

## CONTENTS – SPIS TREŚCI – СОДЕРЖАНИЕ – ЗМІСТ

### SECTION 1 OCCASIONAL LECTURES

- Ataman M., Zbiciak A.** 50 lat pracy dydaktycznej Profesora Waclawa Szcześniaka w Politechnice Warszawskiej 17  
**Ataman M., Zbiciak A.** Fifty years of didactic work Professor Waclaw Szcześniak in Warsaw University of Technology
- Dr.-ing., dr.h.c.(UA), Universitätsprofessor Dieter Weichert. On the occasion of 65<sup>th</sup> anniversary 19  
Профессор, доктор наук, почетный доктор приднепровской государственной академии строительства и архитектуры Дитер Вайхерт
- Профессор Кваша Эдуард Николаевич 23  
к 75 летию со дня рождения
- Леонид Исаакович Маневич 25  
к 75 летию со дня рождения

### SECTION 2 MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURES

- Ataman M., Szcześniak W.** Raptowna zmiana więzów W płaskiej strukturze przegubowej 29  
**Ataman M., Szcześniak W.** Sudden change of constraints in articulated structures
- Balcerzak M., Gleba M., Kwaśniewski L., Radziszewski P., Sarnowski M., Wekezer J.W.** Numerical analysis of stress distribution in a bridge pavement 39  
**Balcerzak M., Gleba M., Kwaśniewski L., Radziszewski P., Sarnowski M., Wekezer J.W.** Analiza numeryczna rozkładu naprężeń w nawierzchni mostowej

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Юрий ЗАВОЛОКА, Вадим ЖУКОВСКИЙ, Александр ГОХМАН  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Южноукраинский национальный педагогический университет  
им. К.Д. Ушинского, г. Одесса

Характерной особенностью композиционных строительных материалов (КСМ) является их гетерогенность, которая определяется не только их качественным и количественным составами, но и дискретностью образовавшихся структур, наличием внутренних поверхностей раздела (ПР) и остаточным локальным и интегральным деформативно-напряженным состоянием [1].

Композиционные строительные материалы (КСМ) получают путем физико-химического и/или физико-механического соединения разнородных компонентов. Установлено, что физико-технические характеристики конечного материала связаны нелинейно с характеристиками исходных компонентов. Можно предположить, что при взаимодействии компонентов образуются внутренние по отношению к материалу структуры, взаимодействие которых приводит к проявлению явлений синергизма.

Особый интерес представляет исследование остаточных деформаций как на внешних, так и на внутренних поверхностях раздела КСМ.

Теплопроводность и теплозащитные свойства гетерогенных композиционных строительных материалов (КСМ) определяются сосуществованием составляющих их компонентов и структур, взаимодействующих через или посредством внутренних поверхностей раздела. К внутренним поверхностям раздела можно отнести берега технологических трещин, которые возникают и развиваются в период формирования гетерогенных материалов, что определяет в материалах возникновение остаточных деформаций (которые можно рассматривать как локальные изменения плотности), распределение и величина которых зависит как от геометрических параметров системы, так и от ее качественного состава и режимов твердения. Моделирование процессов передачи тепла в материалах дискретного строения, к которым предъявляются требования теплозащиты, является актуальной задачей. В связи с этим, можно предположить, что формирование теплового потока в КСМ должно зависеть не только от теплопроводности составляющих материал компонентов, но и от состояния внутренних ПР, и распределения остаточных деформаций (локального изменения плотности).

Были проведены комплекс исследований на моделях структурных ячеек бетонов, как гетерогенных материалов. Механизм теплопередачи изучали косвенным методом, путем качественного определения тепловых деформаций на моделях, изготовленных из фотоупругого материала. Применение метода фотоупругости позволило, достаточно в широких пределах, изучать влияние состава и адгезионно-когезионных сил связи на ПР между матрицей и заполнителями. Материалами для изготовления структурных ячеек были использованы: эпоксидная смола, оргстекло, алюминиевая фольга, металлические кольца и керамзитовый гравий.

В работах [2, 3] показана возможность использования метода спеклинтерферометрии для исследования напряженного состояния КСМ, как гетерогенных структур. Было показано, что эти методы в отличие от метода фотоупругости позволяют исследовать как непрозрачные строительные материалы, так светопрозрачные структурные модели КСМ, что дает возможность исследования структур из реальных строительных материалов, а не их светопрозрачных моделей.

В данной работе представлено развитие методики определения поля деформаций в реальных строительных материалах, аналогичным методом исследования поля деформаций в металлических изделиях.

Для исследования были выбраны 3 образца: а) цементный раствор в стальном кольце, б) эпоксидный образец с керамзитом.

