

Локальные коэффициенты интенсивности напряжений вдоль фронта канальной трещины при её пересечении с магистральной трещиной

В. Г. Боровик

Рассмотрено пересечение системы параллельных поровых каналов магистральной трещиной (МТ), перпендикулярной их оси. Сечение канала имело форму звездообразной трехлучевой трещины. Углы наклона фронта МТ к плоскости канальной трещины (КТ) составляли 0, 30, 60 и 90°. Определены локальные коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) K_I , K_{II} , K_{III} вдоль фронта КТ, расположенного на расстояниях 0,15; 0,08; 0,04; 0,02; 0,012; 0 от фронта МТ. Показано, что максимальный локальный КИН для КТ, плоскость которой параллельна фронту МТ, в четыре раза превышает КИН для КТ, плоскость которой перпендикулярна фронту МТ. Абсолютная величина суммарного КИН сдвига и среза $K_{II-III} = (K_{II}^2 + K_{III}^2)^{1/2}$ на фронте КТ имеет три локальных максимума: центральный — в точке пересечения фронта КТ плоскостью МТ и боковые — вблизи МТ по обе стороны от её плоскости.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, магистральная трещина, поровый канал, звездообразная трещина, пересечение трещин.

Введение

Локализация максимальных напряжений в окрестности вершины трещины, дефекта и т. д., называемая концентрацией напряжений, приводит к тому, что разрушению сопротивляется очень малая часть сечения элемента конструкции. Очевидно, что увеличение размеров области концентрации напряжений при неизменной внешней нагрузке приводит к снижению их максимальных значений. Величина этого снижения может характеризовать перспективность того или иного материала в качестве конструкционного.

Увеличение размеров области концентрации напряжений и соответствующее снижение уровня максимальных напряжений обычно происходят за счёт взаимного сдвига несущих элементов структуры материала. Например, в изотропных пластичных материалах при одноосном растяжении сдвиг проходит по плоскостям максимальной интенсивности касательных напряжений, которые наклонены к направлению растягивающих напряжений под углом 45°. Этот сдвиг сопровождается уменьшением так называемого “живого сечения” и соответствующим снижением несущей способности элемента конструкции. Поэтому несомненный интерес представляют материалы, которые обладают структурой, допускающей сдвиг несущих элементов по плоскостям, параллельным максимальным растягивающим напряжениям. К ним относятся в первую очередь материалы с однонаправленной волокнисто-канальной структурой органического происхождения: древесина, костная ткань и др.

Существует группа конструкционных материалов с однонаправленной структурой, которые получают прессованием пучка волокон при их пластическом деформировании [2—5 и др.]. Характерными особенностями структуры этих материалов является гранёная форма плотноупакованных волокон и система параллельных поровых каналов со звездообразными трещиноподобными сечениями. Содержание волокон в структуре таких материалов приближается к 100%. Поэтому они имеют наивысший потенциал прочностных свойств в одном направлении. Разработка и совершенствование этих материалов требуют определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для трещин, которые имеются в структуре материала и развиваются при нагружении и эксплуатации.

По-видимому, Гордон и Кук впервые обратили внимание на возможность снижения концентрации напряжений в окрестности вершины магистральной трещины (МТ) за счет расслоения материала на достаточно слабой границе, параллельной направлению напряжений, раскрывающих МТ, и её фронту [6]. Это расслоение происходит благодаря растягивающим напряжениям, параллельным плоскости МТ, которые возникают в окрестности вершины трещины. Полилов в работе [7] показал, что касательные напряжения, которые появляются в окрестности вершины трещины, в значительной степени способствуют этому расслоению. Задачу Гордона—Кука в терминах КИН и скорость высвобождения упругой энергии исследовали Хи и Хатчинсон в работе [8]. Очевидно, что наличие трещины на границе можно рассматривать как её ослабление. Приближение к ней магистральной трещины приводит к увеличению локальных КИН на ближайших участках их фронтов. Так, Качанов и Лаурес рассмотрели задачу о сближении фронтов произвольно ориентированных непересекающихся дискообразных трещин и показали, что максимальный локальный КИН может более чем в три раза превышать КИН на фронте одиночной трещины [9].

