**КОНЦЕНТРАТОРЫ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ С КРУГЛЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Куанышев В.Т.1, Сачков И.Н.2, Алтарев В.А.2, Коробов И.С.2

*1Уральский технический институт связи и информатики, г. Екатеринбург, 620109, ул. Репина, 15. E-mail: kuan06@mail.ru*

*2Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*

К числу важнейших теплофизических характеристик конструкционных материалов можно отнести термическую прочность. В случае однородных систем она определяется прочностными характеристиками материала. Однако для неоднородных, в частности, многофазных, необходимо учитывать характер микроструктуры.

Рассмотрим слоистые структур, изображенные на рис.1, ┴. При распространении теплового потока перпендикулярно слоям возникает существенная неоднородность распределения градиента температуры g = |grad T|. При этом отношение значений градиентов, фиксируемых в компонентах, (g1/g2)┴ = σ2/σ1, определяется соотношением величин теплопроводности σk материалов слоев.

В ситуации же, когда поток ориентирован параллельно слоям (рис.1, ║), градиент температуры одинаков по всему микрообъему, то есть (g1/g2)║ = 1. Можно ожидать, что обсуждаемые значения отношений градиентов образуют своеобразную вилку для произвольных регулярных матричных двухфазных структур. Для слоистых двухфазных систем спектр значений градиентов температуры, реализующихся в образце, имеет вид дельт-образных функций. Ранее было показано [1, 2], что в случае матричных двухфазных регулярных структур подобные спектры характеризуются сложной формой.

 Цель настоящей работы – оценить закономерности формирования пространственных распределений термических напряжений в матричных системах круглых включений, характеризующихся различным взаимным расположением. Схемы соответствующих структур представлены на рис.1. Структуры слева и справа – дуальны друг другу, то есть получаются перестановкой материалов фаз и включений и поворотом на 90o. Стрелка – направление потока. Рассматриваем стационарные процессы теплопроводности. Считаем, что упругие модули включения и матрицы мало отличаются друг от друга. В подобных условиях локальные значения величин термических напряжений пропорциональны величине градиента температуры в данной точке.

 Для расчета распределения температуры в рассматриваемых пространственно неоднородных системах применялся метод конечных элементов, использовавшийся в работах [1, 2]. Использовались программы, составленные авторами на языке Фортран. В расчетах рассматривается двумерный плоский процесс распространения тепла в прямоугольной элементарной ячейке, содержащей четверти включений [1]. На границах прямоугольной расчетной области принимаем изотермические и адиабатические граничные условия.

**H**

**Ld**

**L**

**Td**

**Hd**

**T**

**C**

**Cd**

║

┴

Рис.1. Схемы структур, темным цветом выделены фазы

с большей проводимостью

В результате расчетов были установлены значения относительного градиента температуры γ = g/go, где go – значение градиента, фиксируемое в однородной системе. Рассмотрены системы, схемы которых представлены на рис.1, при варьируемых значениях концентрации включений и соотношениях проводимостей матрицы и включения σ2/σ1.

Для рассматриваемых систем обнаружена существенная неоднородность распределения γ(x, y). В различных точках материала реализовывались области с пониженным γ < 1 и повышенным γ > 1, в сравнении с однородным случаем, значениями термических напряжений. Анализ результатов расчетов показал, что картина распределения термических напряжений существенно зависит от типа структуры и различается для взаимно-дуальных структур. Наблюдаются различные точки локализации напряжений их величины. На рис.2 представлены типичные картины пространственных распределений γ(x, y) систем С и Cd. Линии около включений ограничивают области, отличающиеся значениями γ в два раза.

Анализ результатов расчетов показал, что для системы С («проводящие включения») линии теплового потока стягиваются в проводящие частицы, при этом термические напряжения концентрируются в промежутке между частицами и направлены «параллельно» общему направлению распространения потока (рис.2). Для дуальной системы Cd линии тока располагаются предпочтительно в проводящей матрице, огибая включения, а термические напряжения максимальны в поперечном направлении. В случае проводящих включений, система С, максимальные значения градиента γmax достигали нескольких десятков величины (при σ2 / σ1 = 100). В то же время для системы Cd эти значения составляли несколько единиц.

Рис. 2. Конфигурации областей концентрации термических напряжений в системе С, темный цвет – высокопроводящая фаза

 В случае шахматного порядка частиц H напряжения сосредоточены в промежутках между включениями, а в Hd – расположены внутри слабопроводящих частиц.

Для анизотропной системы L характерно усиление эффектов концентрации, в сравнении с изотропной конфигурацией С. В случае же дуальной ей структуры Ld – имеет место обратное явление, эффект концентрации ослабевает. Анизотропные же системы T и Td демонстрируют противоположные явления ослабления и усиления.

Для обсуждаемых систем характерно также значительное различие величин градиентов температуры. Систематизация результатов расчетов позволяет предложить следующую иерархию величин напряжений:

L>C>H>Td>Cd>Hd>T>Ld.

Величина градиента увеличивается при росте концентрации частиц, достигая максимума, когда включения начинают касаться друг друга.

Исследование закономерностей формирования термических напряжений в неоднородных материалах требует дальнейшей работы. Систематизируя полученные к настоящему времени данные, можно прийти к следующим выводам.

1) В обсуждаемых ситуациях величины термических напряжений зависят от соотношения проводимостей фаз, их концентраций и геометрических факторов микроструктуры. Значения концентрации могут достигать десятков величин.

2) При возникновении стационарных термических напряжений наиболее опасна ситуация, когда слабопроводящая фаза образует матрицу, а высокопроводящая компонента сосредоточена во включениях.

3) При анализе термопрочности необходимо учитывать особенности комплексов включений, поскольку они могут существенно взаимно усиливать свое влиянии.

4) Эффекты влияния геометрии могут иметь существенное значение для прогнозирования механизмов формирования трещин и сценариев термического разрушения двухфазного материала.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Сачков И.Н. *Журнал технической физики.* **66(12)** (1996) 48.

2. Куанышев В.Т., Сачков И.Н. *Наука и технологии. Секция 1: Неоднородные материалы и конструкции. Краткие сообщения XXVIII Российской школы по проблемам науки и технологий.* Миасс (2008) 100.