В данной работе, как и в [4], в качестве тестирующего возмущения использовался центральный точечный нагрев. Для определения распределения температуры  $T$  по поверхности образцов использовалось уравнение для изотропного материала в стационарного процесса [5]:

$$\Delta T_{ij} = \frac{\dot{Q}}{4\pi k \sqrt{(i_0 - i)^2 + (j_0 - j)^2}}, \quad (1)$$

где  $\dot{Q}$  – мощность источника тепла (для образцов а) – 1Вт, рис. б) – 2Вт, с) – 2Вт),  $k$  – коэффициент теплопроводности (цемент 1,2 Вт/(м К), эпоксидная смола 0,9 Вт/(м К) [6]),  $i_0, j_0$  – координаты точки нагрева;  $i, j$  – координаты текущей точки, в которой определяется изменение температуры относительно точки нагрева.

На рис. 1 представлены интерференционные картины полученные методом спеклинтерферометрии, а на рис. 3 – распределение изменения температуры при центральном точечном нагреве.

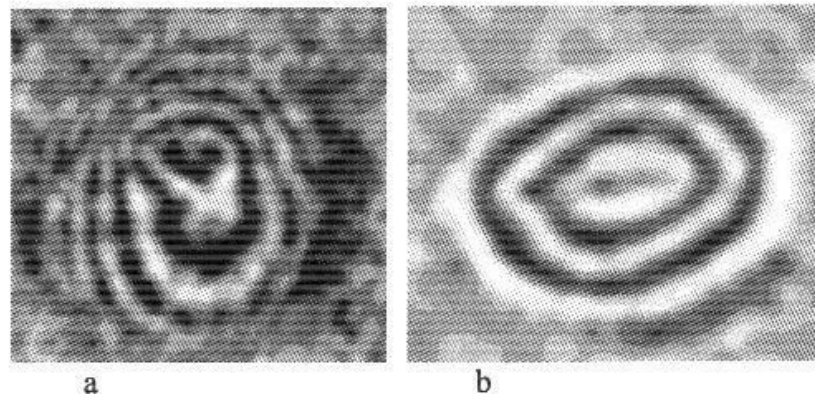


Рис. 1. Интерферограмма а) цементного образца со стальным кольцом; б) эпоксидного образца с керамзитом.

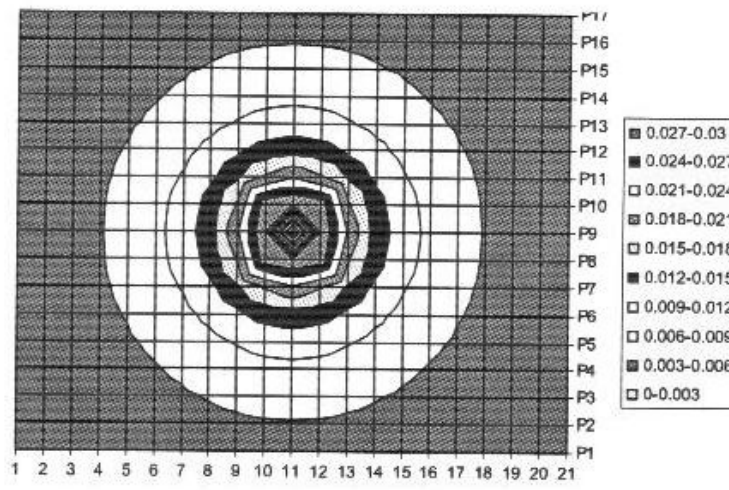


Рис. 2. Поле распределения изменения температуры при центральном точечном нагреве.

На рис. 3 представлены поля деформаций восстановленных из интерферограмм (рис. 1).

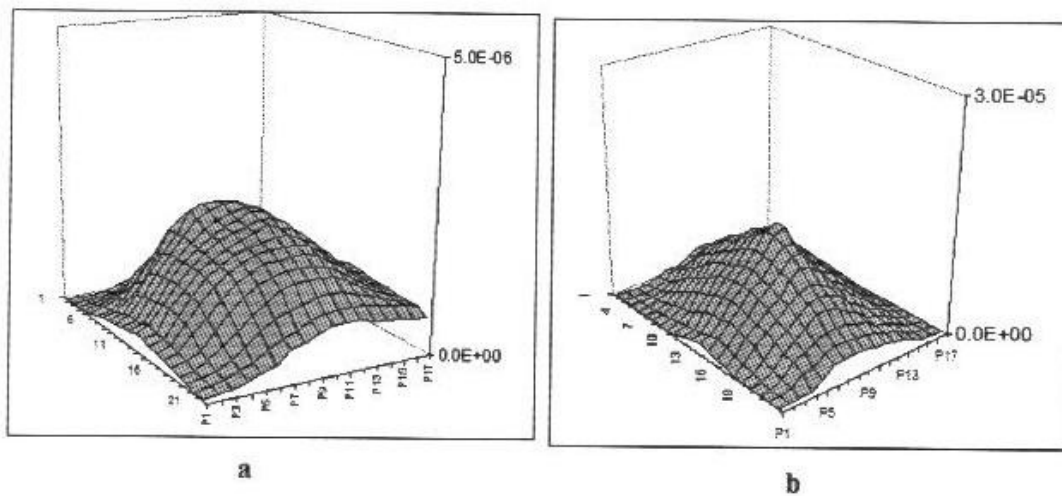


Рис. 3. Поле деформаций восстановленных из интерферограмм (рис. 5).

