

Л.П. Вовк /д.т.н./, Е.С. Кисель

Автомобильно-дорожный институт

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Горловка)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЫ С ТРЕЩИНОЙ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Разработан конечно-элементный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния детали с дефектом, включающий в себя исследование характеристик разрушения в зависимости от дефекта. Отдельно проанализированы прочностные изменения в детали при наличии разгружающих отверстий.*

**Ключевые слова:** механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, трещина, трещиноподобный дефект,  $J$ -интеграл.

### Постановка проблемы

В инженерных расчетах на прочность, при анализе причин и характера разрушения объектов сложных технических систем традиционно рассматриваются фактор наличия трещин и трещиноподобных дефектов. Так как подобного рода дефекты можно наблюдать практически во всех автомобильных конструкциях, то, независимо от причин их происхождения, при конструкционном инжиниринге, стало естественным учитывать возможность разрушения объекта в результате образования и роста трещин. Для многих деталей автомобилей и инженерных конструкций, имеющих различные поверхностные трещиноподобные дефекты технологического, металлургического или эксплуатационного происхождения, прочность и перспективная долговечность изделия будет определяться временем достижения возникающей микротрещины критических размеров. Для оценивания растущей трещины вычисляется коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Поскольку напряженное состояние у фронта трещины для упругого тела полностью определяется коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$ , эта величина лежит в основе силовых критериев линейной механики разрушения. Одним из наиболее распространенных методов прогнозирования появления и развития трещиноподобных дефектов является метод конечных элементов (МКЭ). Использование такого метода возможно при линейно-упругом поведении материала и наличии сингулярности напряжений у вершины трещины. На практике, ввиду отсутствия нормативных документов, учитывающих современное состояние проблемы и сложное прогнозирование рассмат-

риваемых процессов, к сожалению, часто применяется экспертный подход к определению возможности дальнейшей эксплуатации объекта с дефектами. Это означает, что эксперт в условиях отсутствия у него объективных данных о реальном уровне безопасности и надежности конструкции и, исходя из своего опыта, принимает решение о необходимости ремонта или продолжении эксплуатации без реализации дополнительных превентивных мер. Естественно, что при таком подходе велика вероятность принятия ошибочного решения, т.к. его основой является субъективное мнение. Учитывая запросы современного диагностического обеспечения крупных промышленных объектов, вопрос исследования развития трещиноподобных дефектов приобретает особую актуальность.

### Анализ последних исследований и публикаций

В большей части публикаций, рассматривающих данный вопрос, принято считать, что металл стыковых (сварных) соединений лишен дефектов сплошности, чего на практике практически невозможно достичь. Для реальных изделий наличие, например, в сварных швах твердых и газовых включений вполне возможно, что значительно осложняет прогнозирование развития разрушения. Причины нарушения сплошности стыковых соединений, в частности металлических швов, достаточно подробно изложены в [1...3]. В данных работах рассматриваются различные факторы технологического, металлургического и организационного характера и их влияние на прочностные характеристики объекта. Поскольку в отношении дефектов сварных со-

единений можно говорить об определенной их неизбежности, в соответствующих нормативных документах установлены допуски на максимальный размер дефектов для различных конструкций. Однако, как показал анализ публикаций [4...6], в действительности при диагностическом обследовании уже эксплуатируемых объектов нередко случаи выявления в шве дефектов размерами выше нормативно допустимых.

Для вычисления КИН, как правило, используется метод конечных элементов (МКЭ) [6]. Обзор исследований, посвященных конечно-элементному моделированию раскрытия трещины, а также влиянию типа элементов, подробности сетки, принятой модели упрочнения, вида плоского напряженно-деформированного состояния и способа освобождения узлов, представлен в работе [4].

Для современной инженерной практики представляют интерес закономерности распространения сквозных трещин усталости, развивающихся при плоском напряженном состоянии или плоской деформации, на основании испытаний на образцах в виде пластин с различными концентраторами напряжений – отверстиями и надрезами, а также упрочняющими включениями различной формы и размеров из других материалов.

Введение в рассмотрение концентраторов напряжения обусловлено необходимостью получения качественно нового эффекта – стабилизации трещины. Конструкционное торможение трещины предполагается возможным путем добавления разгружающих отверстий, ремонтных заплат различной конфигурации, ребер жесткости, приваренных, приклеенных или приклепанных к конструкции. Задачи поиска оптимальных форм отверстий в общем случае сводятся к решению вариационных задач с неизвестными границами. В некоторых случаях для определения формы отверстий, на которых технологически неизбежная концентрация была бы сведена к минимуму по сравнению со всеми другими возможными формами отверстий, рассматриваются задачи теории упругости с неизвестной границей. Обзор работ по определению равнопрочных отверстий приведен в статье Г.П. Черепанова [7].

