с подводом тепловой энергии. Локальные и тепловые деформации вызывают деформирование соседних объемов материала и проявляются на противоположной поверхности без изменения ее температуры. Местное увеличение объема провоцирует развитие деформаций соседних участков, формируя своеобразную «деформационную волну». Характер формирования деформационной волны в образце из структурно однородного материала представлен на рис.2.

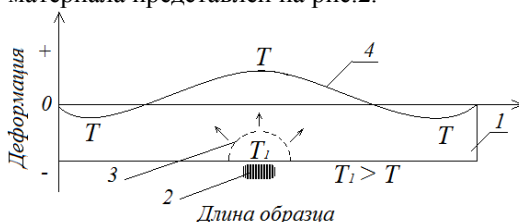


Рис.2. Механизм формирования деформационной волны при локальном нагреве образца:

1 – образец; 2 – нагреватель; 3 – зона развития температурных деформаций; 4– изменение деформаций;  $T$  – начальная температура;  $T_1$  – изменение температуры

В случае использования материалов с определенной структурной организацией передача энергии деформирования от одного вида структурных неоднородностей к другому будет определяться состоянием поверхности раздела между составляющими и их деформационными характеристиками. Это изменяет вид возникающих деформационных волн. На рис.3 представлен механизм формирования деформационных волн при локальном нагреве образца, изготовленного из многокомпонентного материала.

При совершенной адгезионной связи матричного материала с поверхностью структурной неоднородности (при условии  $E_m < E_{сн}$ , где  $E_m$  – модуль упругости матрицы, а  $E_{сн}$  – модуль упругости структурной составляющей), энергия деформирования изменяется, что оказывает влияние на характер базовой деформационной волны.

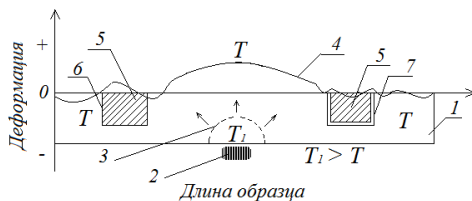


Рис.3. Формирование деформационной волны при локальном нагреве образца и структурно неоднородного материала:

1 – образец; 2 – нагреватель; 3 – зона развития температурной деформации; 4 – изменение деформаций; 5 – структурная составляющая с повышенными деформационными характеристиками; 6 – совершенная адгезионная связь по межфазным поверхностям раздела; 7 – отсутствие адгезионных сил, связей на межфазных поверхностях раздела;  $T_i$  – изменение температуры

В случае ослабленной адгезии материал матрицы «наплывает» на структурное включение, вызывая половинные появления локальных деформаций. Можно предположить, что аналогичные возмущения деформационной волны при локальном нагреве структурно неоднородного материала будут происходить при ее встрече с берегами трещин и внутренних поверхностей раздела. Особенности влияния на характер развития и вид деформационных волн должны оказывать начальные локальные и интегральные деформации, как на уровне структурных неоднородностей материала, так и на уровнях образца или изделия. Примером возникновения и развития деформационных волн является мгновенные объемные «портреты» деформационного состояния, которые возникли при локальном нагреве моделей структурных ячеек бетона рис.4.

Сравнение полученного методом спекл-интерферометрии «портрета» деформационного состояния модели после локального подвода температуры с характером распределения остаточных деформаций, полученным графо-аналитическим методом и методом фотоупругости, позволило установить влияние остаточных деформаций, состоянием поверхностей раздела между матрицей и включениями, видом и ориентированием включения на формирование деформационных волн. Это позволило рекомендовать данный метод,

после совершенствования, для обнаружения, фиксации и количественной оценке структурных неоднородностей сложноорганизованных материалов.

Анализ кинетики формирования и распространения деформационных волн позволил заключить, что возникшие деформационные возмущения, накладываясь на существующие неравномерные деформационные поля, изменяют их общую картину. В материале спонтанно возникают зоны, области, протяженности (ручьи) материала с повышенной плотностью.