Растягивающие напряжения, возникающие при нагружении вдоль фронта МТ, также могут быть использованы для расслоения достаточно слабой границы, которую пронизывает этот фронт. Данный эффект исследован для туннельных трещин с Н-подобными сечениями в работе [10]. Качанов показал, что при пространственном пересечении дискообразных трещин взаимное влияние полей напряжений приводит к снижению КИН вблизи разрыва фронта трещины [11]. Для рассмотренных трещин КИН нормального отрыва на концах фронта трещины минимален, а КИН сдвига и среза имеют минимальные значения на некотором расстоянии от места разрыва фронта трещины.

Ранее были исследованы локальные КИН на фронте МТ при её пересечении с канальной трещиной (КТ) трёхлучевого порового канала [12]. Коэффициенты интенсивности напряжений для трещин каналов с различной формой сечения рассмотрены в работе [13].

Цель настоящей работы — оценка локальных КИН на фронте КТ при её пересечении с МТ, фронт которой образует различные углы с плоскостью КТ.

Модель материала и процедура вычислений

Модель материала, структура которого состоит из плотноупакованных гранёных волокон и системы параллельных каналов с сечениями в виде

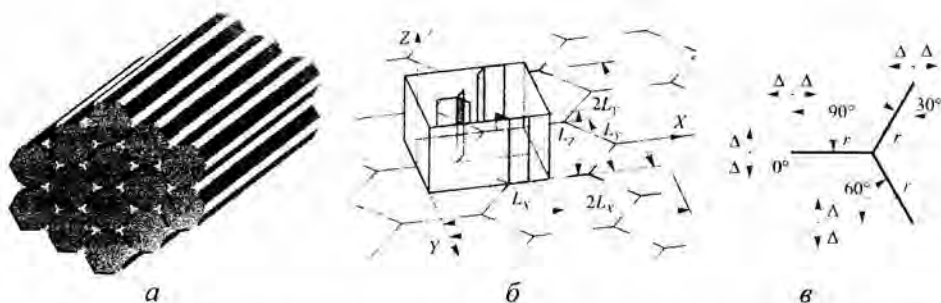


Рис. 1. Модель материала с однонаправленной волокнисто-канальной структурой (а); сечение, перпендикулярное оси каналов и элементарная 3-D ячейка (б); варианты ориентации фронта магистральной трещины по отношению к сечению канала в виде звездообразной трехлучевой трещины (в).

звездообразной трехлучевой трещины, приведена на рис. 1, а. Сечение, перпендикулярное оси каналов для материалов такого типа, можно представить в виде сетки правильных шестиугольников (рис. 1, б). Через узлы этой сетки проходят оси сечений каналов. Каждый канал состоит из трёх канальных трещин, которые объединены своими устьями на оси канала. Фронты канальных трещин параллельны оси канала.

Рассматривали взаимные положения МТ и КТ, при которых они растут навстречу одна другой и догоняют одна другую. При этом углы между фронтом МТ и плоскостью КТ составляли 0, 30, 60 и 90° (рис. 1, в). Определяли напряженно-деформированное состояние и проводили последующий расчет КИН на фронте КТ для расстояний Δ между фронтами МТ и КТ, принадлежащих ряду $\pm 0,15$; $\pm 0,08$; $\pm 0,04$; $\pm 0,02$; $\pm 0,012$; 0. Размеры r лучей всех КТ были равными. Их изменяли от $r = 0,05$ до $r = 0,55$ с шагом 0,05. Все размеры являются относительными (отнесены к половине расстояния между центрами ближайших звездообразных трещин с одинаковой ориентацией). Взаимодействие берегов трещин не учитывали.

