



УДК 539.422.53

**А.В. Заболотский, М.Ю. Турчин,
А.О. Мигашкин, В.Т. Хадыев**
ООО Группа "Магнезит"
г. Сатка, Россия.
E-mail: azabolotskiy@magnezit.com
Дата поступления 27.05.2019

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЕФЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТОГО ОГНЕУПОРА СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Проведен расчет коэффициентов интенсивности напряжений для объемной системы дефектов с применением численных методов. Работа выполнена с целью получения значений вязкости разрушения дефектного массивного тела и дальнейшего использования результатов при моделировании роста усталостных трещин в конструкционных материалах, в частности, в огнеупорах сталеплавильного производства. В результате работы установлены практически значимые свойства зависимости вязкости разрушения (коэффициента интенсивности напряжений) от взаимного расположения дефектов материала и выявлена невозможность применения справочных значений этого параметра, определенных ранее для плоских периодических групп дефектов (микротрещин или пор).

Ключевые слова: моделирование, интенсивность напряжений, усталостные трещины, огнеупоры.

Введение

Конструкционные материалы часто представляют собой гетерогенные системы, состоящие из нескольких фаз, в том числе находящихся в различном агрегатном состоянии. Например, широко распространенные керамические материалы, представляют собой системы нескольких твердых (как правило неорганических) фаз, между которыми распределены пустоты разнообразной геометрической формы и размера, заполненные воздухом (микротрещины и поры).

В частности, такие материалы применяются в качестве футеровки тепловых агрегатов, вследствие способности сохранять служебные характеристики вплоть до высоких температур. Одним из важных практических применений керамических материалов является металлургия, при этом керамические футеровки металлургических агрегатов принято называть огнеупорными. Следует отметить, что металлургические процессы вследствие своей цикличности

сопровождаются резкой сменой температуры рабочего слоя футеровки, называемой "термическим ударом" или "термоударом".

Стойкость огнеупорных материалов в условиях термоудара различна и может составлять от 1 до 100 с небольшим циклов или "теплосмен" до разрушения. В первом случае, как правило, имеет место катастрофическое прохождение сквозной трещины сквозь хрупкое тело, а в последнем - разрушение, вследствие малоциклового усталости. Более того, разрушение конструкции при первой же теплосмене, как правило, свидетельствует о неправильном выборе материала, либо о грубом нарушении правил эксплуатации оборудования, напротив, малоцикловое усталостное разрушение футеровок наряду с абразивным и химическим износом считается допустимым.

Численное моделирование усталостного разрушения огнеупора удобно представить, как постепенное продвижение трещины между соседними дефектами (порами) материала при достижении механическими, в том числе термомеханическими напряжениями некоторого порогового значения. При этом, вследствие образования

новых поверхностей при росте трещины, а также тепловых и акустических эффектов происходит разгрузка напряженного состояния материала. При последующем возрастании напряжений под действием внешних нагрузок цикл "рост напряжений - разгрузка" повторяется [1].

Движение трещины может начаться в двух случаях: при достижении напряжением в массивном (бездефектном) материале предела прочности или при достижении напряжением в окрестности микротрещины уровня, достаточного для образования новой поверхности [2]. В последнем случае для расчета необходимо использовать такой параметр материала как критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый экспериментально путем разрушающего испытания. Фактическое текущее значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) определяется расчетным путем и зависит от формы и размеров дефектов материала и их расположения относительно действующей нагрузки. Подробно методика вычисления этого параметра изложена в [3]. В этой работе приведены таблицы для расчета КИН для дефектов разнообразной формы, данные для которых получены как аналитическим, так и численным решением. К сожалению, случаев близких к типичной пространственной поровой структуре керамических материалов в [3] не рассмотрено, в связи с чем для моделирования разрушения керамического материала был проведен численный расчет КИН для интересующего случая взаимного пространственного расположения мелких дефектов нагруженного материала (пор). Рассмотрено влияние механических свойств материала, формы и размера дефектов, а также расстояния между ними.

Ранее было опубликовано значительное количество работ, посвященных моделированию возникновения и роста усталостных трещин в том числе и в хрупких материалах. Эти работы рассматривают процесс разрушения тел как с специально заложенным дефектом [4, 5], так и тел, дефекты в которых обусловлены структурой самого материала тела [6,7]. Рассматриваются стадии разрушения материала [8, 9] и структуры возникающие при разрушении,

характеризующие описанную стадийность процесса [10 - 12]. Автор [13] рассматривает напряженное состояние материала, в котором существует периодическая система дефектов (микротрещин), то есть задача того же класса, что рассмотрена в настоящей работе.