Следует заметить, что предельные значения  $K_{IC}$  (вязкости разрушения) и  $J$ -интеграла довольно чувствительны к небольшим вариациям химического состава и фазовой структуры материала, технологии производства, а в случае сварного шва – всех параметров сварочного процесса и последующей технологической обработки, а также истории эксплуатации конструкции. На данный момент нет общих справочников по зна-

чениям  $K_{IC}$  и  $J$ -интеграла. Наиболее активно используемым является справочник по КИН [8]. Однако существующие в отрасли нормы и правила обеспечения надежности объектов, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации, основанные на нормативном методе расчета конструкции по предельным состояниям, реализуются за счет применения зачастую неоправданных коэффициентов запаса прочности, что приводит к существенному увеличению металлоемкости. Для серьезных исследований критические значения определяются из стандартных опытов. Поэтому разработка методов конструкционного торможения трещин, позволяющих получать численные значения параметров разрушения, является актуальной задачей.

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является конечно-элементное моделирование процесса упругопластического деформирования прямоугольной пластины с трещиной, определение параметров ее разрушения. В исследуемой модели обязательным условием стал учет и сравнение сингулярности напряжений у вершины трещины при наличии концентраторов напряжения различной конфигурации.

### Основной материал исследования

Если рассматривается процесс плоской деформации, КИН, как правило, снабжают индексом  $I$ , что соответствует раскрытию трещины по нормальному типу. Наряду с КИН, в качестве параметров механики разрушения, связанных с ростом трещин, используются скорость высвобождения энергии и  $J$ -интеграл. В линейной постановке энергия и  $J$ -интеграл тождественны и связаны с КИН простыми зависимостями, поэтому КИН обычно используют для описания роста трещин.

Поле напряжений перед вершиной трещины имеет признаки особенности (сингулярности), суть которой в том, что компоненты напряжений перед вершиной трещины обратно пропорциональны корню из расстояния от ее вершины. Поэтому для моделирования такого поля и вычисления значений КИН, логически верным было бы окружить вершину трещины сингулярными элементами. Они должны представлять собой изопараметрические элементы, в которых промежуточные узлы на двух сторонах сдвинуты на грани в направлении вершины трещины. Именно такие элементы будут способны описать тот всплеск напряжений, который наблюдается в вершине трещины.

При использовании МКЭ для моделирования

раскрытия трещины с учетом упругопластического деформирования следует проанализировать контактные напряжения или перемещения в узлах, ближайших к вершине трещины (первый и второй узлы берегов трещины за ее вершиной), напряжения в вершине трещины и оценить общую податливость.

Исходные данные: прямоугольная пластина длиной 0,4 м и шириной 0,1 м с трещиной без концентраторов напряжения (рис. 1а) и с двумя отверстиями радиусом 0,01 м растягивается напряжением 1 МПа. Рассмотрены полые отверстия и отверстия, заполненные материалами с различной жесткостью (сталь, свинец, титан). В соответствии с критерием Иоффе, траектория магистральной трещины развивается в направлении плоскости действия максимальных растягивающих главных напряжений, т.е. трещина в процессе роста стремится ориентироваться в поле напряжений так, чтобы отсутствовал сдвиг образующих ее берегов.

Расположение трещины перпендикулярно действию растягивающей нагрузки; расстояние между центрами отверстий 0,38 м (рис. 1б, в). Длина трещины  $a$  изменяется, последовательно увеличиваясь от 0,12 м до 0,285 м. Материал пластины – сталь с характеристиками:  $E=1,9 \cdot 10^{11}$  Па – модуль сдвига;  $\nu=0,29$  – коэффициент Пуассона; вязкость разрушения  $K_{IC}=537,6$  Н/мм<sup>3/2</sup>.

В качестве допущения примем, что имеет место плоская деформация.

В связи с этим представляет интерес исследование напряженно-деформированного состояния пластины; вычисление коэффициента интенсивности напряжений и  $J$ -интеграла. Наличие

двойной симметрии в этой задаче позволяет ограничиться рассмотрением лишь одной четверти пластины, закрепив ее подходящим образом в узлах, расположенных на осях симметрии. Начало системы координат поместим в левый нижний угол четверти детали и будем исследовать часть пластины, лежащую в первом квадранте (рис. 2а).

Проведем цикл расчетов, предполагающий увеличение длины трещины, путем последовательного приближения вершин трещины к разгружающим отверстиям (или стопперам) от 0,09 м до 0,005 м, считая от вершины трещины до края разгружающего отверстия. Реализацию алгоритма расчета рассмотрим на примере детали с разгружающими отверстиями. Расстояние от вершины трещины до отверстия 0,01 м.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия. Запустим пакет ANSYS, установим тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «плоская деформация». Задаем свойства материала.

