

УДК 539.42

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ*

А.С. Чернятин, И.А. Разумовский, Ю.Г. Матвиенко

В работе рассмотрена задача о взаимном влиянии пересекающихся поверхностных трещин в пространственных элементах конструкций. Разработан специализированный макрос для расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов, в которых имеются пересекающиеся плоские трещины с произвольной ориентацией и геометрией фронта. На основе решения модельной задачи установлены закономерности влияния геометрических соотношений и типов нагружения на распределение коэффициентов интенсивности напряжений и T-напряжений. Приведен пример расчета распределения этих параметров механики разрушения вдоль фронтов пересекающихся трещин в трубопроводе при действии рабочих нагрузок, а также с учетом влияния остаточных напряжений.

Ключевые слова: пересекающиеся трещины, двухпараметрическая механика разрушения, метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, T-напряжения.

MUTUAL INFLUENCE OF INTERSECTING ORTHOGONAL CRACKS THREE-DIMENSIONAL STRUCTURAL ELEMENTS

A.S. Chernyatin, I.A. Razumovsky, Yu.G. Matvienko

The mutual influence problem of the intersecting surface cracks in three-dimensional structural elements of space was considered. The specialized macro for calculating the stress-strain state of structural elements, which are intersecting planar cracks with the arbitrary orientation and geometry of the front, has being developed. Patterns of loading geometric proportions and types influence on the distribution of the stress intensity factor and T-stresses are studied on the basis of the model problem solution. An example of calculation for these parameters distribution of fracture mechanics along the fronts of intersecting cracks in the pipe under workloads, as well as under the residual stresses effect.

Keywords: intersecting cracks two-parameter fracture mechanics, finite element method, the stress intensity factor, T-stresses.

Введение

Практика эксплуатации высоконагруженных трубопроводов современной энерготехники, в первую очередь атомного и теплового энергетического оборудования, показывает, что в околошовной зоне стыковых сварных соединений, наряду с трещинами в окружном направлении, могут также возникать и трещины осевой ориентации. В частности, осевые (меридиональные) трещины, ориентированные

перпендикулярно плоскости стыка сварного шва, были обнаружены при металлографических исследованиях темплетов, вырезанных из зоны сварных соединений трубопроводов АЭС с дефектами типа трещин окружной ориентации [1]. Возникновение осевых трещин, в первую очередь, можно объяснить тем, что в тонкостенных трубах окружные напряжения, обусловленные действием основной рабочей нагрузки – внутреннего давления, в два раза

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00839 а.

превышают осевые (меридиональные) напряжения.

Заметим, что хотя анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) тел возле пересекающихся взаимно перпендикулярных трещин посвящено весьма мало публикаций [2, 3], можно сделать вывод, что взаимное влияние пересекающихся трещин на распределение коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) нормального отрыва K_I весьма незначительно.

Вместе с тем, с учетом одной из современных тенденций развития механики разрушения – так называемой двухпараметрической механики разрушения, которая, в отличие от классической, наряду с сингулярными составляющими поля напряжений у вершины трещины вводит в рассмотрение также и несингулярные составляющие (T -напряжения) [4–7], задача анализа взаимного влияния пересекающихся трещин становится весьма актуальной.

Целью проводимого исследования, результаты которого приведены в настоящей статье, является анализ закономерностей взаимного влияния пересекающихся трещин на максимальные величины и распределение сингулярных и несингулярных составляющих поля напряжений вдоль фронтов этих трещин.

Специализированный макрос для расчета пересекающихся трещин в трехмерных объектах

Для расчетного анализа НДС в рассмотренных краевых задачах использовался программный комплекс (ПК) *ANSYS* [8]. Отметим, что задачи о пересекающихся трещинах имеют особенности и не позволяют использовать готовые средства ПК *ANSYS* для автоматического построения нескольких «взаимодействующих» трещин и, соответственно, проведения расчетов параметров механики разрушения (что в полной мере относится и к другим программным средам). Это обусловлено тем обстоятельством, что для корректного моделирования характера НДС в окрестности вершины трещины необходимо использовать специальные конечные элементы, позволяющие учитывать особенности НДС в окрестности вершины, – так называемые сингулярные элементы. С другой стороны, при автоматизированном построении трещин с близко расположенными вершинами (фронтами) сетка элементов хотя бы одной из

них не может иметь и требуемую структуру, и сингулярные элементы. Кроме того, чтобы в ПК *ANSYS* традиционным образом можно было встроить трещину в рассматриваемую область конечно-элементной модели (КЭМ), эта область должна быть образована только из одного объема, что невыполнимо в случае расположения в одной области двух геометрически обособленных объектов, в частности, трещин. В связи с этим, для решения задачи о НДС в зонах пересекающихся трещин использовался разработанный авторами на языке *APDL* специализированный макрос, принципы которого описаны в работах [9, 10].

