

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Жуковский В.К.¹, Гохман А.Р.¹,
Заволока Ю.М.², Выровой В.Н.²

¹ Южноукраинский национальный педагогический университет
им. К. Д. Ушинского, Одесса,

² Одесская государственная академия строительства и
архитектуры, Одесса

В работах [1, 2] обсуждалась возможность использования методов спекл-интерферометрии для исследования напряженного состояния гетерогенных структур. Было показано, что эти методы в отличие от метода фотоупругости позволяют исследовать непрозрачные объекты, что дает возможность исследования структур из реальных строительных материалов, а не их прозрачных моделей.

В данной работе представлено развитие метода [3], где предлагается метод определения поля деформаций с последующим расчетом распределения остаточных напряжений в металлических изделиях, на непрозрачные строительные материалы.

Для исследования были выбраны 3 образца: а) залитый цементным раствором стальной цилиндр, б) залитый эпоксидной смолой керамзит, с) фибробетон со стекловолокнами. Исследования проводились с помощью спекл-интерферометра, схема которого приведена на рис. 1.

В данной работе, как и в [3], в качестве тестирующего возмущения использовался центральный точечный нагрев. Для определения распределения температуры T по поверхности образцов использовалось уравнение для изотропного материала и стационарного процесса [4]:

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

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.