Модель и метод расчета

Для вычисления КИН использовали модель поровой структуры, в которой поры находились в узлах кубической решетки. Форма пор была от сферической до вытянутой до соотношения осей 8 к 1, в случае вытянутой формы длинные стороны были параллельны друг другу. Четверть полученной расчетной ячейки (вытянутые поры) приведена на рис. 1. Согласно результатов исследований с применением электронного микроскопа выбранная модель близка по своему строению к фактически наблюдаемым структурам распространенных периклазоуглеродистых огнеупоров.

Расчеты проводили при помощи ПО ANSYS Mechanical R15. Напряжение создавалось путем прикладывания растягивающей нагрузки (силы) как параллельно, так и перпендикулярно большей из осей эллипсоидов, таким образом, чтобы напряжение в на достаточно большом удалении от пор составляло 1МПа. Далее КИН вычисляли, используя выражение:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r} , \quad (1)$$

где σ_y - фактическое напряжение, r - расстояние от точки роста трещины или дефекта (вершины) до соседней трещины. С другой стороны, согласно [3]:

$$K_I = F \sigma_n \sqrt{\pi a} , \quad (2)$$

где σ_n - напряжение в отдаленной окрестности трещины (в нашем случае 1 МПа), a - характерный размер трещины, F - функция, зависящая от формы, размера и взаимного расположения дефектов.