Остановимся на некоторых особенностях работы этого макроса. С его помощью можно осуществить встраивание в модель пространственного объекта плоских трещин с произвольной ориентацией и геометрией фронта, вдоль которого образуется тороидальная область («трубка»), внутри которой создается упорядоченная сетка конечных элементов с сингулярными элементами в окрестности фронта. При этом параметры разбиения на сингулярные элементы задаются в соответствии рекомендациями, приведенными в работах [11–13].

Макрос позволяет построить фронт плоской трещины, линия фронта которой имеет произвольную конфигурацию, определяемую точками, положение которых задается в глобальной системе координат. Берега трещин около фронта образуют клиновидный вырез с постоянным углом, который можно назначить достаточно малым, чтобы трещина была близка к математическому разрезу. Кроме того, макрос позволяет при необходимости моделировать прямоугольную прорезь заданной ширины или скругление конечного радиуса. Благодаря автоматическому построению вспомогательных геометрических объектов требуемой конфигурации практически нет ограничений на тип создаваемой трещины, которая может быть поверхностной, краевой, а также внутренней (с замкнутой полостью) и сквозной с произвольной конфигурацией в плоскости. Кроме того, в макросе предусмотрена возможность построить дополнительную «трубку» вокруг основной, тем самым обеспечивая возможность плавного перехода от мелкой сетки в основной «трубке» к примыкающей к ней области тела, в которую встраивается трещина. Дополнительная «трубка» позволяет также исключить проблемы с построением упо-

рядоченной сетки внутри основной «трубки» при прохождении трещины через множество объемов. Отметим, что принципы работы макроса обеспечивают возможность «встраивания» трещины также и в кусочно-однородную область, т.е. область, состоящую из нескольких объемов материалов с различными физико-механическими характеристиками (что невозможно при использовании стандартной процедуры построения трещины в ПК ANSYS).

Все геометрические параметры трещин первоначально иницируются и загружаются при запуске макроса. Он позволяет производить поэтапное построение трещины с возможностью быстрого перестроения путем изменения соответствующих параметров. Другой макрос и соответствующая программа в ПК MATLAB позволяют выполнять расчеты распределения параметров механики разрушения (КИН, J -интеграла, T -напряжений) вдоль фронтов трещин.

Таким образом, разработанный макрос обеспечивает возможность построения обособленных областей с упорядоченной сеткой сингулярных элементов вдоль фронтов трещин. Однако, это возможно лишь в том случае, если фронты трещин не пересекаются. Поэтому при проведении расчетов рассматриваются трещины с *непересекающимися* фронтами, однако расположенные сколь угодно близко друг к другу. Полученные таким образом НДС в совокупности с процедурой интерполирования данных для трещин с непересекающимися фронтами также могут быть использованы и для случая пересекающихся фронтов.

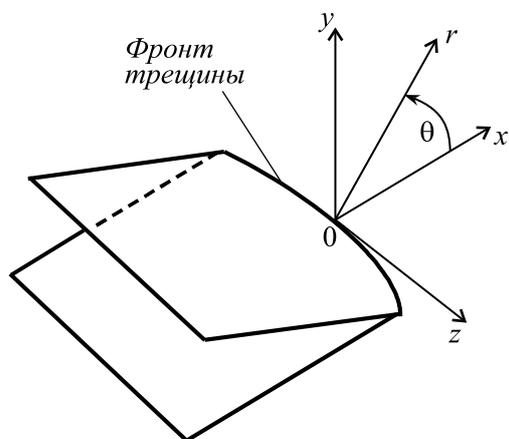


Рис. 1. Локальные системы координат, связанные с фронтом трещины

Определение сингулярных и несингулярных составляющих поля напряжений

Поле упругих напряжений в окрестности вершины трещины нормального отрыва с учетом первых компонент несингулярных членов разложения (T_{xx} - и T_{zz} -напряжений) для случая плоской деформации ($\epsilon_{zz} = \text{const}$) имеет следующий вид [4, 11, 12]:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T_{xx}, \\ \sigma_{yy} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right], \\ \sigma_{xy} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right], \\ \sigma_{zz} &= \frac{2\nu}{\sqrt{2\pi r}} K_I \frac{\cos \theta}{2} + T_{zz}, \\ T_{zz} &= E \epsilon_{zz} + \mu T_{xx}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x, y, z и r, θ, z – локальные декартовы и полярные координаты, связанные с вершиной трещины O (рис. 1), которая может быть расположена в любой точке фронтов трещин; K_I – коэффициент интенсивности напряжений; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений ($i, j = x, y, z$); ϵ_{zz} – деформация вдоль оси z ; T_{xx} – напряжения, действующие в направлении оси x ; T_{zz} – напряжения, действующие вдоль оси z ; E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Параметры K_I, T_{xx}, T_{zz} определяются на основе минимизации среднеквадратических отклонений между величинами напряжений $\sigma_{xx}(r, \theta), \sigma_{yy}(r, \theta), \sigma_{zz}(r, \theta)$ во множестве расположенных в окрестности вершины трещины соответствующих точек с координатами (r, θ) и формируемых в двух массивах:

- полученных численно с помощью МКЭ,
- вычисленными на основе аналитических выражений (1).