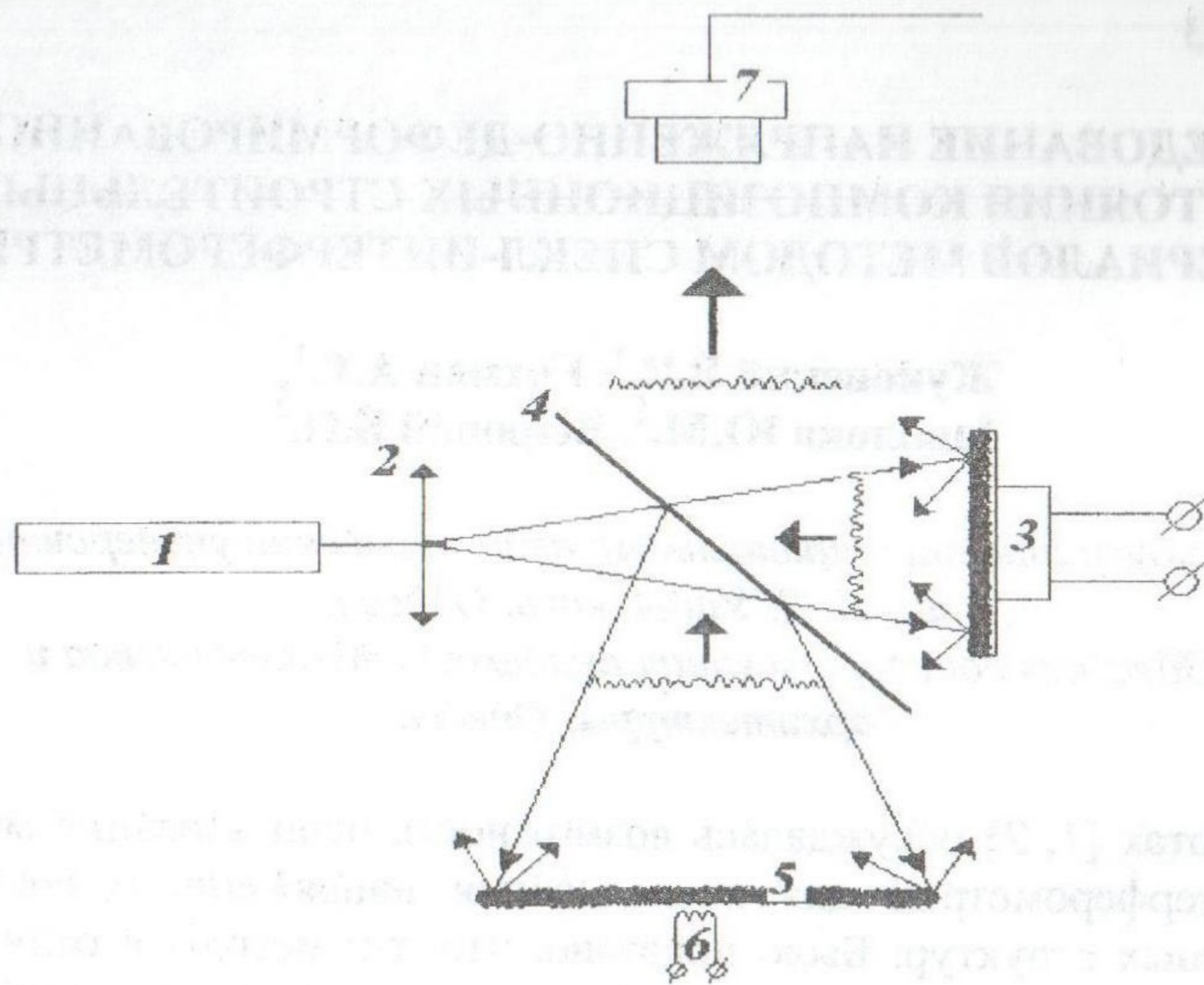


Рис. 1. Схема спекл-интерферометра. 1 – полупроводниковый лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – диффузный рассеиватель, закрепленный на пьезокерамике, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – образец, 6 – точечный нагреватель (вольфрамовая спираль размером $\approx 5 \times 5$ мм), 7 – телекамера

На рис. 2 представлены интерференционные картины полученные методом спекл-интерферометрии, а на рис. 3 – распределение изменения температуры при центральном точечном нагреве.