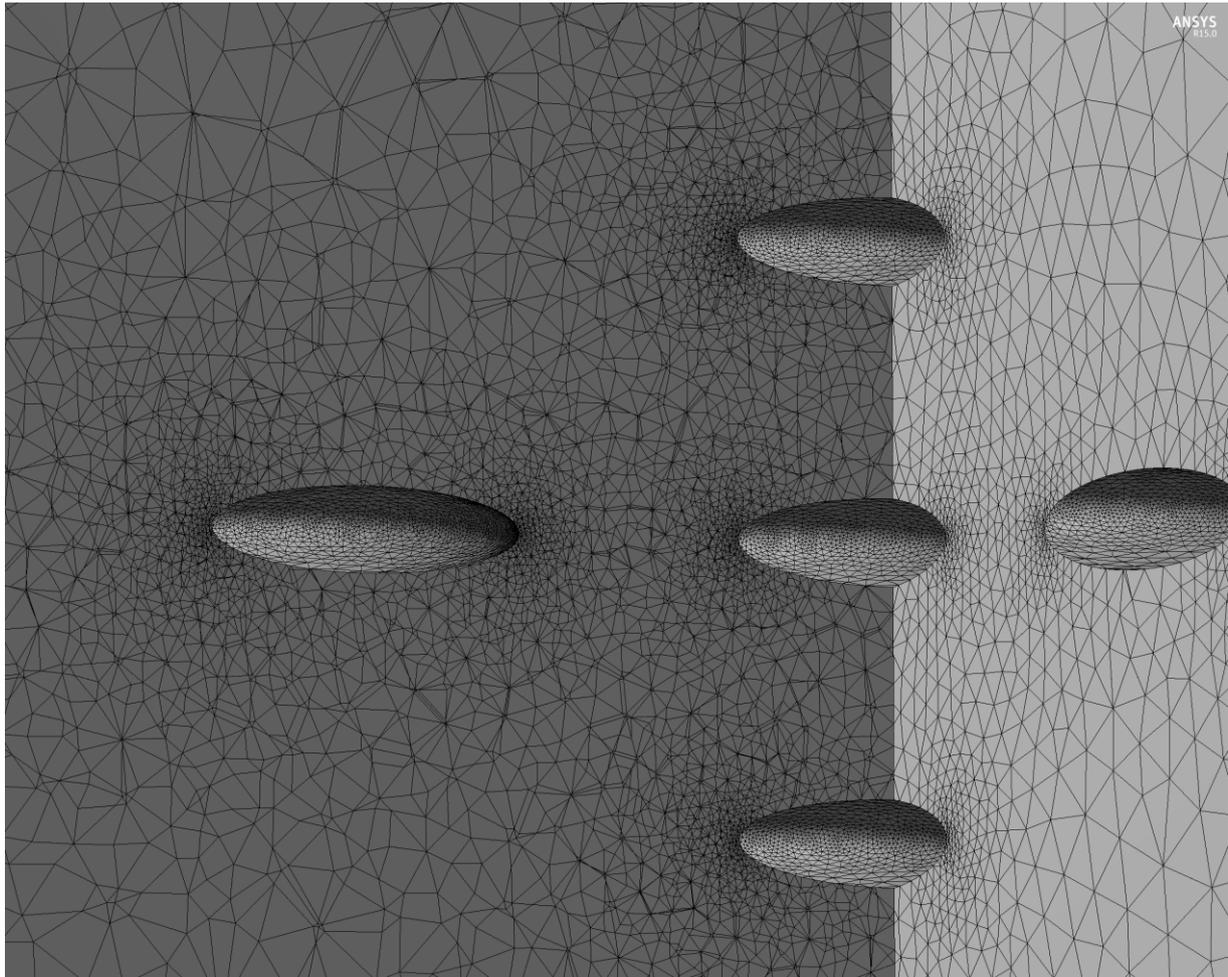


Рисунок 1. Пример ячейки для расчетов

Картина напряжений вокруг одиночной поры приведена на рис. 2, растягивающие усилия приложены вдоль оси X.

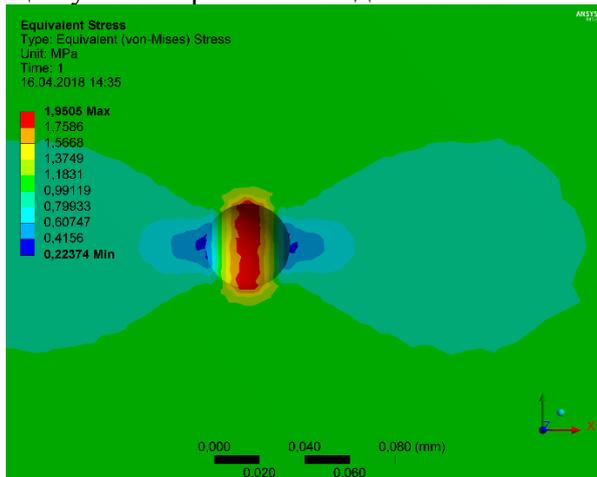


Рисунок 2. Эпюра напряжений вокруг одиночной поры при растяжении вдоль оси X

Соответственно, на оси поры, параллельной действующей силе, происходит "разгрузка" - напряжения в окрестности

поры существенно ниже, чем в окружающем материале. В перпендикулярной плоскости происходит концентрация напряжений и, в приведенных условиях (сферическая пора диаметром 40 мкм), фактические напряжения на поверхности оказываются вдвое выше, чем в объеме материала. Аналогичная картина имеет место и для системы пор, так, на рис. 3 приведена эпюра напряжений для системы эллиптических пор, где видно, что зоны разгрузки и концентрации напряжений, перекрываясь создают результирующую картину. Разность в величине максимальных напряжений объясняется в том числе зависимостью этой величины от кривизны поверхности концентратора напряжений (в приведенном случае для эллипсоидов кривизна поверхности больше).

В рамках численного эксперимента варьировали следующие параметры: диаметры эллипсоидов (сферические поры в

данном случае рассматривались как частный случай равных диаметров), расстояние между дефектами, взаимное расположение которых приведено на рисунке 1, направление растягивающего напряжения для эллипсоидов (параллельно большому или меньшему из его диаметров). Анализировали максимальные напряжения, возникающие в окрестности пор, то есть напряжения на поверхности поры, в плоскости, перпендикулярной растягивающей нагрузке. В качестве материала матрицы использовали материал из библиотеки материалов ANSYS R15.

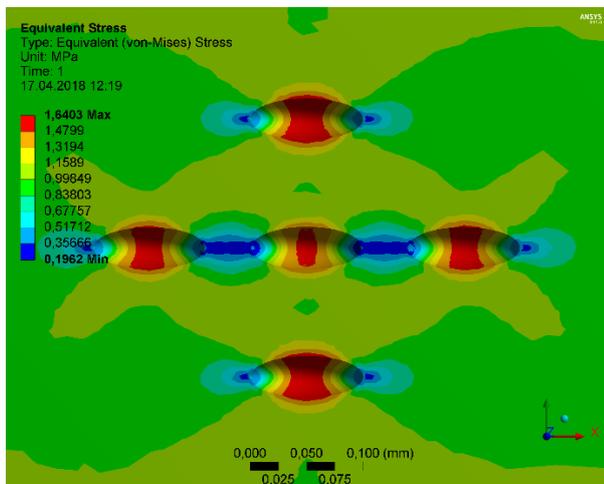


Рисунок 3. Картина напряжений вокруг системы эллиптических пор

Результаты и обсуждение

При нагружении системы сферических пор растягивающим напряжением были получены величины максимальных эффективных напряжений на поверхности дефектов в зависимости от диаметра пор и расстояния между ними, график которых приведен на рисунке 4 слева (в логарифмическом формате).