Строим геометрическую модель четверти пластины. В вершине трещины назначим точку (ключевую точку  $KPs$ ) концентрации напряжений: `M_M>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>>Concentrat KPs>Create`. Указываем вершину трещины.

Разбиваем область на конечные элементы. Предупреждение о том, что в модели присутствуют элементы со смещенными промежуточными узлами, следует проигнорировать. Получаемая при этом разбивка показана на рис. 2б. Сингулярные элементы в вершине трещины хорошо видны при масштабировании (рис. 2в).

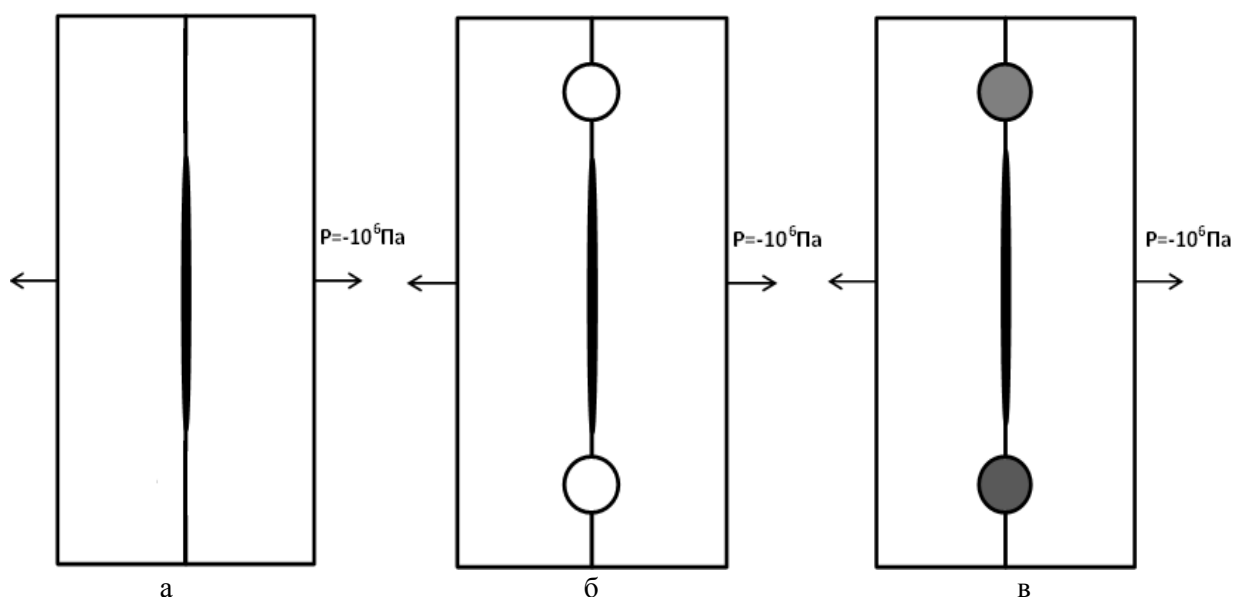


Рис. 1. Исследуемая деталь:

$a$  – с трещиной;  $b$  – с разгружающими отверстиями;  $v$  – с применением стопперов