Фронт КТ содержал более 400 узлов. Более подробно модель материала, его элементарная ячейка и особенности её дискретизации на конечные элементы описаны ранее [12].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены графики изменения относительных локальных КИН нормального отрыва $K_{I(сб60^\circ)}/K_{I(м0)}$ вдоль фронта КТ. Фронт МТ наклонён к плоскости КТ под углом 60°. Коэффициент интенсивности напряжений $K_{I(м0)}$ является средним КИН на фронте МТ. Графики на рис. 2 представляют изменения КИН при встречном (слева) и попутном (справа) распространении МТ и КТ. На рис. 2 приведены КИН, которые получены при относительном размере канальной трещины $r = 0,3$. При других размерах КТ и углах между фронтом МТ и плоскостью КТ графики изменения относительных КИН нормального отрыва имеют аналогичный вид и отличаются только масштабом оси ординат. Стрелками на рисунках отмечены участки максимумов КИН на фронте КТ, которые находятся на расстоянии $\Delta = \pm 0,012$ от фронта МТ. Отрицательные значения КИН при попутном расположении МТ и КТ (рис. 2, справа) обусловлены упрощенной

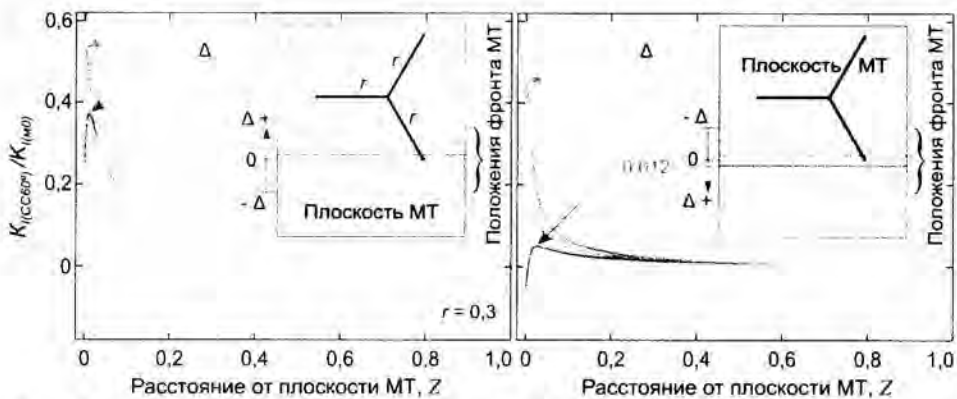


Рис. 2. Относительный КИН вдоль фронта КТ при пересечении МТ и КТ для встречного (слева) и попутного (справа) расположения трещин. Фронт МТ наклонен под углом 60° к плоскости КТ.

моделью трещины, принятой в данной работе, в которой не учитывается контактное взаимодействие берегов трещины при её закрытии.

На рис. 3 (верхний ряд) представлены графики максимальных относительных КИН $K_{I(scr)}/K_{I(mo)}$ на фронте КТ (отмеченных стрелками на рис. 2) в зависимости от размера КТ при различных углах наклона фронта МТ к плоскости КТ. На нижних графиках те же значения КИН представлены в зависимости от угла наклона фронта МТ к плоскости КТ при различных r . Отрицательные углы на горизонтальной оси нижних графиков соответствуют попутному расположению МТ и КТ.

Как видно на рис. 2 и 3, максимальное локальное увеличение КИН нормального отрыва на фронте КТ имеет место до пересечения фронтов МТ и КТ. Локальные увеличения КИН при различных r и углах 30° — 90° между фронтом МТ и плоскостью КТ отличаются незначительно. Наибольшее повышение величины локального максимума КИН происходит в диапазоне углов 0° — 30° . По-видимому, это обусловлено тем, что поле напряжений вокруг фронта МТ в максимальной степени взаимодействует с КТ при малых углах между фронтом МТ и плоскостью КТ.

В целом, эффект локального повышения КИН нормального отрыва для КТ, плоскость которой параллельна фронту МТ, примерно в четыре раза выше, чем для КТ, плоскость которой перпендикулярна фронту МТ. Это демонстрирует возможность более широкого, трехмерного, взгляда на эффект Гордона—Кука: его зависимость от угла наклона фронта магистральной трещины к плоскости интерфейсной трещины. Напомним, что Гордон и Кук рассматривали трещины, фронты которых параллельны, а плоскости перпендикулярны, то есть они рассматривали плоскую, двухмерную, задачу.