Количество указанных точек связано с шагом конечно-элементной сетки. Точки располагаются равномерно по радиальному и окружному направлениям в секторе $[0,04 \leq r/a \leq 0,2; -\pi \leq \theta \leq \pi]$, где a – половина длины трещины [14]. Для того, чтобы получить распределение K_I, T_{xx}, T_{zz} вдоль фронта трещины, необходимо выполнить эту процедуру для ряда плоскостей (xOy) , перпендикулярных фронту пространственной трещины.

Решение модельной задачи

Рассматривается фрагмент пространственного элемента конструкции с двумя ортогонально пересекающимися трещинами, геометрия которого задается в глобальной системе координат $\xi\zeta\eta$ (рис. 2, а). В плоскости $\xi\zeta$, расположенной ортогонально поверхности $\zeta = 0$ упругого полупространства $\zeta \leq 0$, имеется поверхностная трещина (трещина А): длина трещины $a_1 = 2$, $s_1(\xi, \eta)$ – координата вдоль фронта трещины (рис. 2, б). Как принято в большинстве публикаций, связанных с испытаниями материалов на трещиностойкость, конфигурация фронта этой трещины имеет форму полуэллипса с отношением полуосей $b_1/a_1 = 0,67$.

Расположенная в плоскости $\xi\eta$ трещина Б также имеет форму полуэллипса, однако отношение осей полуэллипса b_2/a_2 может быть произвольным. На удалении от зоны трещин действуют однородные растягивающие напряжения $\sigma_{\eta\eta}$ и $\sigma_{\xi\xi} = \chi\sigma_{\eta\eta}$ (χ – коэффициент двухосности нагрузки).

Целью решения модельной задачи является оценка влияния геометрических параметров второй трещины (трещины Б, см. рис. 2), а также двухосности нагрузки, действующей на удалении от зоны трещинообразования, на величины и распределение сингулярных и несингулярных составляющих поля напряжений по фронту первой трещины (трещины А).

Схема конечно-элементного разбиения рассматриваемой области представлена на рис. 3.

Заметим, что в расчетной модели полупространство заменялось прямоугольным параллелепипедом, размеры которого в направлениях осей ξ и η были равны $10a_1$, а в направлении оси ζ составляли $10b_1$. Количество используемых в модели 20-узловых шестигранных элементов типа *SOLID 95*, имеющих квадратичные функции формы, в зависимости от размеров трещин варьировалось в диапазоне от 20-ти до 30-ти тысяч. Конечно-элементное разбиение производилось таким образом, что наибольшая «плотность» элементов получалась вокруг области с трещинами, тогда как к ее границам плотность уменьшается. Это позволяет адекватно учитывать граничные условия и проводить расчет НДС в интересующей нас области с требуемой точностью при умеренном количестве элементов.

Основные расчетные результаты для модельной задачи представлены на рис. 4 и 5. На рисунке 4 приведены распределения безразмерных величин $K_I(s_1)/\sigma_{\eta\eta} \sqrt{\pi a_1}$, $T_{xx}(s_1)/\sigma_{\eta\eta}$, $T_{zz}(s_1)/\sigma_{\eta\eta}$ вдоль фронта трещины А при постоянной глубине трещины Б ($b_2 = 0,44a_1$) в зависимости от ее длины a_2 и параметра двухосности χ . По оси абсцисс использована безразмерная криволинейная координата s_1/L_1 , где $L_1 - 1/4$ часть периметра эллипса с осями a_1 и b_1 . На рисунке 5 приведены аналогичные распределения параметров механики разрушения при постоянной длине трещины А в зависимости от глубины поперечной трещины Б и параметра