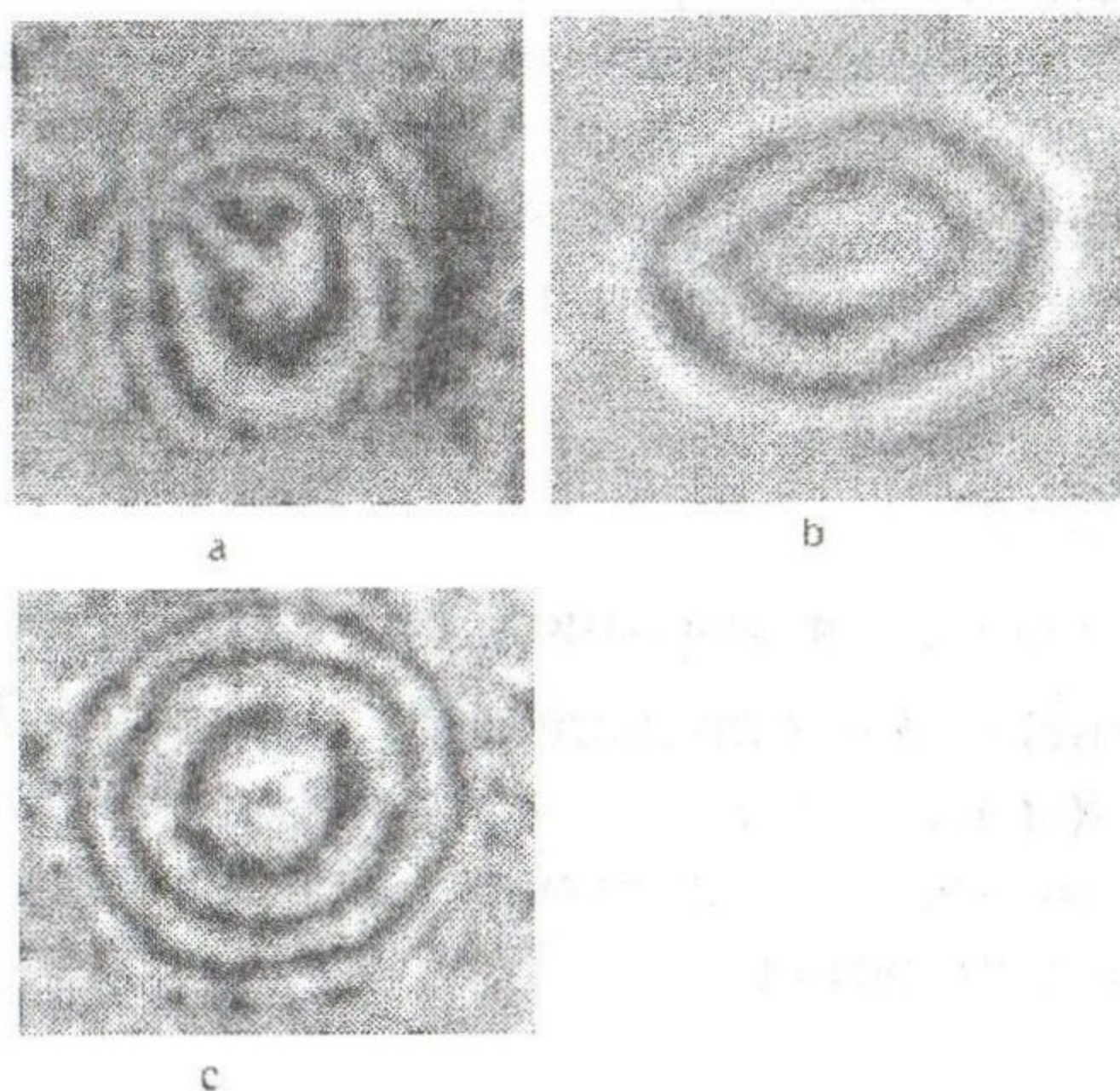


Рис. 2 Интерферограмма
 а) цементного образца со стальным цилиндром;
 б) эпоксидного образца с керамзитом, с) фибробетон со стекловолокнами

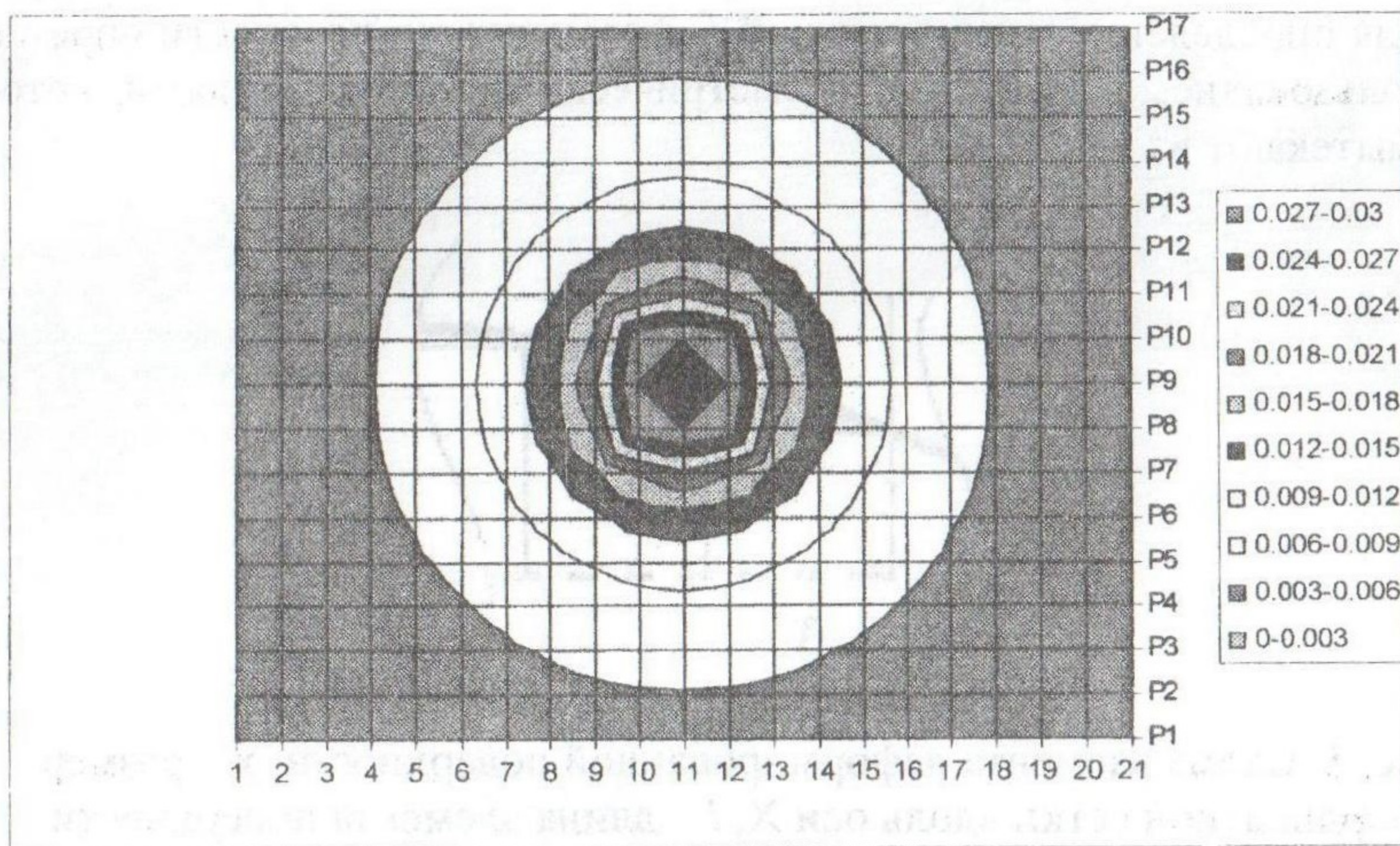


Рис. 3. Поле распределения изменения температуры при центральном точечном нагреве

На рис. 4 представлены поля деформаций восстановленных из интерферограмм (рис. 2).