У КТ, плоскость которой не перпендикулярна фронту МТ, отсутствует симметрия поля напряжений относительно этой плоскости. Для характеристики таких полей напряжений вокруг фронта трещины используют КИН второй и третьей моды (сдвига и среза соответственно). В отношении этих КИН необходимо отметить следующее. Для характеристики сопротивления материала разрушению имеет значение абсолютная величина КИН независимо от направления сдвига в плоскости трещины, а не знак КИН. Поэтому в рамках данной работы, КИН сдвига и среза представлены одним суммарным КИН: $K_{II+III} = (K_{II}^2 + K_{III}^2)^{1/2}$.

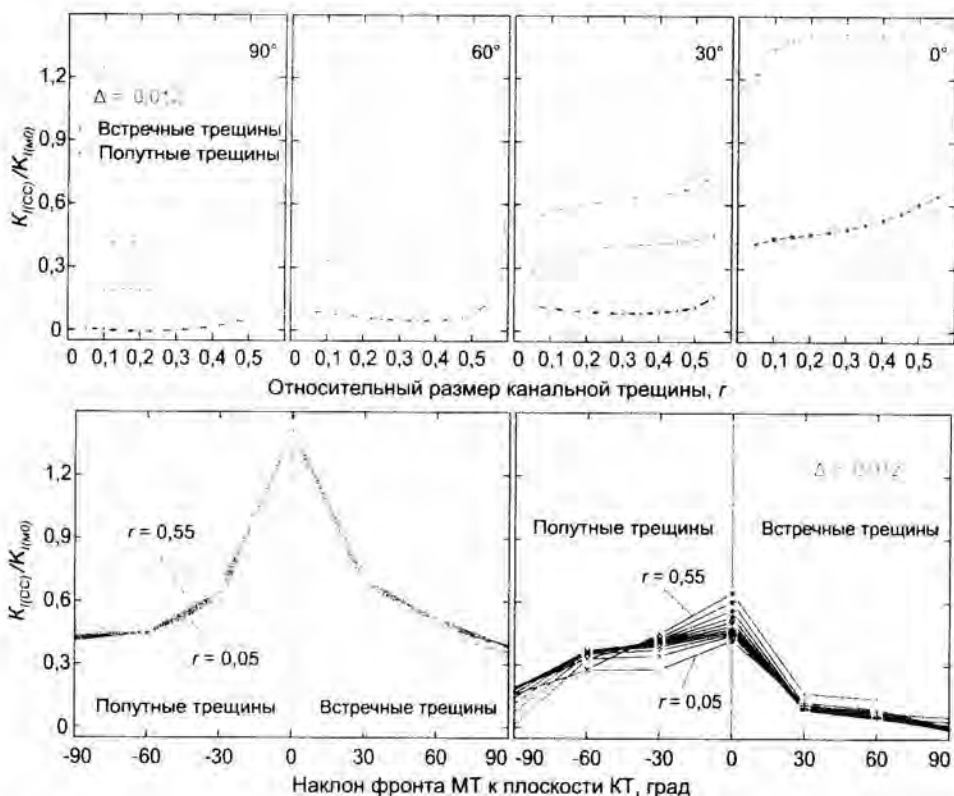


Рис. 3. Относительный КИН $K_{II(III)}/K_{I(m0)}$ для точек фронта КТ, который расположен на расстоянии $\Delta = \pm 0,012$ от фронта МТ при различных r и углах 0, 30, 60 и 90° между фронтом МТ и плоскостью КТ.