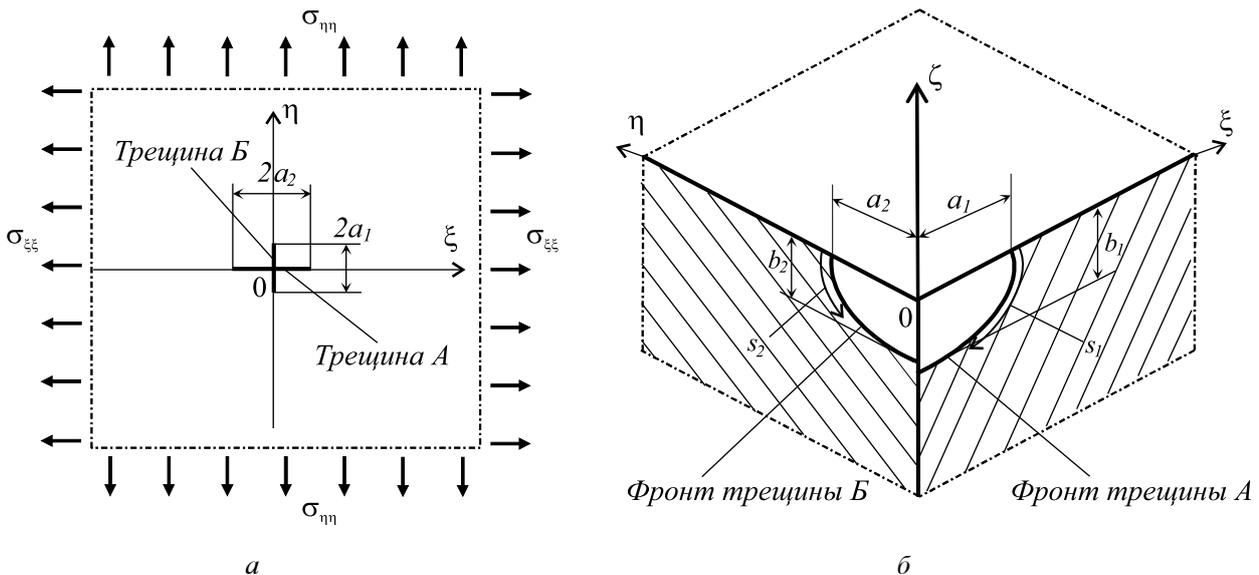


Рис. 2. Схема взаимного расположения пересекающихся полуэллиптических трещин, выходящих на свободную поверхность: а – выход трещин на свободную поверхность $\zeta = 0$; б – геометрия трещин (показана $1/4$ часть полупространства)

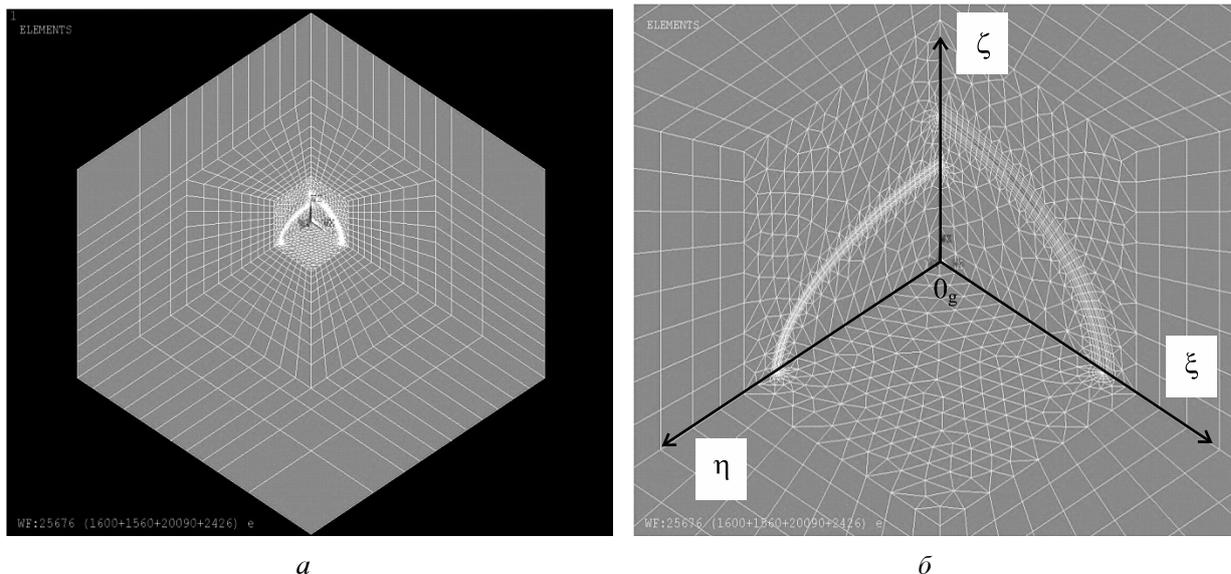


Рис. 3. Схема конечно-элементного разбиения области тела с пересекающимися трещинами (а) и укрупненный фрагмент этой схемы (б)

двухосности. Отметим, что в окрестности фронта трещины все используемые зависимости получены в предположении наличия плоского деформированного состояния. Вместе с тем, известно, что в зоне выхода трещины на свободную поверхность (окрестности точек $s_1 = 0, s_2 = 0$) НДС является трехмерным и имеются особенности, отличные от соответствующих задаче о плоской деформации [15, 16]. В связи с этим, в соответствующей области (будем считать ее границами $0 \leq s_1/L_1 \leq 0,1$) получаемые результаты можно рассматривать только в качестве условных оценок искомых параметров.

На основе анализа результатов расчетов, выполненных для модельной задачи, можно сделать следующие выводы.