Для определения относительной деформации  $\varepsilon$  в плоскости образца воспользовались некоторыми геометрическими соображениями, которые вытекают из рис. 5.

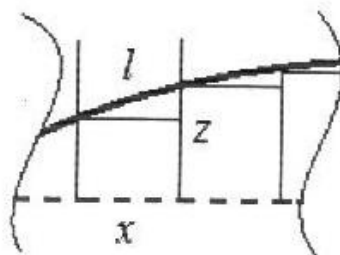


Рис. 4. Схема элемента деформированной поверхности:  $x$  – размер координатной сетки вдоль оси  $X$ ,  $l$  – длина элемента поверхности после деформации,  $z$  – деформация в направлении нормали к поверхности образца.

Из рисунка следует:

$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{x^2 + (z_i - z_{i+1})^2} - x}{x},$$

где  $i$  – номер узла координатной сетки.

Соответственно для перпендикулярного направления в плоскости образца:

$$\varepsilon_y = \frac{\sqrt{y^2 + (z_i - z_{i+1})^2} - y}{y},$$

где  $y$  – размер координатной сетки вдоль оси  $Y$ .

Относительная деформация в плоскости листа находилась из уравнения:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2},$$

Для определения распределения коэффициента линейного температурного расширения  $\alpha$  (рис. 6) воспользовались известным уравнением:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T},$$

#### Анализ исследований

Из рис. 5 видно, что коэффициент линейного температурного расширения неравномерно распределен по поверхности исследованных образцов. Его значения для цемента со стальным цилиндром меняются от  $1 \times 10^{-8} \text{K}^{-1}$  до  $6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , для эпоксидной смолы с керамзитом от  $5 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$  до  $3 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ , для фибробетона от  $3 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$  до  $3 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ . В образце из эпоксидной смолы величина  $\alpha$  распределена более неоднородно, чем в цементном со стальным кольцом в центре. Это можно объяснить тем, что значения  $\alpha$  керамзита и  $\alpha$  эпоксидной смолы существенно отличаются друг от друга [6], что естественно приводит к неоднородной деформации даже при незначительном нагреве. И напротив значения  $\alpha$  цемента и  $\alpha$  стали близки между собой [6] и поэтому заметного изменения относительной деформации на границе сталь-цемент при нагреве не происходит. Также следует отметить, что на всех образцах  $\alpha$  принимает максимальные значения вдоль границ образцов.

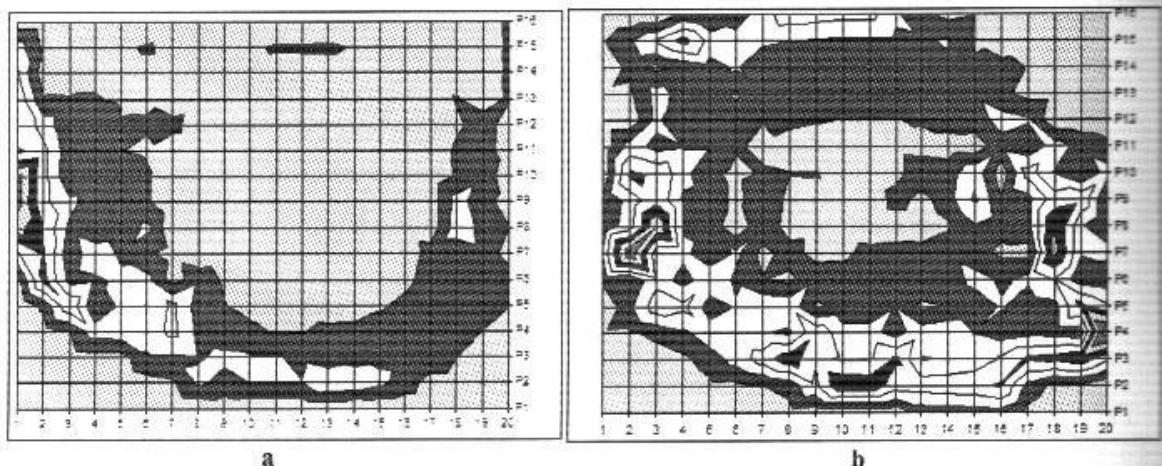


Рис. 5. Распределение коэффициента линейного температурного расширения: а) цементного образца со стальным кольцом; б) эпоксидного образца с керамзитом

В работе [4] приводится уравнение связи коэффициента линейного температурного расширения с внутренними напряжениями:

$$\sigma = \frac{\alpha_0 - 1}{K} \alpha, \quad (6)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент линейного температурного расширения для ненапряженного образца,  $K$  – коэффициент, зависящий от природы вещества (имеет размерность сжимаемости  $\text{Па}^{-1}$ ).