На рис. 4 приведены графики изменения суммарных относительных КИН сдвига и среза $K_{II+III(60^\circ)}/K_{I(m0)}$, $K_{II+III(30^\circ)}/K_{I(m0)}$ и $K_{II+III(0^\circ)}/K_{I(m0)}$ для КТ, с плоскостями которых фронт МТ образует углы 60 (верхняя пара рисунков), 30 (средняя пара рисунков) и 0° (нижний рисунок) соответственно. В верхнем и среднем рядах рисунков представлены изменения КИН вдоль фронта КТ при встречном (слева) и попутном (справа) расположении МТ и КТ. Схемы положений фронта МТ по отношению к сечению КТ для верхних графиков приведены на рис. 1, слева и справа соответственно. Если фронт МТ параллелен плоскости КТ (рис. 4, нижний), то МТ и КТ не являются ни встречными ни попутными.

Коэффициенты интенсивности напряжений на рис. 4 получены при $r = 0,3$. При других размерах КТ графики изменения суммарных относительных КИН сдвига и среза имеют аналогичный вид и отличаются в основном лишь масштабом оси ординат. Как видно, суммарные КИН K_{II+III} имеют локальный максимум на пересечении фронта КТ с плоскостью МТ (при $Z = 0$). Наибольшее увеличение этого КИН имеет место для КТ, плоскость которой МТ пересекла полностью. Кроме того, имеется еще один локальный максимум K_{II+III} на фронте КТ с каждой стороны от плоскости МТ. Второй максимум приближается к плоскости МТ с уменьшением Δ . Стрелками на рис. 4 отмечены положения дополнительных максимумов при $\Delta = \pm 0,012$.