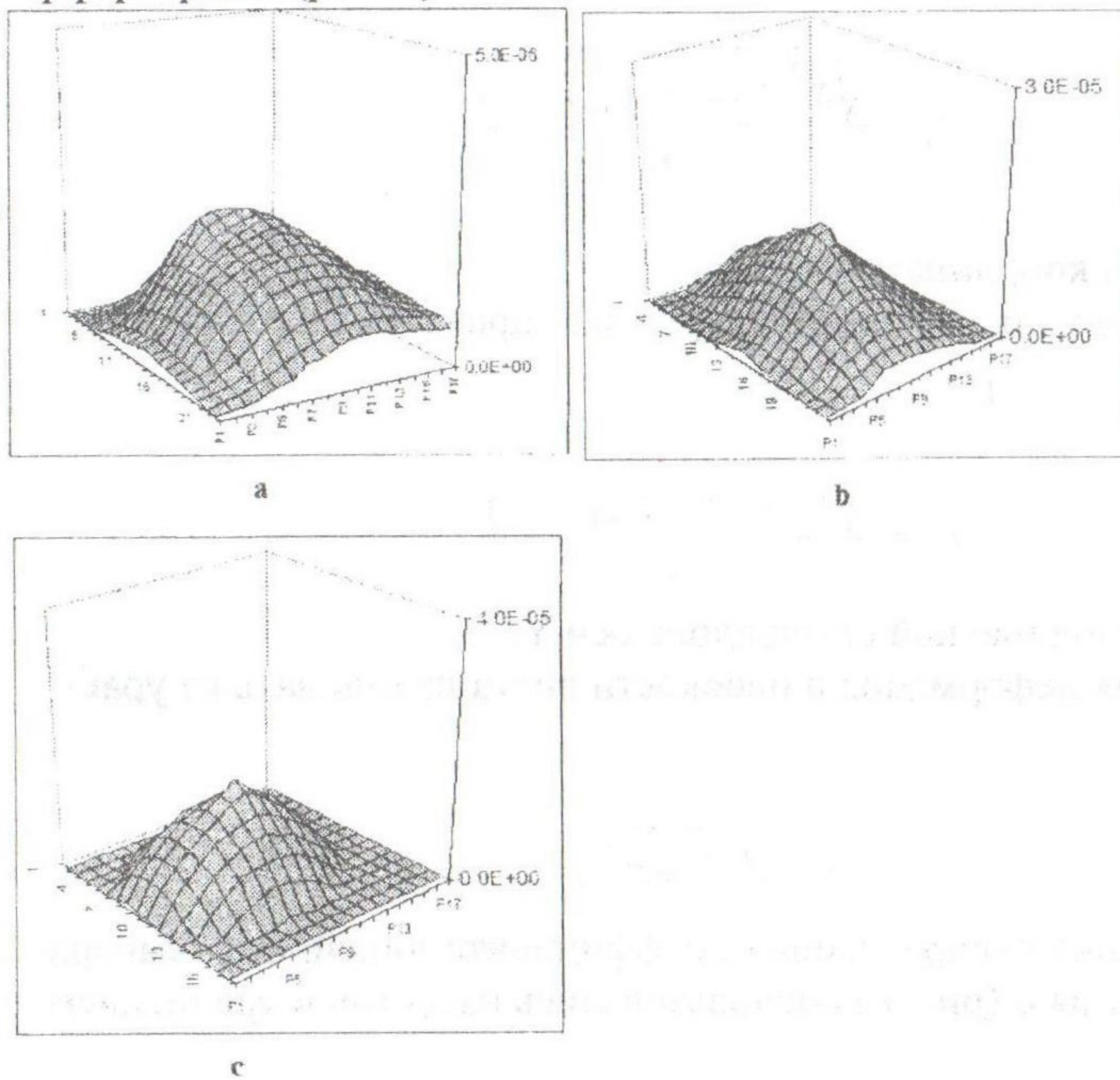


Рис. 4. Поле деформаций восстановленных из интерферограмм (рис. 2)