1. Изменение длины трещины Б (при ее постоянной глубине):

- практически не оказывает влияния на величины и распределение K_I по фронту трещины А;
- незначительно влияет на T_{xx} -напряжения, но практически не влияет на их распределение; при этом с ростом a_2 величина T_{xx} монотонно уменьшается;

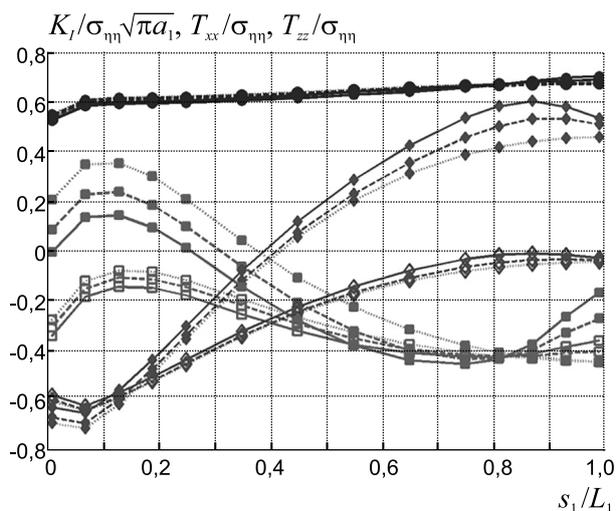


Рис. 4. Распределения K_I ($\circ - \chi = 0,5; \bullet - \chi = 1,0$), T_{xx} ($\square - \chi = 0,5; \blacksquare - \chi = 1,0$); T_{zz} ($\diamond - \chi = 0,5; \blacklozenge - \chi = 1,0$) вдоль фронта трещины А в зависимости от длины трещины Б ($b_2 = 0,44$): $b_2/b_1 = 0$ (.....), $b_2/b_1 = 2/3$ (- - -), $b_2/b_1 = 4/3$ (—)

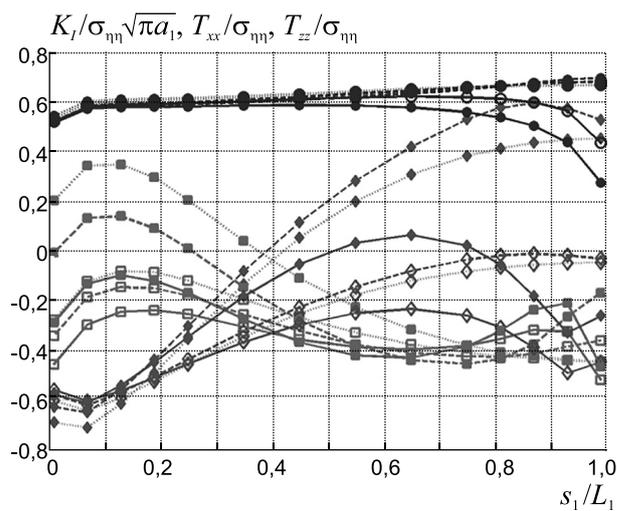


Рис. 5. Распределения K_I ($\circ - \chi = 0,5; \bullet - \chi = 1,0$), T_{xx} ($\square - \chi = 0,5; \blacksquare - \chi = 1,0$); T_{zz} ($\diamond - \chi = 0,5; \blacklozenge - \chi = 1,0$) вдоль фронта трещины А в зависимости от длины трещины Б: $b_2/b_1 = 0$ (.....), $b_2/b_1 = 2/3$ (- - -), $b_2/b_1 = 4/3$ (—)

- незначительно влияет на T_{zz} -напряжения, но практически не влияет на их распределение; при этом с ростом a_2 величина T_{zz} -напряжений монотонно увеличивается.

Кроме того, величина параметра двухосности χ практически не оказывает влияния на K_I (как и следовало ожидать) и существенным образом влияет на величины T_{xx} - и T_{zz} -напряжений, практически не влияя на их распределение по фронту трещины А.

2. Изменение глубины трещины Б при ее постоянной длине (см. рис. 5):

- практически не оказывает влияния на распределение K_I в области $0 \leq s_1/L_1 \leq 0,5$; вместе с тем в зоне выхода трещины на свободную поверхность (при $b_2 > b_1$) имеет место существенное уменьшение величины этого параметра;
- существенно влияет на величины и распределение T_{xx} - и T_{zz} -напряжений.

При этом максимальные значения T_{xx} -напряжений имеют место в области $0,07 \leq s_1 < 0,15$.

3. Зависимости, показывающие влияние глубины трещины Б (при ее постоянной длине) на величину T_{zz} -напряжений, имеют весьма сложный характер (см. рис. 5). При $b_2 < b_1$ максимальные значения T_{zz} -напряжений имеют место в окрестности точки $s_1/L_1 \approx 0,9$, тогда как при $b_2 > b_1$ ($b_2 \approx 0,9$) величины T_{zz} -напряжений достигают наибольших значений вблизи зоны $s_1/L_1 \approx 0,65$. Также можно отметить, что характер распределения T_{xx} -напряжений в области $0,8 \leq s_1/L_1 \leq 1$ существенно изменяется в зависимости от соотношений глубин трещин А и Б.