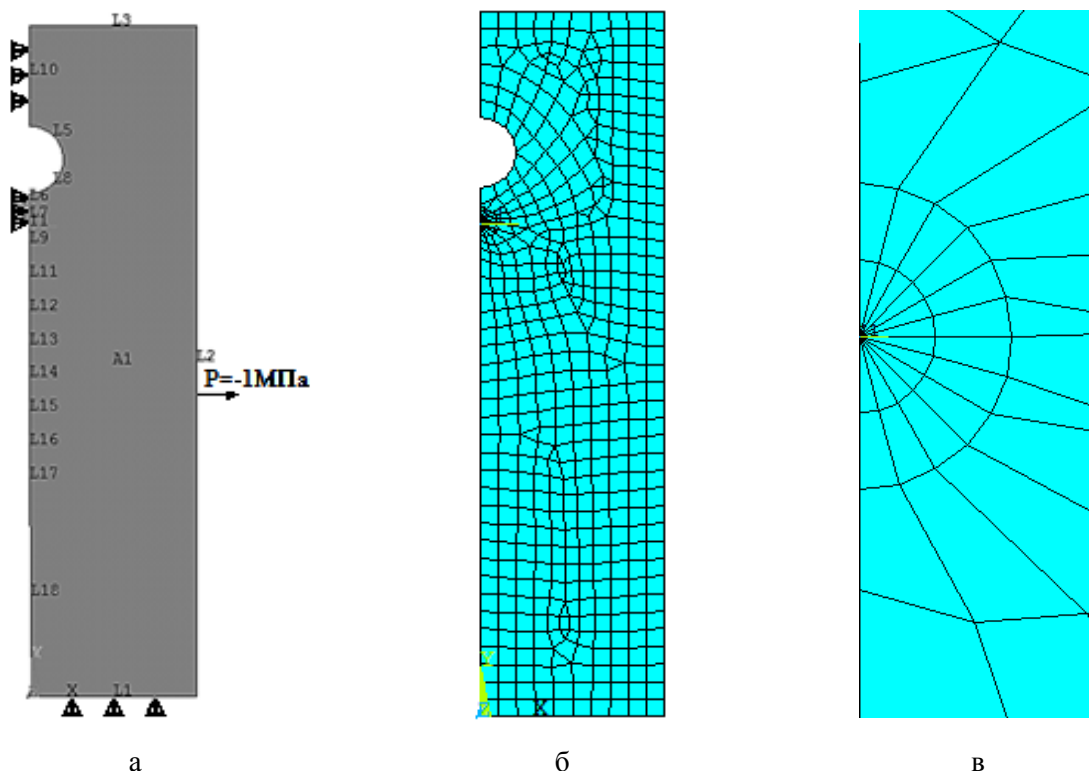


Рис. 2. Четверть исследуемой детали:  
 а – приложение нагрузки; б – КЭ сетка;  
 в – масштаб КЭ сетки в вершине трещины, сингулярные элементы

Для удобства выполнения следующей операции отображаем на экране линии: `U_M>Plot>>Lines`.

Задаем граничные условия симметрии: `M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>>Displacement>On Lines`. Указываем лежащие на вертикальной оси симметрии линии, (линию, представляющую поверхность трещины, не указываем). В списке DOFs to be constrained выбираем UX. Указываем лежащую на горизонтальной оси симметрии линию. В списке DOFs to be constrained выбираем UY.

Далее следует последовательно приложить необходимую нагрузку: `M_M>Solution> Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines`. Выбираем внешние вертикальные границы прямоугольной области. В поле Value Load PRES value для задания растягивающей нагрузки вводим отрицательное значение -1 МПа. Запишем в компонент CRACK узел в вершине трещины. В поле Component name вводим метку CRACK, а в списке Component is made of выбираем строку Nodes. Инициализируем вычисление J-интеграла. Для этого в строке ввода команд, не выходя из модуля Solution, с помощью клавиатуры введем следующие команды:

`CINT, NEW, 1!` Определение уникального номера трещины =1;

`CINT, CTNC, CRACK!` Указание узла вершины трещины;

`CINT, NCON, 4!` Задание числа контуров интегрирования;

`CINT, SYMM, ON!` Включение условия симметрии для трещины;

`CINT, NORM, 0, 1!` Определение нормали к плоскости трещины, плоскость трещины перпендикулярна оси OX (ось 1) глобальной декартовой системы координат (с номером 0).

Вернем все объекты модели в активный набор: `U_M>Select>Everything`. Запустим задачу на счет: `M_M>Solution>Solve>Current LS`. Сообщение о присутствии элементов со смещенными промежуточными узлами закрываем. Заходим в модуль General Postprocessor и отображаем на экране поле напряжений по Мизесу и нормальные напряжения (рис. 3а, б).

Для отображения результатов на полной модели воспользуемся командой `U_M> PlotCtrls>>Style>Symmetry Expansion>Periodic/Cyclic Symmetry`. Выбираем опцию 1/4 Dihedral Sym (рис. 4а, б).

Для возвращения к расчетной модели следует выполнить предыдущую команду и выбрать опцию No Expansion.

Выведем на экран список значений J-интеграла для всех заданных контуров интегрирования (размерность Н/мм=кДж/м<sup>2</sup>). Не выходя из модуля General Postprocessor, в строке ввода команд набираем: `PRCINT, 1! 1` – идентификационный номер трещины.