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

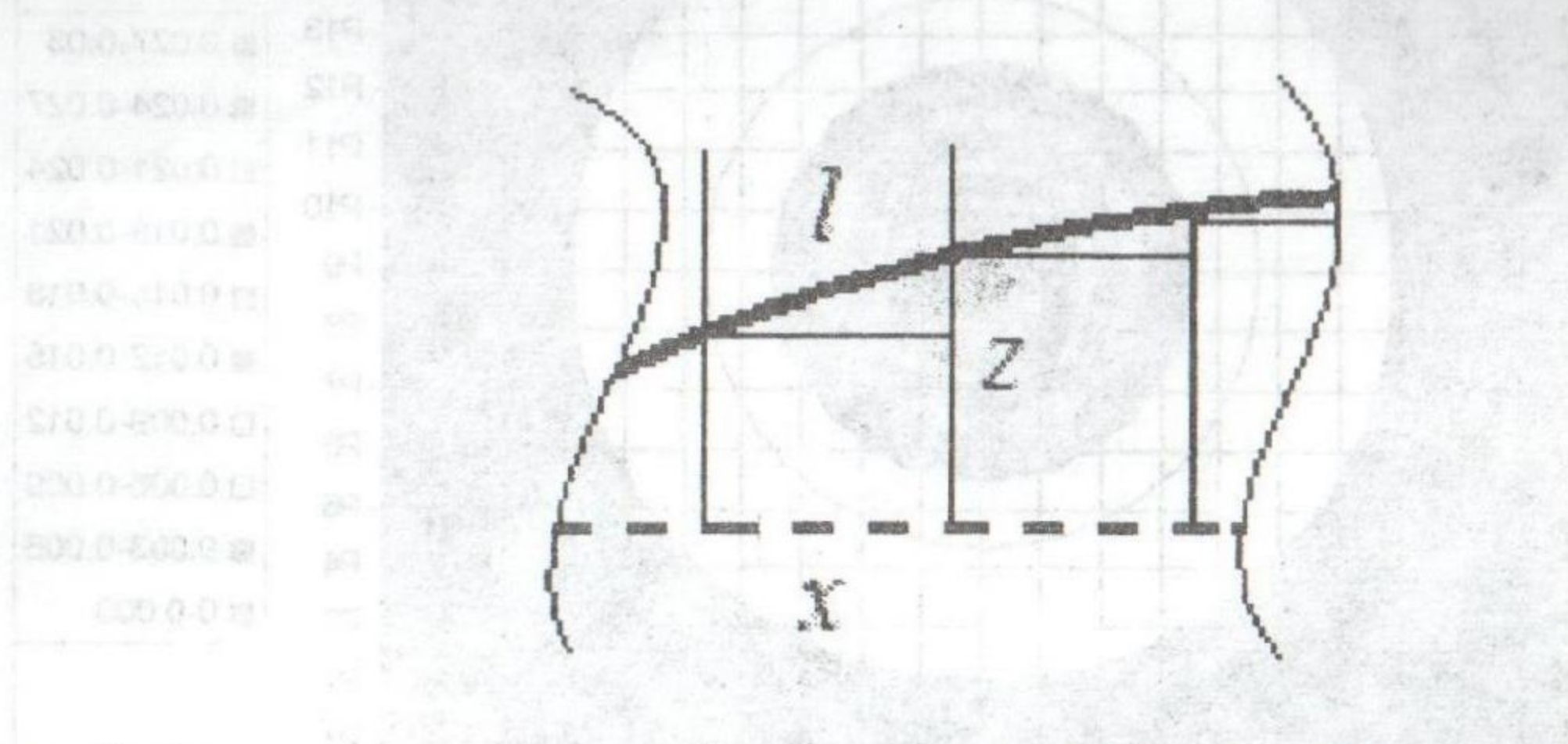


Рис. 5. Схема элемента деформированной поверхности: x – размер координатной сетки вдоль оси X , l – длина элемента поверхности после деформации, z – деформация в направлении нормали к поверхности образца

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 α (рис. 6) воспользовались известным уравнением:

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

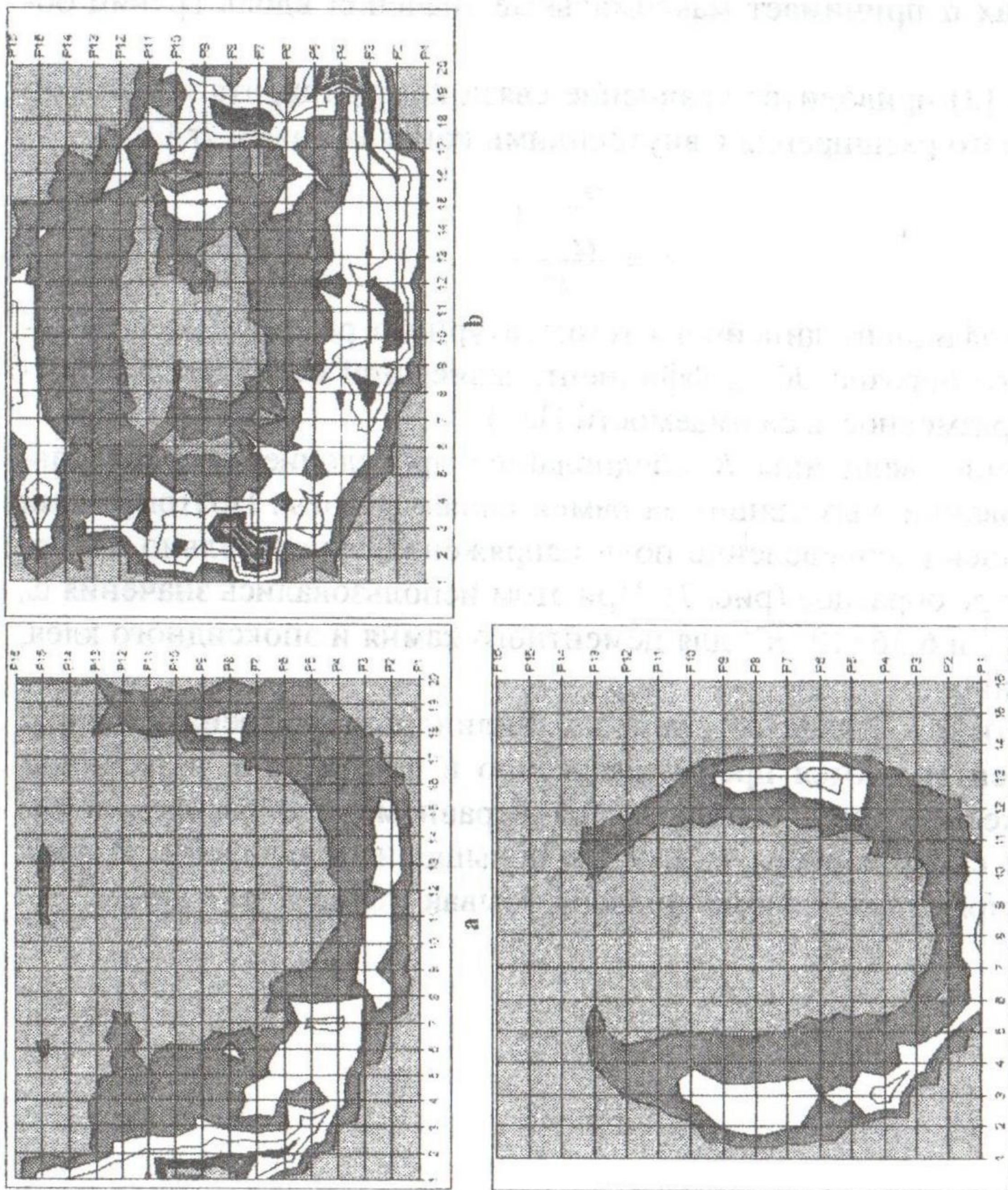


Рис. 6. Распределение коэффициента линейного температурного расширения: а) цементного образца со стальным цилиндром; б) эпоксидного образца с керамзитом, с) фибробетон со стекловолокнами.

Обсуждение результатов

Из рис. 6 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 α распределена более неоднородно, чем в цементном со стальным цилиндром в центре. Это можно объяснить тем, что значения α керамзита и α эпоксидной смолы существенно отличаются друг от друга [5], что естественно приводит к неоднородной деформации даже при незначительном нагреве. И напротив значения α цемента и α стали близки между собой [5] и поэтому заметного изменения относительной деформации на границе сталь-цемент при нагреве не происходит. Также следует отметить, что на всех образцах α принимает максимальные значения вдоль границ образцов.