4. Влияние длины трещины Б на величины параметров механики разрушения и их распределения вдоль фронта трещины А менее значительно, чем влияние глубины трещины Б (см. рис. 4 и 5). Указанные в данном пункте и ранее обстоятельства можно объяснить тем, что при различной глубине трещины Б реализуются различные краевые задачи. Так, при $b_2 < b_1$ фронт трещины находится в объеме материала, и НДС близко к плоской деформации, тогда как при $b_2 > b_1$ фронт выходит на свободную поверхность, и в точках фронта, расположенных в непосредственной близости от свободной поверхности, имеет место плоское напряженное состояние. При этом точки фронта находятся в различных условиях стеснения, характеризуемого T_{xx} - и T_{zz} -напряжениями.

5. Величина параметра двухосности χ практически не оказывает влияния на K_I и суще-

ственным образом влияет на величины T_{xx} - и T_{zz} -напряжений, при этом мало влияя на их распределение по фронту трещины А. Это обусловлено тем обстоятельством, что параметр K_I характеризует быстро затухающее распределение сингулярных напряжений, и, следовательно, область, в пределах которой он оказывает влияние, значительно меньше длины и глубины трещины Б. С другой стороны, T_{xx} - и T_{zz} -напряжения являются регулярными членами разложения поля напряжений, сопоставимыми по величинам с нагрузками $\sigma_{\eta\eta}$ и $\sigma_{\xi\xi}$, поэтому величина параметра двухосности оказывает на их величины значительное влияние (см. рис. 5).

Пример: пересекающиеся трещины в трубопроводе Ду-300

В качестве примера применения разработанной методики, специализированных программ и макросов для решения типовой практической задачи ниже приведены результаты расчетов параметров механики разрушения в пересекающихся поверхностных трещинах в зоне сварного стыка трубопровода атомного энергетического оборудования Ду-300.

Размеры трубопровода: наружный диаметр $D_0 = 325$ мм; толщина стенки – 16 мм. Материал – коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса марки 08X18H10T: модуль упругости $E = 183$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предел текучести $\sigma_T = 490$ МПа. Считается, что в процессе эксплуатации в зоне стыка элементов трубопровода на его внутренней поверхности образовались кольцевая трещина (трещина А) глубиной $b_1 = 6$ мм ($a_1 \gg b_1$), а также полуэллиптическая трещина, расположенная в меридиональном сечении (трещина Б) и распространяющаяся от внутренней поверхности. Размеры полуосей эллипса: $b_2 = 8$ мм (глубина трещины), $a_2 = 12$ мм. Заметим, что принятые соотношения полуосей трещины, возникшей в меридиональном сечении, соответствуют геометрическим соотношениям постулируемых дефектов, устанавливаемых нормативными документами [17].

Трубопровод нагружен внутренним давлением $p_{ном} = 7,0$ МПа. Обусловленные действием внутреннего давления окружные и осевые (меридиональные) напряжения равны соответственно $\sigma_{окр}^p \equiv \sigma_{\xi\xi}^p = 67,6$ МПа, $\sigma_{м}^p \equiv \sigma_{\eta\eta}^p = 33,8$ МПа. Принято считать, что в процессе сборки и эксплуатации трубопровода

в нем возникают также дополнительные осевые напряжения компенсации от температурного расширения трубопровода $\sigma_M^K \equiv \sigma_{\eta\eta}^K = 62$ МПа, а также его изгиба $\sigma_M^H \equiv \sigma_{\eta\eta}^H \approx 13$ МПа. Таким образом, максимальное суммарное осевое напряжение $\sigma_{\eta\eta}^P = \sigma_{\eta\eta}^P + \sigma_{\eta\eta}^K + \sigma_{\eta\eta}^H = 108,8$ МПа.

Кроме того, в материале трубопровода имеются остаточные технологические напряжения (ОН), возникшие в процессе сварки. Исследованиям ОН в зоне сварного соединения трубопровода Ду-300 посвящено значительное количество расчетных и экспериментальных работ, результаты которых отражены в ряде публикаций [18, 19]. Анализ данных, приведенных в указанных, а также ряде других работ, позволяет оценить величины и распределение осевых и окружных остаточных напряжений, имеющих место в поперечном и меридиональном сечениях трубопровода соответственно. Принято считать, что осевые остаточные напряжения по толщине трубопровода изменяются линейно, при этом растягивающие напряжения на внутренней поверхности вблизи корня шва достигают предела текучести основного металла, а окружные напряжения, также равные пределу текучести, по толщине не меняются (они изменяются в зависимости от расстояния от плоскости сварного стыка вдоль оси трубопровода). Вдоль осевой координаты, как это следует из работы [19], в пределах $0 \leq \eta \leq 30$ мм эти напряжения изменяются незначительно.