Определение величины  $K$  предполагает проведение дополнительных исследований, выходящих за рамки нашей работы. Поэтому нами рассчитывалось распределение поля напряжений относительно напряжения в центре образцов (рис. 6). При этом использовались значения  $\alpha_0 = 4,83 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$  и  $6,36 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  для цементного камня и эпоксидного клея, соответственно.

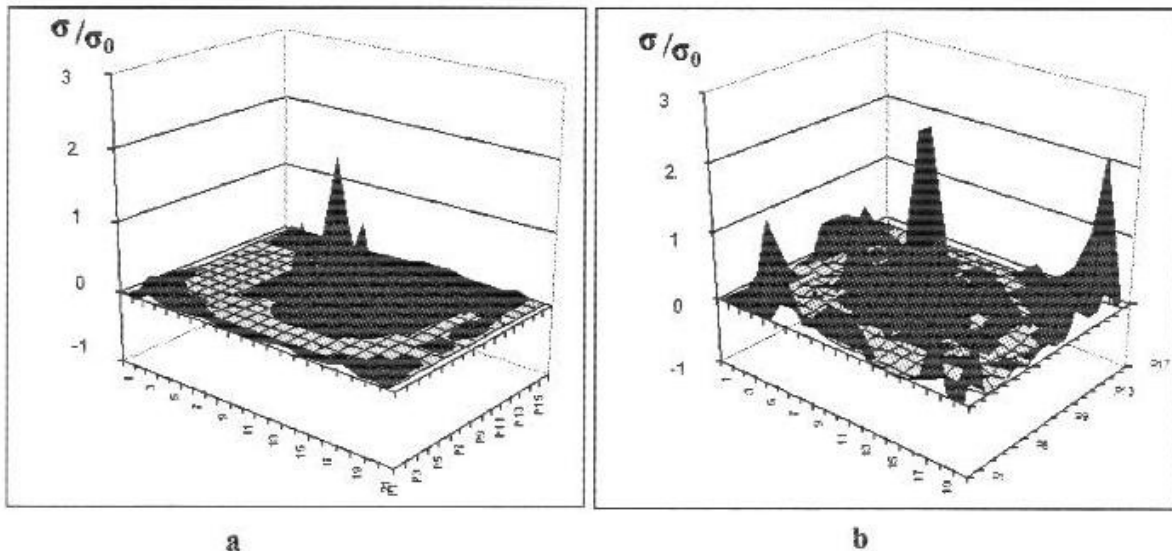


Рис. 6. Распределение поля относительных напряжений: а) цементного образца со стальным кольцом; б) эпоксидного образца с керамзитом.

В цементном образце со стальным кольцом внутренние напряжения концентрируются преимущественно в центре, а в эпоксидном образце с керамзитом – наблюдается неравномерное распределение напряжений с локальными участками повышенных значений. В фибробетоне напряжения экспоненциально убывают от центра к краям.

Приведенные методики исследования КСМ позволяют изучать качественную и количественную картину формирования теплового потока в зависимости от макронеоднородности материалов на уровне структурной неоднородности типа матрица-заполнитель.

## Выводы

Комплексное использование методов фотоупругости и спеклинтерферометрии может быть использовано для определения распределения напряжений и деформаций как в светопрозрачных моделях бетона, так и в образцах непрозрачных строительных материалах.

Проведенные исследования показали, что картина формирования теплового потока зависит от:

- состояния ПР между матричным материалом и наполнителем;
- количества технологических трещин в матричном материале;
- локального изменения плотности матричного материала и наполнителя, связанного с остаточным деформативно-напряженным состоянием затвердевшей композиции;
- индивидуальных значений коэффициентов теплопроводности составляющих гетерогенный материал.

Для перехода к абсолютным величинам необходимо выполнить дополнительные исследования.

### 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-деформированного 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 // Журнал технической физики, 79 (2009) №4, с.90-97.
- [5] Най Дж. Физические свойства кристаллов: Пер. с англ. – М.: Мир. -1967. – 385 с.
- [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-деформированного состояния композиционных строительных материалов методом спекл-интерферометрии // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, № 47, 2012, с 139 – 147.

## FEATURES OF STRUCTURE FORMATION IN COMPOSITE BUILDING MATERIALS

### Summary

The speckle-interferometry method can be used to study coefficient of linear thermal expansion, as well as the distribution stresses and strains in samples of opaque building materials.