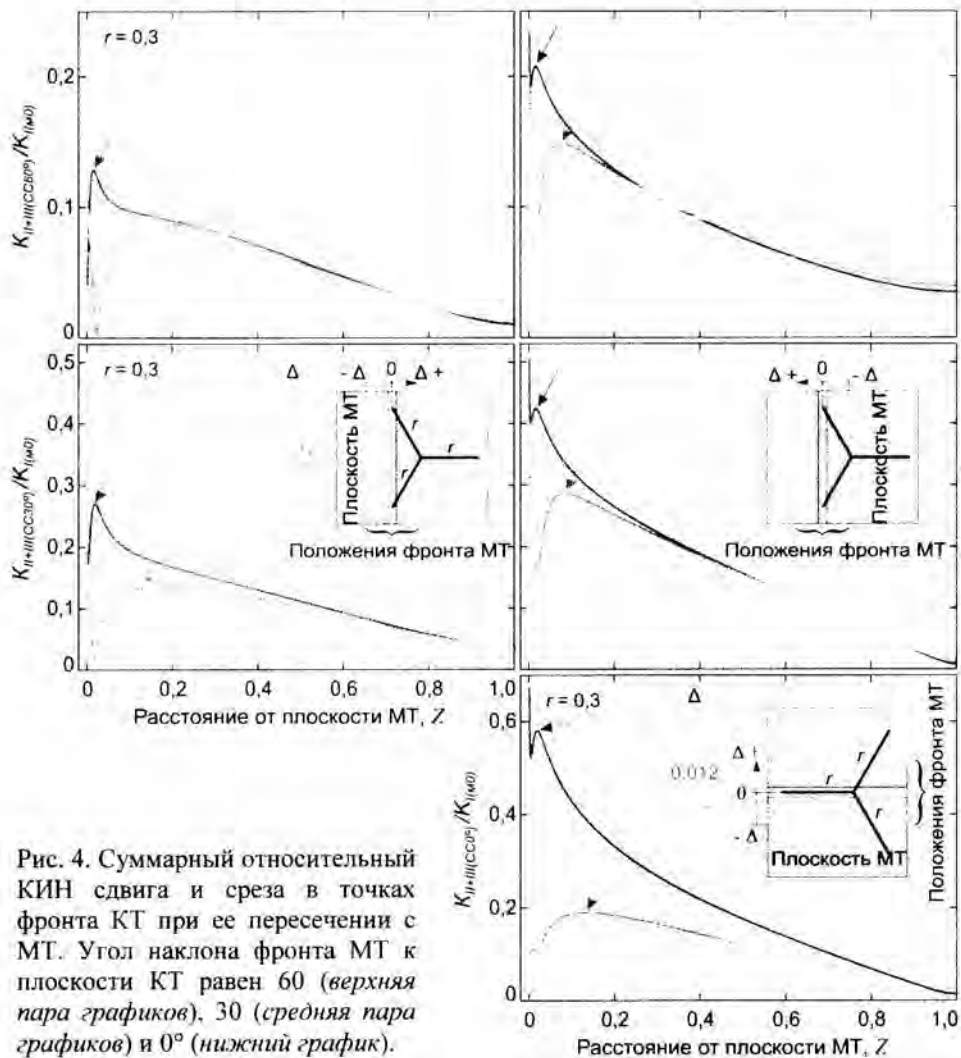


Рис. 4. Суммарный относительный КИН сдвига и среза в точках фронта КТ при ее пересечении с МТ. Угол наклона фронта МТ к плоскости КТ равен 60° (верхняя пара графиков), 30° (средняя пара графиков) и 0° (нижний график).

Максимальные амплитуды суммарного КИН сдвига и среза показывают возможность относительного касательного смещения границ, которые образуются в результате расщепления КТ при пересечении параллельных поровых каналов магистральной трещиной.

На рис. 5 представлены графики изменения $K_{II+III}/K_{I(0)}$ в локальных максимумах, отмеченных стрелками на рис. 4, в зависимости от размера КТ и угла наклона фронта МТ к плоскости КТ. Наибольшему влиянию угла наклона фронта МТ к плоскости КТ подвержены КТ после пересечения с фронтом МТ. На рис. 5 видно, что влияние размера КТ на величину второго локального КИН повышается с уменьшением угла наклона фронта МТ к плоскости КТ. И, наоборот, влияние угла наклона фронта МТ к плоскости КТ на величину второго локального КИН повышается с увеличением характерного размера КТ.

Второй локальный максимум на фронте КТ может являться причиной неустойчивости фронта КТ в материалах с однонаправленной волокнисто-канальной структурой. Эффект неустойчивости трещины расслоения вблизи приближающейся к ней перпендикулярной трещины отрыва и