При расстоянии между порами, соизмеримом или превышающем их диаметры, их взаимное влияние на максимальные напряжения ослабевают (при этом отношение напряжения на поверхности дефекта к напряжению в его удаленной окрестности определяется только его формой и не зависит от размера). Если расстояние между порами соизмеримо или меньше (до 100 раз) его диаметра то максимальные напряжения возрастают с ростом диаметра поры, од-

нако, определяющим в данном случае является соотношение "диаметр поры - расстояние", поскольку при использовании этой величины все экспериментальные точки ложатся на одну линию в указанной области (рисунок 4). При дальнейшем сближении пор величина максимального напряжения перестает нарастать, однако экспериментальные результаты демонстрируют довольно широкий разброс, связанный, вероятно с ограничениями на применимость модели.

Полученные результаты были использованы для расчета функции F (выражение 2) и K_I . Результаты расчета приведены на рисунке 5.

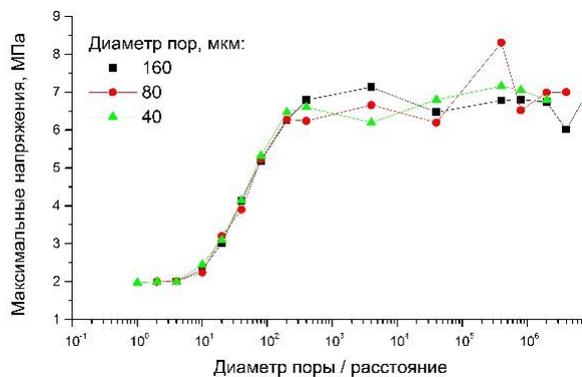


Рисунок 4. Максимальные напряжения на сферических порах в поле растягивающей нагрузки 1 МПа в зависимости от диаметра поры и расстояния между ними

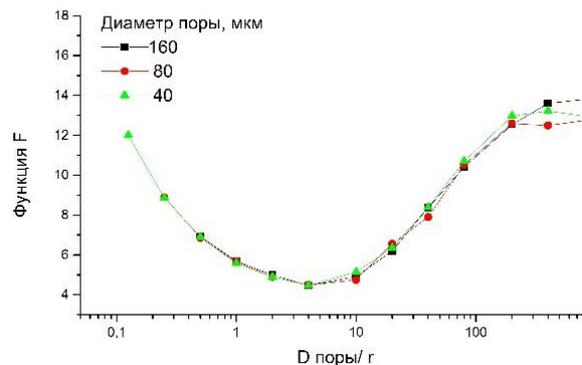


Рисунок 5. Зависимость функции F и K_I от размера сферических пор и расстояния между ними. K_I рассчитан для растягивающего напряжения 1 МПа

Из полученных результатов очевидно, что определяющим для F является отношение диаметра пор к расстоянию между ними. Практически во всем диапазоне соотношения экспериментальные данные ложатся на одну линию (рисунок 5). Зависимость проходит через минимум при соотношении диаметр поры к расстоянию между ними равном 6 ± 2 . При сближении и удалении пор друг от друга функция F возрастает до 3 раз относительно своего минимального значения. При расстоянии между порами меньшем $1/100$ диаметра функция F и выходит на постоянные значения.

При значительном удалении пор друг от друга функция F продолжает монотонно возрастать, однако, вероятно при расстояниях между порами, значительно превышающем их собственный размер, следует пользоваться методиками расчета K_I , приводимыми [3] для одиночных дефектов в плоских пластинах или бесконечных телах. В частности, Сахибгиреев в своей диссертации [15] приводит данные о том, что влияние включения на картину механических напряжений вокруг него полностью нивелируется на расстоянии равном 3 или более характерных размеров самого дефекта. Аналогичные данные приведены в [14]. Вероятно, что при росте расстояния между дефектами будет возрастать и K_{Ic} - критиче-

ский коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения) самого материала.