Для расчета НДС и параметров механики разрушения, обусловленных влиянием остаточных напряжений при развитии пересекающихся трещин, использовался следующий подход.

Возникновение трещины обуславливает «снятие» ОН на «освобождаемых» поверхностях трещины. Следовательно, для учета влияния остаточных напряжений на НДС нужно приложить к берегам трещин дополнительные поверхностные нагрузки, равные по величинам и противоположные по знаку ОН. С использованием указанного подхода были вычислены параметры механики разрушения для пересекающихся кольцевых и осевых трещин.

Основные результаты расчетов приведены на рис. 6 и 7, где представлены распределения K_I , T_{xx} и T_{zz} вдоль фронтов трещин Б и А соответственно ($L_2 - 1/4$ часть периметра эллипса с осями a_2 и b_2).

Из представленных результатов следует, что в рассмотренном случае соотношения размеров пересекающихся трещин для распределения вдоль фронта трещины Б для зависимостей $T_{xx}(s_2)$ и $T_{zz}(s_2)$ характерно изменение знака напряжений (см. рис. 6). При этом T_{xx} -напряжения, вычисленные с учетом влияния ОН, достигают величины ≈ -150 МПа, что может оказывать заметное отрицательное влияние и способствовать раскрытию трещины. Величины T_{xx} и T_{zz} -напряжений в кольцевой трещине А в зоне влияния трещины Б суще-

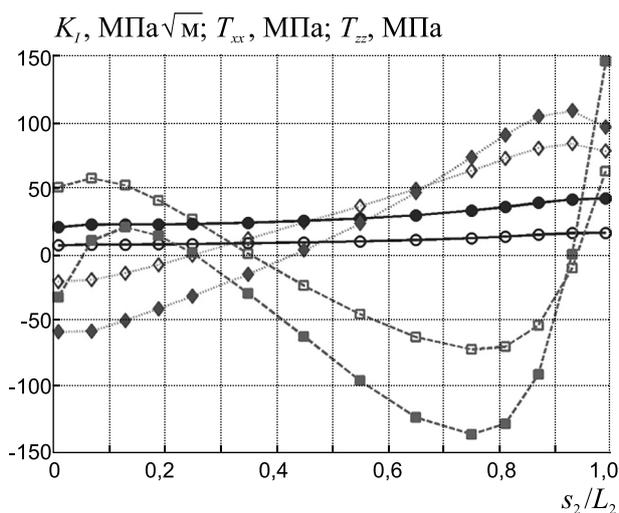


Рис. 6. Распределения K_I, T_{xx}, T_{zz} вдоль фронта трещины Б:

- – K_I без учета ОН, ● – K_I с учетом ОН,
- – T_{xx} без учета ОН, ■ – T_{xx} с учетом ОН,
- ◇ – T_{zz} без учета ОН, ◆ – T_{zz} с учетом ОН

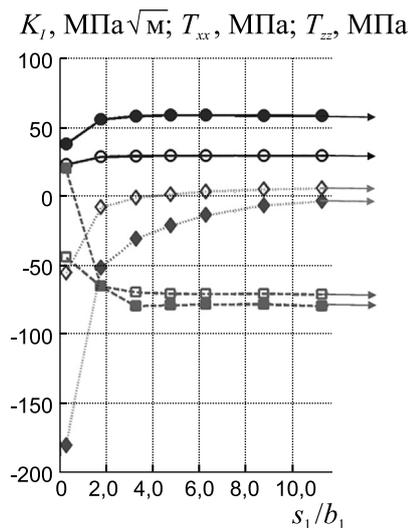


Рис. 7. Распределения K_I, T_{xx}, T_{zz} вдоль фронта трещины А:

- – K_I без учета ОН, ● – K_I с учетом ОН,
- – T_{xx} без учета ОН, ■ – T_{xx} с учетом ОН,
- ◇ – T_{zz} без учета ОН, ◆ – T_{zz} с учетом ОН

ственно меньше, достигая величин $\pm 60-70$ МПа (см. рис. 7).

Эти данные могут быть использованы для оценки трещиностойкости сварного соединения трубопровода на основе двухпараметрического критерия разрушения.

Заключение

Рассмотрена новая задача о влиянии пересекающихся трещин на напряженное состояние конструктивного элемента в зоне трещин. Для численного решения такой задачи в программной среде ANSYS разработан специализированный макрос, обеспечивающий возможность расчета напряженно-деформированного состояния в зонах пересекающихся плоских трещин с произвольной ориентацией и геометрией фронта. При этом определены сингулярных и несингулярных составляющих напряженного состояния в окрестности фронта трещины производится с помощью специальной программы, разработанной в среде MATLAB.

Макрос обеспечивает расчеты как при нагрузках, действующих на удалении от зоны трещинообразования, так и приложенных к берегам трещин, что позволяет учитывать влияние остаточных технологических напряжений.