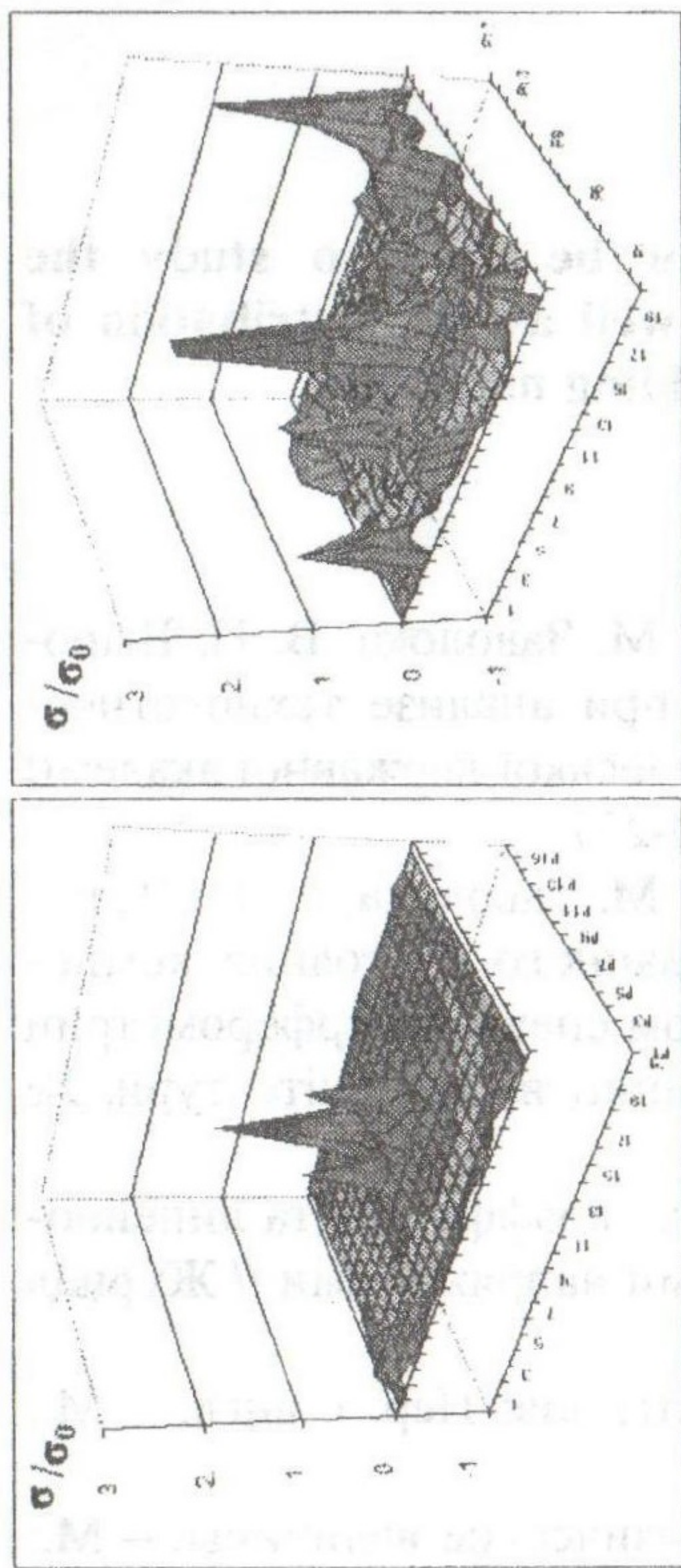
В работе [3] приводится уравнение связи коэффициента линейного температурного расширения с внутренними напряжениями σ [3]:

$$\sigma = \frac{\alpha_0 - \alpha}{K},$$

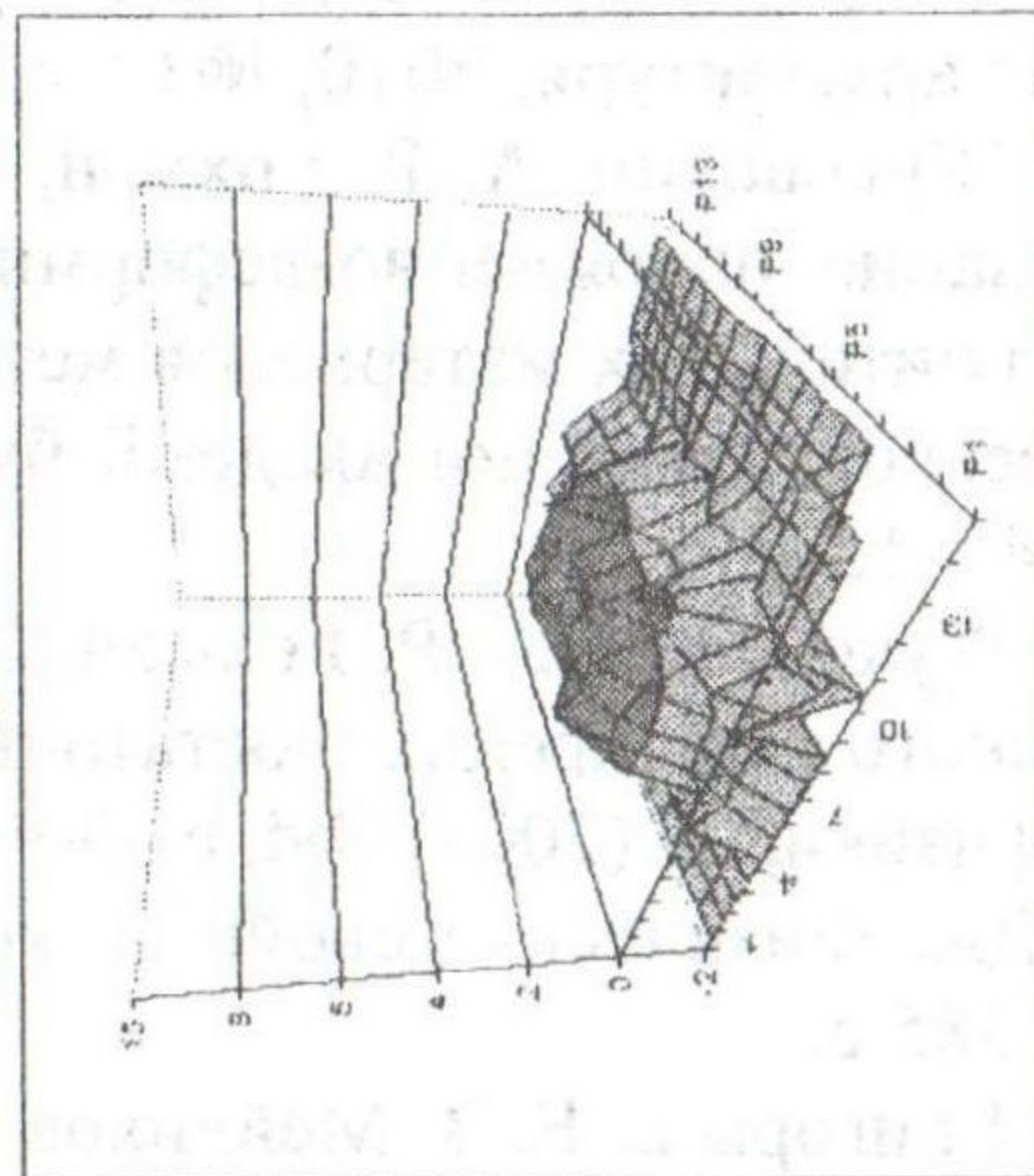
где α_0 — коэффициент линейного температурного расширения для ненапряженного образца, K — коэффициент, зависящий от природы вещества (имеет размерность сжимаемости Па^{-1}).

Определение величины K предполагает проведение дополнительных исследований, выходящих за рамки нашей работы. Поэтому нами рассчитывалось распределение поля напряжений относительно напряжения в центре образцов (рис. 7). 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.

В цементном образце со стальным цилиндром 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.



б



с

Рис. 7. Распределение поля относительных напряжений: а) цементного образца со стальным цилиндром; б) эпоксидного образца с керамзитом, с) фибробетон со стекловолокнами

Выводы

В отличие от метода фотоупругости метод спекл-интерферометрии [3] может быть использован для исследования коэффициента линейного температурного расширения, а также распределения напряжений и деформаций в образцах непрозрачных строительных материалов. Для перехода к абсолютным величинам необходимы дополнительные исследования по определению коэффициента K , который имеет размерность коэффициента сжимаемости.

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.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. В. К. Жуковский, А. Р. Гохман. Связь коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями // Журнал технической физики, 79 (2009) №4, с.90-97.
4. Най Дж. Физические свойства кристаллов: Пер. с англ. – М.: Мир. -1967. – 385 с.
5. И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. Физические величины. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232с.