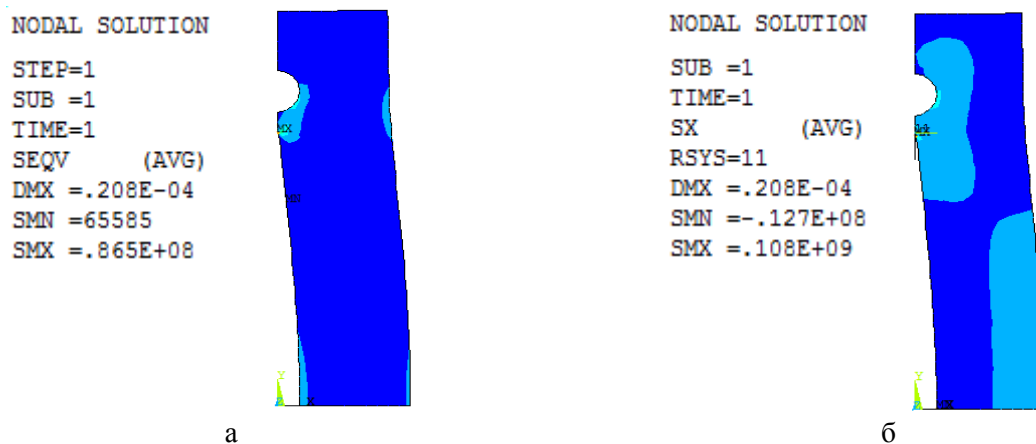


Рис. 3. Четверть исследуемой детали:  
 а – напряжения по Мизесу; б – нормальные напряжения

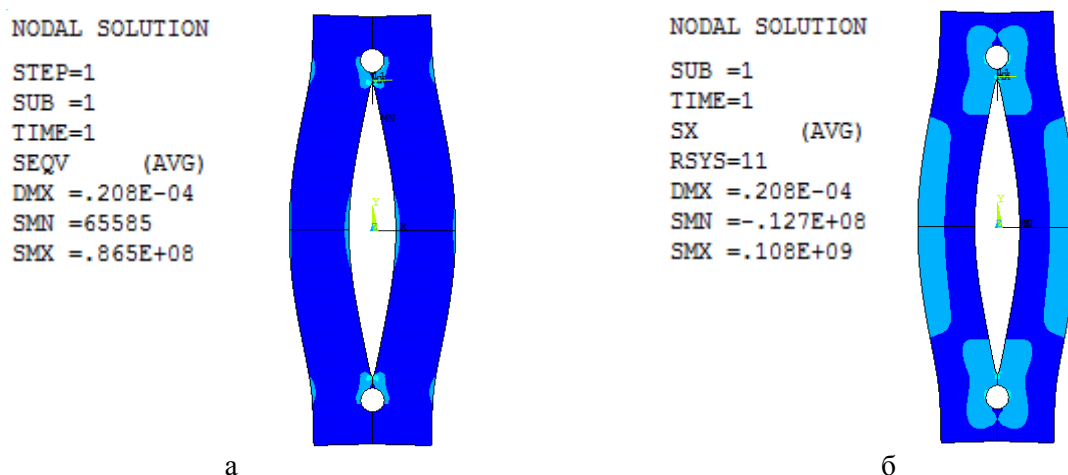


Рис. 4. Исследуемая деталь:  
 а – напряжения по Мизесу; б – нормальные напряжения

После нажатия клавиши Enter на экране дисплея в отдельном текстовом окне появится список рассчитанных значений  $J$ -интеграла в Н/м по всем требуемым четырем контурам: Contour Values=75,736; 75,59; 75,771; 75,743. Здесь числовые значения определяют спецификацию контуров по мере удаления от вершины трещины. Значение  $J$ -интеграла по первому контуру, охватывающему первый ряд примыкающих к вершине трещины элементов, получается менее точным. Последний контур при используемой сетке элементов не достигает внешней границы, что не вносит погрешности в вычисления.

Значения демонстрируют хорошую инвариантность, т.е. независимость от выбора контура интегрирования. Значит, в качестве среднего значения  $J$ -интеграла можно принять 75,743 Н/м.

Вычислим коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ . Для этого определим локальную систему координат в вершине трещины по трем узлам, затем зададим траекторию вдоль поверхности трещины по трем узлам.

Выведем на экран значения коэффициентов интенсивности напряжений: M\_M>General Post-

proc>Nodal Calcs>Stress Int Factr. В списке Disp extrapolat based on (модель аппроксимации перемещений) выбираем значение Plane Strain (плоская деформация); в поле Model type (тип модели трещины) указываем Half-symm b.c. (модель половины трещины с граничными условиями симметрии). При этом появляется текстовое окно, где содержится сводная информация по трещине и представлены значения коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$ ,  $K_{II}$  и  $K_{III}$  (размерность Н/м<sup>3/2</sup>),  $K_I=3,9635E+06$ .

По предложенному алгоритму проведем цикл расчетов для модели с разгружающими отверстиями, выполненными вдоль вертикальной оси симметрии на некотором расстоянии от вершины трещины. Количество расчетов соответствует количеству ключевых точек – концентраторов напряжения, предварительно созданных на модели. Такие отверстия не вносят нежелательный эксцентриситет, более просты в исполнении и не требуют дополнительных затрат материала.