Мураками (Y. Murakami) [3] рассматривает двоякопериодическую систему трещин равной длины, расположенных в одной плоскости в поле перпендикулярной растягивающей нагрузки и приводит значение функции F . Это наиболее близкий случай к рассмотренному нами. Важно, что характер функции F , приведенный в справочнике совпадает с установленным нами путем численного моделирования.

Аналогичная картина наблюдается и при растяжении тела с эллиптическими порами, в случае если растягивающее напряжение действует параллельно большей оси дефекта. При этом уровень максимальных напряжений и, как следствие, функции F и K_I оказывается ориентировочно на 20 - 40 % выше, чем для сферических пор.

При растяжении тела с эллиптическими порами перпендикулярно большей оси расчетные значения напряжений многократно возрастают по сравнению с рассмотренными ранее вариантами (рис. 6, слева). Очевидно, что при увеличении кривизны поверхности дефекта (отношения осей) максимальные напряжения существенно возрастают, линейно при значительном расстоянии между дефектами и согласно степенной зависимости при их сближении.

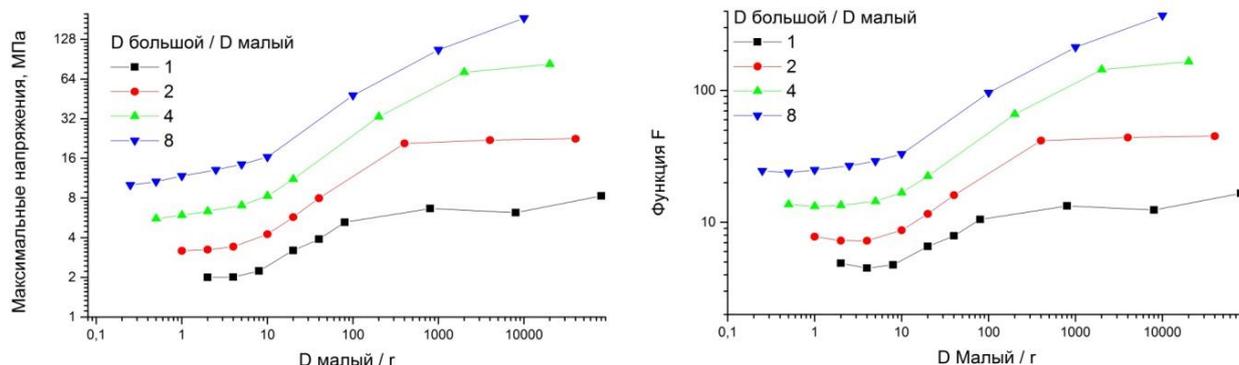


Рисунок 6. Максимальные напряжения и функция F при растяжении системы эллиптических пор перпендикулярно большой оси усилием 1 МПа.

Вид зависимости функции F от кривизны поры и относительного расстояния между ними аналогичен виду рассмотренной выше зависимости максимальных

напряжений (рис. 6, справа). Уровень значений функции F в случае растяжения перпендикулярно большой оси эллиптической поры превышает значения этой функции

для случая растяжения сферических пор или эллиптических параллельно большой оси приблизительно на один порядок.

На рис. 7 приведены графики зависимости K_I для случаев растяжения эллиптических пор усилием 1 МПа в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В случае удаленных друг от друга дефектов (расстояние более чем 1/10 малого диаметра) значения K_I для этих случаев отличаются друг от друга приблизительно на порядок. При сближении дефектов отличия в K_I возрастают и могут достигать уже двух порядков.

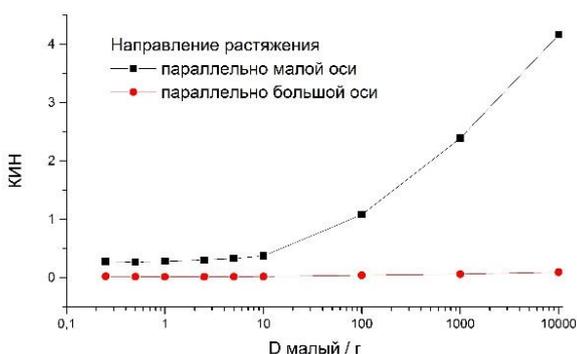


Рисунок 7. K_I при растяжении тела с системой эллиптических пор во взаимно перпендикулярных направлениях

Мураками [3] приводит для двоякопериодической системы дефектов на плоскости значения функции F для интервала от 0 до 0,8 по значению параметра $2a/d$ где $2a$ - больший диаметр поры, d - расстояние между центрами пор по направлению большего диаметра. В настоящей работе рассмотрен случай сравнительно близко расположенных дефектов, что соответствует соотношению $2a/d$ равному 0,6 и более. Полученные результаты превышают результаты Мураками в 2 раза для сферических пор и более чем в 5 раз для случая эллиптических дефектов с отношением осей равном 8. Таким образом, использование значений K_I , приведенных в справочнике для плоской модели недопустимо при моделировании роста трещин с множественными дефектами в объеме. Последняя задача требует моделирования структуры тела (взаимного расположения дефектов и их размеров) и расчета K_I для полученной структуры.