На основе решения модельной задачи о пересекающихся полуэллиптических трещинах, распространяющихся от поверхности упругого полупространства, установлены общие закономерности влияния геометрических параметров (соотношения глубин и длин трещин), а также параметра двухосности нагружения на величины K_I и T -напряжений. Эти данные могут быть использованы в инженерной практике для расчетных оценок на сопротивление хрупкому разрушению элементов конструкций с пересекающимися поверхностными трещинами для широкого диапазона геометрических параметров трещин, а также соотношений нагрузок, действующих на удалении от зоны трещинообразования.

Список литературы

1. Оценка несущей способности трубопровода Ду-300 КМППЦ РБМК с комбинированным дефектом в кольцевом сварном шве на базе концепции «исключения разрушения» / А.В. Судаков, Б.Н. Иванов, Д.Н. Ковалев, В.А. Киселев, А.И. Аржаев, М.В. Добров // Труды ОАО «НПО ЦКТИ». Вып. 293. «Методы повышения техниче-

- ского уровня и надежности элементов энергооборудования ТЭС и АЭС». СПб., 2004. С. 247–255.
2. Chen Y.Z. Evaluation of T-stresses in multiple crack problems of finite plate // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure. 2012. Vol. 35. P. 173–184.
3. Чернятин А.С. Оценка взаимного влияния пересекающихся сквозных трещин // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 11. С. 62–67.
4. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
5. Матвиенко Ю.Г. Несингулярные T-напряжения в проблемах двухпараметрической механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 2. С. 51–58.
6. Семенова М.М., Матвиенко Ю.Г. Прогнозирование траектории поверхностной трещины при контактном нагружении в условиях трения скольжения // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 2. С. 47–52.
7. Литвинов И.А., Матвиенко Ю.Г., Разумовский И.А. О точности определения несингулярных компонент поля напряжений в вершине трещины с применением метода экстраполяции // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 4. С. 43–51.
8. ANSYS, Structural Analysis Guide 11.0, ANSYS inc., 2007.
9. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности натуральных конструкций с поверхностными трещинами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 35–42.
10. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 3. С. 66–73.
11. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. – 254 с.
12. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. М.: Мир, 1986. – 334 с.
13. Морозов Е.М., Муземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.

14. *Chernyatin A.S., Matvienko J.G., Razumovsky I.A.* A computational tool for estimating stress fields along a surface crack front // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure*. 2015. Vol. 38. P. 180–189.
15. *Benthem J.R.* A quarter-infinite crack in a half-space; alternative and additional solutions // *International Journal of Solid and Structures*. 1980. Vol. 16. No. 2. P. 119–130.
16. *Nakamura T., Parks D.M.* Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack front an interaction integral // *International Journal of Solid and Structures*. 1992. Vol. 29. P. 1597–1611.
17. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат. 1989. – 525 с.
18. *Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Шекер В.М.* Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали // *Автоматическая сварка*. 1998. № 11. С. 32–39.
19. *Мощенко М.Г., Рубцов В.С., Кораблева С.А.* Термомеханический анализ процесса многопроходной сварки соединения Ду-300 трубопровода РБМК методом конечных элементов // *Вопросы материаловедения*. 2011. № 4. С. 1–11.

Материал поступил в редакцию 09.09.2015

**ЧЕРНЯТИН
Александр Сергеевич**

E-mail: cas@inbox.ru
Тел.: (499) 263-69-88

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика МГТУ им. Н.Э. Баумана». Сфера научных интересов – экспериментально-расчетные методы исследования напряженно деформированного состояния, оценки нагруженности и дефектности конструкций; механика разрушения, прочность и трещиностойкость элементов конструкций. Автор более 20 научных публикаций в отечественных и международных изданиях.

**РАЗУМОВСКИЙ
Игорь Александрович**

E-mail: murza45@gmail.com
Тел.: (499) 135-62-98

Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики разрушения и живучести Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – экспериментальные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно деформированного состояния с использованием оптико-интерференционных методов; механика разрушения, методы анализа полей остаточных напряжений; прочность и трещиностойкость многослойных конструкций. Автор более 130 научных публикаций в отечественных и международных изданиях, в т.ч. 8 учебных пособий, 7 коллективных и двух авторских монографий.

**МАТВИЕНКО
Юрий Григорьевич**

E-mail: matvienko7@yahoo.com
Тел.: (499) 135-12-04

Доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – нелинейное физико-математическое моделирование и иерархическая система критериев повреждений и разрушения материалов и конструкций на различных масштабно-структурных уровнях, комплексные критерии, методы анализа и нормирования прочности, живучести, безопасности и ресурса машин и конструкций в сильно поврежденных состояниях в условиях экстремальных физико-механических воздействий и коррозионных сред. Автор более 230 научных публикаций, из них 14 монографий и 10 авторских свидетельств на изобретения.