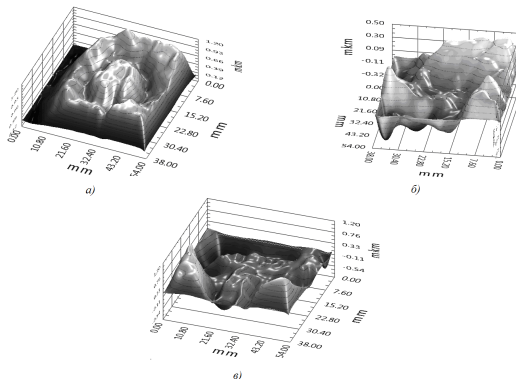


Рис.4. Деформации поверхности моделей структурных ячеек бетона а – с арматурой; б – с керамзитовым гравием; в – с низкомодульным заполнителем

Логично предположить, что передача тепловой энергии будет происходить по зонам материала с повышенной плотностью, что приведет к локальным тепловым деформациям и, как следствие, к формированию деформационных микроволн, последние входят составной частью в базовые деформационные волны. Кроме того, волновой процесс изменения деформационного состояния следует считать одним из основных факторов, влияющих на формирование условий теплопередачи. Сосуществование в матричном материале зон различной плотности предполагает формирование тепловых потоков в виде отдельных каналов или ручьев, сток которых будет определяться зонами максимальной плотности. Подобный ручейковый узор тепловых потоков сформирует своеобразный перколяционный кластер в образце, конструкции и изделии. Изменяя вид перколяционных кластеров за счет направленного структурообразования и «наведения»

остаточных деформаций в материале можно регулировать процессами теплопередачи в ограждающих конструкциях.

### ***Выводы***

Проведенные исследования показали, что при локальном подводе тепла к сложноорганизованным материалам возникают деформационные волны, которые проходят через весь образец, полученный из этих материалов. Скорость распространения деформационных волн выше скорости передачи тепловой энергии, что ведет к самопроизвольному образованию в материале флуктуаций плотности. Образование градиентов плотности предполагает, что в материале формируются сложные траектории тепловых потоков, изменяя которые дает возможность изменять термозащитные свойства теплоизоляционных и теплоизоляционных-конструкционных материалов.

### **Summary**

**The speckle-interferometry method can be used to study the coefficient of linear thermal expansion, as well as the distribution of stresses and strains in samples of opaque building materials. Studies have shown that the deformation wave significantly outpaces heat wave in the thermal effect on the model of composite building materials.**

### ***Литература***

1. В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. Композиционные строительные материалы и конструкции, 2010.
2. В.К. Жуковский, А.Р. Гохман, Ю.М. Заволока, В.Н. Выровой. Спекл-интерферометрические методы при анализе технологических деформаций различных сред // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2010, №39, с.230-237.
3. В.К. Жуковский, А.Р. Гохман, Ю.М. Заволока, В.Н. Выровой. Исследование напряженно-деформационного состояния композиционных строительных материалов методом спекл-интерферометрии // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, №43, 2011, с. 154-158.
4. В.К. Жуковский, А.Р. Гохман. Связь коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями // Журналь технической физики, 79 (2009) №4, с. 90-97.
5. Най Дж. Физические свойства кристаллов: Пер. с англ. – М.: Мир. -1967. – 385с.

6. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. Физические величины. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 123с.

7. Ю.М. Заволока, В.Н. Выровой. Особенности процессов теплопередачи в гетерогенных материалах// Сборник докладов. Том 3. Научно-практическая конференция. Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях, М.: - 1997. – 313с.

8. В.К. Жуковский, А.Р. Гохман, Ю.М. Заволока, В.Н. Выровой. Исследование напряженно-деформационного состояния композиционных строительных материалов методом спекл-интерферометрии // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, №47, 2012, с. 139-147.