Дополнительно была построена и исследована деталь после входа трещины в отверстие (рис. 5а, б).

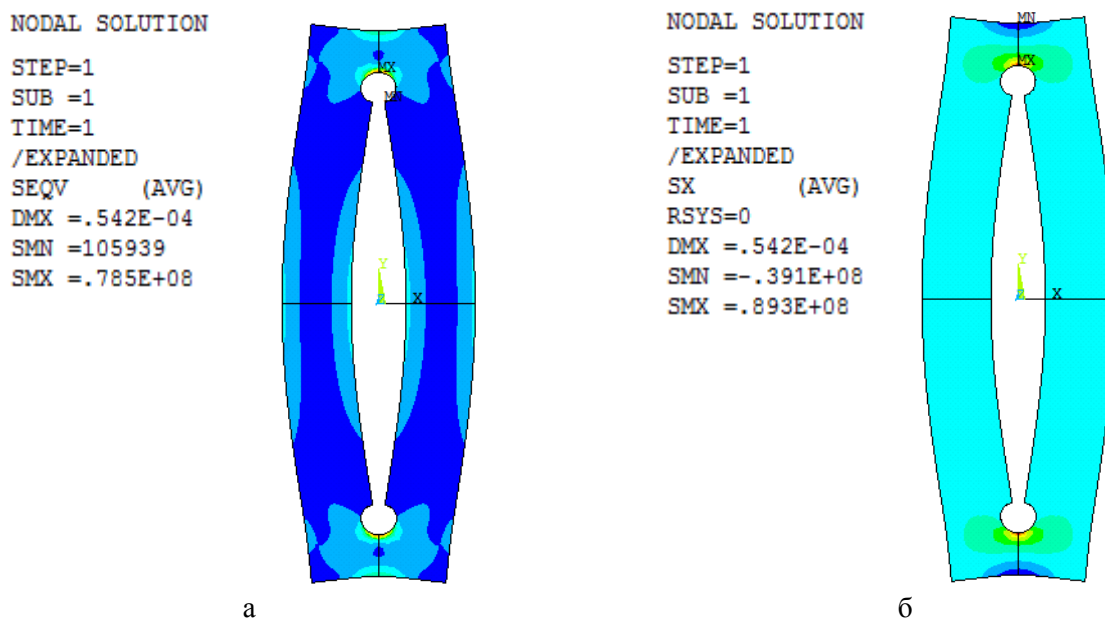


Рис. 5. Вход трещины:  
*a* – напряжения по Мизесу; *б* – нормальные напряжения

Анализируя данные рис. 5...7, можно отметить следующее влияние разгружающих отверстий на развитие усталостных трещин: если на пути развивающейся усталостной трещины встречается круглое отверстие, то отмечается тормозящий эффект этого отверстия. Это происходит за счет существенного уменьшения концентрации напряжений (см. рис. 5а, б), проявляющийся после входа в него трещины. Однако он практически полностью компенси-

руется ускорением роста трещины при ее приближении к отверстию за счет увеличения коэффициента интенсивности напряжений (рис. б) и увеличением размера повреждения за счет присоединения к повреждению самого отверстия (см. рис. 5а, б). Следует отметить, что для расчетной модели, представленной на рис. 5а, б, алгоритм расчета КИН неприменим, поэтому вычисления проводились для сплошного тела с полостью.