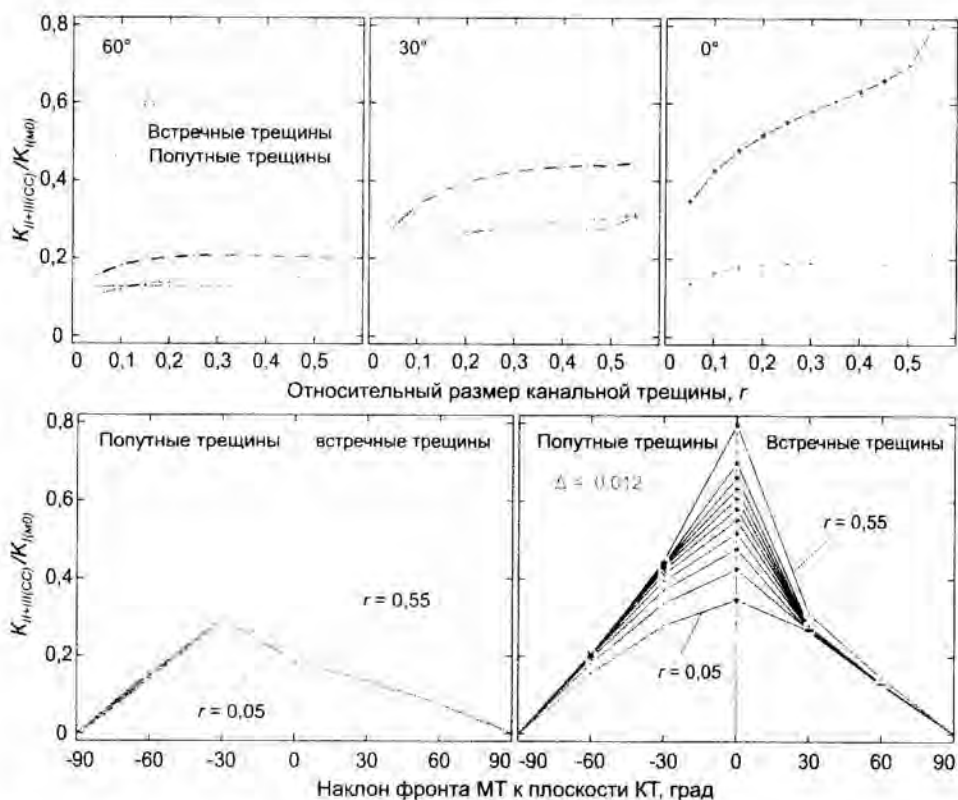


Рис. 5. Суммарный относительный КИН сдвига и среза для точек фронта КТ, который расположен на расстоянии $\Delta = \pm 0,012$ от фронта МТ при различных r и углах наклона фронта МТ к плоскости КТ.

размерный диапазон этой неустойчивости в зависимости от расстояния между вершиной трещины отрыва и трещиной расслоения рассмотрен в работе [14]. Очевидно, что трещина, которая распространяется через области возрастания и снижения КИН в ее вершине, ускоряется и замедляется. Этим она порождает волновой процесс, который в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот называют акустической эмиссией. Поскольку скорость трещины определяется величиной КИН в ее вершине, то расстояние между максимумами/минимумами КИН на фронте трещины влияет на частоту сигнала акустической эмиссии.

Необходимо отметить, что кинематические граничные условия на границах элементарной ячейки обуславливают $K_{III(CC)} = 0$ при $Z = 1$. Поэтому $K_{II+III(CC)}/K_{I(M0)}$ также имеет близкие к нулю значения при $Z = 1$ на рис. 4. При других граничных условиях и наличии трения поверхностей трещины правые части графиков на рис. 4, по-видимому, будут другими.

Выводы

Рост канальных трещин под влиянием поля напряжений магистральной трещины является, по-видимому, ключевым механизмом, который обеспечивает снижение концентрации напряжений в материалах с однонаправленной волокнисто-канальной структурой и соответствующее повышение сопротивления разрушению.

Фронт магистральной трещины, который находится вблизи каналов с остроконечными сечениями, вызывает увеличение КИН на фронтах канальных трещин. Установлено, что увеличение угла наклона фронта МТ к плоскости КТ приводит к снижению максимальных локальных КИН на фронте КТ. Максимальный локальный КИН для КТ, плоскость которой параллельна фронту МТ, примерно в четыре раза превышает КИН для КТ, плоскость которой перпендикулярна фронту МТ.

Абсолютная величина суммарного КИН сдвига и среза $K_{II-III} = (K_{II}^2 + K_{III}^2)^{1/2}$ на фронте КТ имеет три локальных максимума: центральный — в плоскости МТ и боковые — вблизи МТ по обе стороны от её плоскости. Расстояния между локальными максимумами K_{II-III} на фронте КТ увеличиваются при удалении фронтов МТ и КТ. Наличие нескольких локальных минимумов и максимумов КИН на фронте трещины способствует непостоянству скорости её распространения и возникновению акустической эмиссии, используемой при контроле процесса разрушения материалов.

Полученные оценки повышения локальных КИН на фронтах канальных трещин под влиянием магистральной трещины позволяют определить необходимый уровень трещиностойкости границ между волокнами, при котором происходит рост канальных трещин.