Выводы

Численными методами выполнен расчет коэффициентов интенсивности напряжений для объемной системы дефектов, моделирующей структуру пористого конструкционного материала, например, керамического. В результате построены зависимости K_I от расстояния между дефектами структуры и их собственными геометрическими характеристиками (размер, соотношение осей в случае эллиптических дефектов).

Установлено, что коэффициенты интенсивности разрушения для объемной модели значительно (до 5 раз и более) могут превышать значения вязкости разрушения для аналогичной плоской модели (среза или сечения решетки дефекта). Данный результат указывает на то, что при расчетах роста трещин в телах с объемной системой дефектов, необходимо проводить предварительное определение K_I для фактической схемы расположения дефектов.

Библиографический список

1. Zabolotsky A.V., Axelrod L.M. Application of the Cell Automata Method to the Brittle Material Thermal Fatigue Fracture Simulation. // Journal of Scientific and Engineering Research. 2017. v. 4, № 10. p. 284-292.
2. Г.П. Черепанов. Механика хрупкого разрушения. М.: «Наука», 1974.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. - М.: Мир, 1990. - 1016 с.
4. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений. // Прикладная механика и техническая физика. 2005. т. 46, № 6, С. 108 - 115.
5. Гучинский Р.В., Петин С.В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений. // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. т. 8, № 4, С. 376 - 385.

6. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Разрушение при сжатии. // Физическая мезомеханика. 2018. т. 21, № 3. С. 86 -102.
7. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Модель хрупкого разрушения пористых материалов при сжатии. // Математическое моделирование систем и процессов. 2009, № 17. С. 47 - 57.
8. Капустин С.А., Горохов В.А. Пантелеев В.Ю., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе механики поврежденной среды. // Проблемы прочности и пластичности 2009. вып. 71. С. 36 - 44.
9. Полкунов Ю.Г., Каракулина Е.О. Математическое моделирование развития неустойчивых трещин в зернистых материалах. // Вестник ОГУ. 2007, №5. С. 181 -184.
10. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры в процессах разрушения. // Изв. РАН. МТТ. 1999, № 5. С. 49 - 71.
11. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Иерархия структур при разрушении. // Докл. РАН. 1992. т. 325, № 4. С. 735 - 739.
12. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры разрушения в условиях интенсивного сжатия. // Проблемы механики деформированного твердого тела и горных пород. М.: Физматлит. 2006. С. 152 - 166.
13. Бурого Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел. // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. т. 4, № 4. С. 5 - 20.
14. Леган М.А. Хрупкое разрушение элементов конструкций с концентраторами напряжений. // Вести НГУ. Сер. матем., мех., информ. 2013. т. 13, № 3. С. 70 - 76.
15. Сахибгареев, Ринат Рашидович Управление процессами структурообразования модифицированных цементных бетонов. Дисс. на соискание ученой степени д.т.н., Уфа, 2010, 367 с.

Information about the paper in English

A.V. Zabolotskiy, M.Yu. Turchin, A.O. Migashkin, V.T. Khadyev
 Magnezit Group
 Satka, Russia
 E-mail: azabolotskiy@magnezit.com
 Received 27.05.2019

NUMERICAL MODELLING OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR SPATIAL DEFECTS: THE CASE STUDY OF PERICLASE-CARBONACEOUS REFRACTORY MATERIAL USED IN STEELMAKING

Abstract

The authors of this paper used numerical modelling techniques to calculate stress intensity factors for spatial defects. The aim of this research was to determine the values of fracture toughness of a faulty massive body and to apply such values to simulate fatigue cracking in structural materials, and in particular in refractory materials for steelmaking. The authors established some practically relevant properties of the relationship between fracture toughness (stress intensity factor) and the arrangement of defects to each other. They also established that the reference values of this parameter, which had been determined earlier for flat periodic defect groups (microcracks and pores), were not applicable.

Keywords: modelling, stress intensity, fatigue cracks, refractory materials.