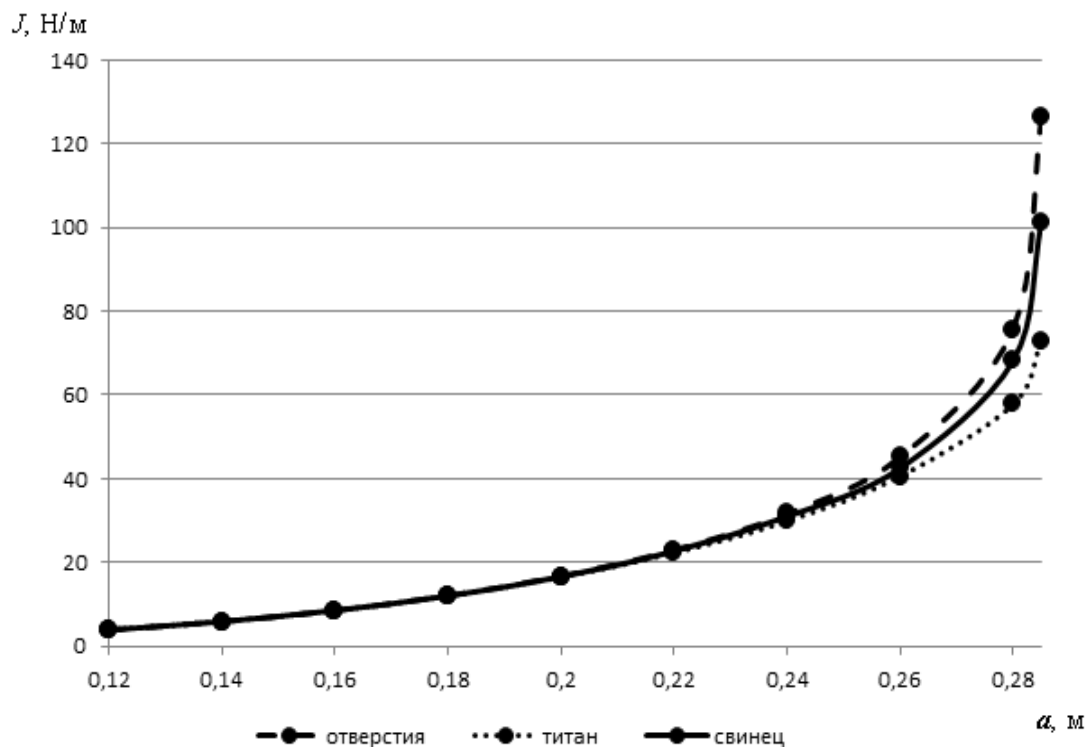


Рис. 6. Изменение значения *J*-интеграла при увеличении длины трещины

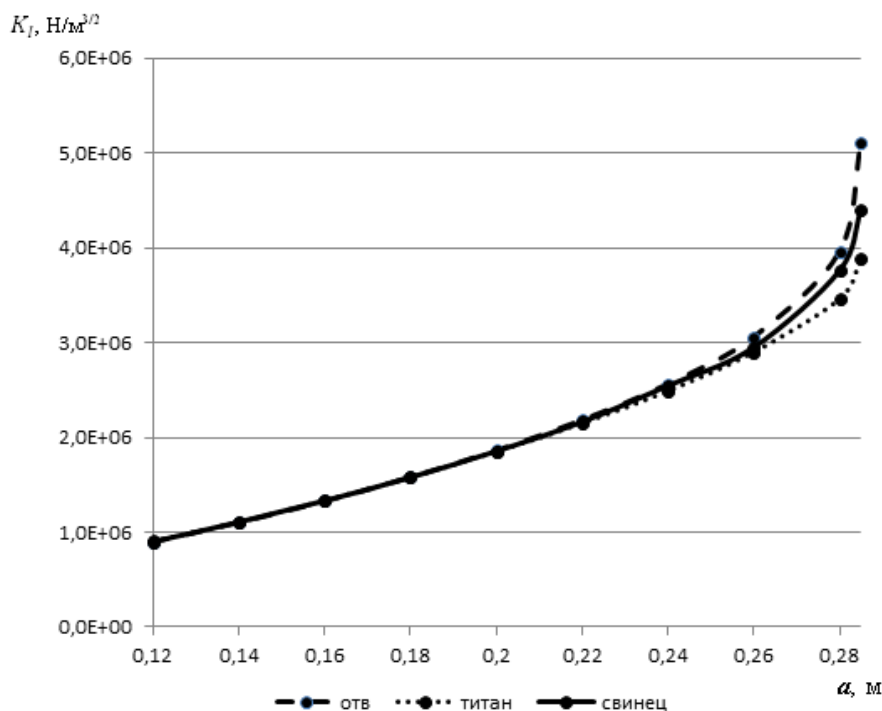


Рис. 7. Изменение значения  $K_I$  при увеличении длины трещины

Сравнивая воздействие разгружающих отверстий и близлежащих к вершине трещины заплат на ее развитие, можно заметить, что использование заплат не приводит к существенной стабилизации трещины, однако снижает значения  $K_I$  и  $J$ -интеграла. Причем тем сильнее, чем более жесткий материал использовался в качестве заплаты. Т.е. преобладающая жесткость материала заплаты может считаться одним из основных факторов, влияющих на коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины (см. рис. 6, 7).

Очевидно, что заплаты следует устанавливать симметрично с обеих сторон листа, иначе могут появиться изгибные напряжения, которые снизят и даже совсем ликвидируют подкрепляющий эффект заплаты [9,10]. Таким образом, наличие препятствий в виде более жестких заплат снижает значения  $K_I$ , что позволяет увеличить значение предельной нагрузки, в результате чего трещина остается устойчивой в более широком диапазоне нагрузок.

**Выводы**

Одной из важнейших прикладных областей, где могут быть применены приведенные результаты, является управление поведением трещины. Сущность подобного управления заключается в принятии определенных проектно-конструкторских решений с целью уменьшения скорости роста уже существующих трещин или недопущения появления новых. Присутствие устойчивых трещин в конструкциях, работающих при

определенных режимах нагружения, намного менее опасно, а искусственное усиление таких конструкций существенно повышает их ресурс.