1. *Скорход В. В.* Слоистые композиты: структурная классификация, теплофизические и механические свойства // Порошковая металлургия. — 2003. — № 9/10. — С. 437—446.
2. *Akisanya A. R., Cocks A. C. F., Fleck N. A.* Hydrostatic compaction of cylindrical particles // J. Mech. Phys. Solids. — 1994. — 42, No. 7. — P. 1067—1085.
3. *Kovar D., King B. H., Trice R. W., Halloran J. W.* Fibrous monolithic ceramics // J. Amer. Ceram. Soc. — 1997. — 80, No. 10 — P. 2471—2487.
4. *Ishikawa T.* Crack-resistant fiber-bonded ceramic. // Adv. Engin. Mater. — 1999. — 1, No. 1. — P. 59—61.
5. *Боровик В. Г., Григорьев О. Н., Субботин В. Н.* Новый базальтовый конструкционный материал с однонаправленной структурой // Порошковая металлургия. — В печати.
6. *Cook J. and Gordon J. E.* A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems // Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A. — 1964. — 282, No. 1391. — P. 508—520.
7. *Полилов Н. А.* Торможение трещины поверхностью раздела // Изв. АН СССР, Механика тв. тела. — 1974. — № 1. — С. 68—72.
8. *He M.-Y., Hutchinson J. W.* Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials // Int. J. Solids Structures. — 1989. — 25, No. 9. — P. 1053—1067.
9. *Kachanov M., Laures L.-P.* Three-dimensional problems of strongly interacting arbitrarily located penny-shaped cracks // Int. J. Fract. — 1989. — 41. — P. 289—313.
10. *Suiker A. S. J., Fleck N. A.* Crack tunneling and plane-strain delamination in layered solids // Int. J. Frac. — 2004. — 25. — P. 1—32.
11. *Kachanov M.* Elastic solids with many cracks and related problems // Adv. in Appl. Mech. — 1993. — 30. — P. 259—445.
12. *Боровик В. Г.* Коэффициенты интенсивности напряжений на фронте магистральной трещины, распространяющейся перпендикулярно оси параллельных поровых каналов с сечениями в виде звездообразных трехлучевых трещин // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2011. — Вып. 13. — С. 58—68.

13. Боровик В. Г. Локальные коэффициенты интенсивности напряжений для трещин в материале с параллельными каналами различного сечения // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2010. — Вып. 12. — С. 47—57.
14. Li J. Debonding of the interface as 'crack arrestor' // Int. J. Frac. — 2000. — 105. — P. 57—79.

Локальні коефіцієнти інтенсивності напружень уздовж фронту каналної тріщини при її перетині з магістральною тріщиною

В. Г. Боровик

Розглянуто перетинання системи паралельних порових каналів магістральною тріщиною (МТ), перпендикулярною до їх осі. Перетин каналу мав вигляд зіркоподібної трипроменевої тріщини. Куту нахилу фронту МТ до площини каналної тріщини (КТ) були 0, 30, 60 і 90°. Визначено локальні коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) K_I , K_{II} , K_{III} уздовж фронту КТ, розташованого на відстанях 0,15; 0,08; 0,04; 0,02; 0,012; 0 від фронту МТ. Показано, що максимальний локальний КІН для КТ, площина якої паралельна фронту МТ, вчетверо перевищує КІН для КТ, площина якої перпендикулярна фронту МТ. Абсолютна величина сумарного КІН зсуву та зрізу $K_{II+III} = (K_{II}^2 + K_{III}^2)^{1/2}$ на фронті КТ має три локальних максимуми: центральний — на перетині площини МТ з фронтом КТ та бокові — поряд з МТ по обидва боки від її площини.

Ключові слова: коефіцієнт інтенсивності напружень, магістральна тріщина, поровий канал, зіркоподібна тріщина, перетинання тріщин.

Local stress intensity factors along the front of the channel cracks at its intersection with the main crack

V. G. Borovik

The intersection of parallel pore channels of the main crack (MC) is considered. The MC was perpendicular to axis of the channel. The channel cross section had the shape of starlike three-beam cracks. Angles of the MC front to plane of the channel cracks (CC) were 0, 30, 60 and 90°. The local stress intensity factors (SIF) K_I , K_{II} , K_{III} along the CC front which is located at distances of 0.15, 0.08, 0.04, 0.02, 0.012, 0 from the MC front were obtained. It is shown that the maximum local SIF for CC, whose plane is parallel to the MC front, four times higher than the SIF for CC, whose plane is perpendicular to the MC front. The absolute value of the total SIF of shearing and tearing $K_{II+III} = (K_{II}^2 + K_{III}^2)^{1/2}$ at the CC front has three local maxima: central — at the intersection of the CC front with the MC plane and side peaks near the MC on both sides of its plane.

Keywords: stress intensity factor, main crack, pore channel, starlike crack; crack intersection.