Представляет интерес дополнительное исследование влияния формы и размеров заплат и разгружающих отверстий, моделирование ребер жесткости и их влияние на распространение трещины, учет пластичности при проведении расчетов. Также представляется важным исследование взаимного геометрического расположения разгружающих элементов модели и трещин и использование оптимизационных возможностей программного комплекса ANSYS.

**Список литературы**

1. Судакова, К.Ю. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции / К.Ю. Судакова, И.Л. Казюкевич // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №3. – С. 8-10.
2. Мясникова, А.А. Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке / Master’s Journal. – 2012. – №1. – С. 50-54.
3. Zhiyong, L. Detection of GTA welding quality and disturbance factors with spectral signal of arc light / Journal of materials processing technology. – 2009. – Vol.209. – No.10. – P. 4867-4873.
4. Королев, И.К. Численное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в упругих материалах / И.К. Королев, С.В. Петин, А.Б. Фрейдин // Вычисл.

- мех. спл. сред. – 2009. – №3. – Т.2. – С. 34-43.
5. Емельянов, О.В. Совершенствование определения коэффициента интенсивности напряжений методом малогазной тензометрии / О.В. Емельянов, А.Н. Шувалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – №3. – Т.15. – С. 32-37.
  6. Sarzosa, D.F.V. Fatigue crack growth assessments in welded components including crack closure effects: Experiments and 3-D numerical modeling / D.F.V. Sarzosa, L.B. Godefroid, C. Ruggieri // Int. J. Fatigue. – 2013. – Vol.47. – P. 279-291.
  7. Черепанов, Г.П. Обратная упругопластическая задача в условиях плоской деформации / Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1963. – №2. – С. 57-60.
  8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т.2. – 1013 с.
  9. Singh, K.D. A short summary on finite element modelling of fatigue crack closure / K.D. Singh, M.R. Parry, I. Sinclair // J. Mech. Sci. Technol. – 2011. – No.12. – Vol.25. – P. 3015-3024.
  10. Сибгатуллин, Э.С. О тензоре коэффициентов интенсивности напряжений и критериях разрушения в механике трещин // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №2. – С. 56-60.

L.P. Vovk /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Kisel

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University (Gorlovka)

### DETERMINATION OF FRACTURE PARAMETERS OF THE CRACKED PLATE WITH STRESS CONCENTRATORS IN THE PROCESS OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

**Background.** Defects divided into two classes according to the effect on the stress-strain state of structures: classic defects are defects with a finite radius of curvature at the top, and cracks or crack-like defects. Crack-like defects are the most dangerous. Crack-like defects have a sharp apex with almost zero radii. The main parameter characterizing the level of stress concentration of such defects is the stress intensity factor. Assessment of the impact of defects on the mechanical and operational properties of the object of control by conducting destructive tests is not always profitable from the economic point of view. Therefore, currently at the stage of engineering product design methods of linear fracture mechanics widely used to assess the performance and period of operation of the most important parts with crack-like defects.

**Materials and/or methods.** The methodological importance of this study is to develop an algorithm for solving the problem of calculating the stress-strain state of parts with a defect, including the study of fracture characteristics depending on the defect. Practical interest is the question of assessing the stress changes in the parts with unloading holes. The calculation of fracture toughness based on the force fracture criterion by Irvine used when building an algorithm. Calculation of the maximum stress intensity factor along the crack front carried out using the method of finite elements in the ANSYS software package. 8-node plane elements used to create a finite element model with a crack, and special singular finite elements used to describe the features along the crack front.

**Results.** The given algorithm allows calculating such strength characteristics of the control object as the values of the J-integral. The addition of unloading holes and patches close to the crack top allowed assessing their impact on the crack not leading to significant stabilization but reducing the value of the J-integral.

**Conclusion.** Thus, the obstacles in the form of stiffer patches reduce the values and allow increasing the limit load, and as a result, the crack remains stable in a larger range of loads.

**Keywords:** fracture mechanics, stress intensity factor, crack, crack-like defect, J-integral.

#### Сведения об авторах

Л.П. Вовк

SPIN-код: 9860-6682  
Телефон: +380 (71) 301-98-55  
Эл. почта: lv777@list.ru

Е.С. Кисель

SPIN-код: 7676-8943  
Телефон: +380 (71) 443-74-77  
Эл. почта: e.s.kisel@gmail.com

Статья поступила 06.11.2018 г.

© Л.П. Вовк, Е.С. Кисель, 2018

Рецензент д.т.н., проф. В.Г. Артюх