

УДК 539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В ЗОНЕ ГИБА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА

В. С. ЖЕРНАКОВ¹, И. Н. БУДИЛОВ²

¹zhvs@mail.rb.ru, ²budilov02@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.12.2016

Аннотация. Выполнен трехмерный упругий расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонегиба технологического трубопровода. Получены качественные и количественные соотношения для КИН и J -интеграла по фронту трещины с учетом ее размеров и формы фронта. Установлено влияние типоразмера трещины и ее формы, а также условного диаметрагиба на величину силовых параметров разрушения.

Ключевые слова: технологический трубопровод; гиб; прочность; напряженно-деформированное состояние, коэффициент интенсивности напряжений, интеграл Черепанова–Райса.

ВВЕДЕНИЕ

Гибы являются наиболее распространенным видом соединений в технологических трубопроводах [1]. А так как расположение дефекта оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние таких соединений, была сделана оценка влияния расположения трещины в зонегиба на напряженное состояние.

Поверхностные трещины, зародившиеся в гихах, представляют значительный интерес для специалистов по технологическим трубопроводам. Такая трещина зарождающаяся подвергается сложному воздействию от внешних нагрузок и внутреннего давления, что необходимо учитывать при эксплуатации «по техническому состоянию». Для оценки опасности таких трещин выполнен трехмерный численный эксперимент, который состоит из моделирования и последующего расчета МКЭ [2]. Наиболее полно напряженное состояние в зоне трещины можно описать с помощью интегральных характеристик таких, как коэффициент интенсивности напряжений (КИН) и J -интеграл. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I и энергетический интеграл J для эллиптической трещины рассчитывали с учетом ее формы, расположения на внешней и внутренней поверхностяхгиба технологических трубопроводов, а также с учетом фактических размеров трещины.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Фрагменты твердотельной моделигиба технологического трубопровода, показаны на рис. 1. Геометриягиба соответствует обычной практике проектирования технологических трубопроводов. Материал соответствовал 09Г2С, кроме того в расчетах учитывалась температура среды 20 °С.

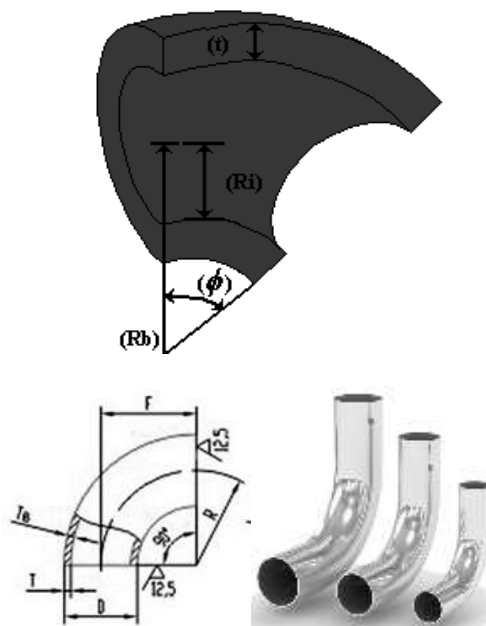


Рис. 1. Твердотельная модельгиба

В расчетах принимались следующие размеры: толщина стенки 8,0; 8,8 и 10 мм. Радиусгиба зависит от диаметра и составил 152; 305 и 610 мм соответственно для внутреннего диаметрагиба 100; 200 и 400 мм. Основные обозначения и геометриягиба показаны на рис. 1. Форма трещины в областигиба приведена на рис. 2, здесь же в таблице даны размеры эллиптической трещины, используемые в расчетах.



Рис. 2. Форма трещины

Для описанной геометриигиба технологического трубопровода был выполнен упругий расчет для оценки НДС. Твердотельная модельгиба и сетка конечных элементов для расчета показана на рис. 3 и с помощью инструмента «лупа» выделен увеличенный участок в зонегиба. Во всех частях КЭ моделигиба технологических трубопроводов использовали четыре элемента по толщине стенки. К внутренней поверхностигиба прикладывали нагрузку в виде давления. Его величина равна расчетному давлению $P_D=5,0$ МПа.

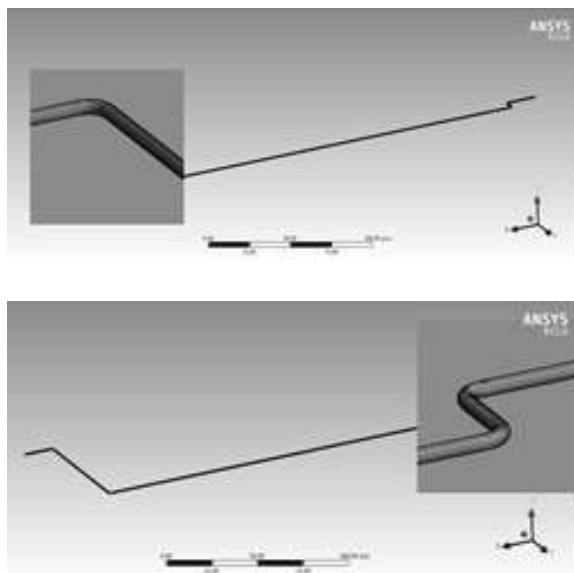


Рис. 3. Конечно-элементная сетка технологического трубопровода

При визуальном осмотре вгиба технологических трубопроводов после неразрушающего контроля, были обнаружены поверхностные дефекты (трещины) на расстоянии 5–10 мм от катета сварного шва, как это показано на рис. 4.

В модели были учтены граничные условия. Модель угловой областигиба технологических трубопроводов при наличии трещины имела 130 689 степеней свободы. Расчет силовых и энергетических параметров разрушения выполнялся на примерегиба технологических трубопроводов (рабочее давление внутри трубопровода составляло 5,0 МПа, рабочая температура 20°C, рабочая среда – аммиачная вода).

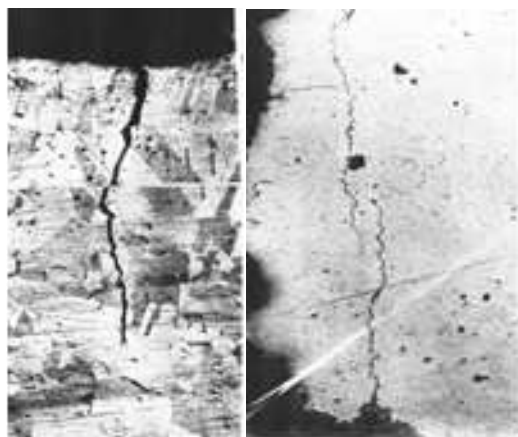


Рис. 4. Трещина вгиба технологического трубопровода

Фрагмент КЭ сетки, которая в дальнейшем использовалась для расчетов МКЭгиба технологических трубопроводов с трещиной, показан на рис. 3. Вдоль фронта трещины располагалось шесть элементов, восемь элементов были распределены в радиальном направлении около кончика трещины для моделирования разрушения и сингулярности напряжения типа около кончика трещины [3].

Конечно-элементная модель (КЭМ)гиба технологического трубопровода с трещиной состояла из 65970 двадцатиузловых изопараметрических элементов и 123000 узлов. КЭ модельгиба с эллиптической трещиной были получены с помощью программы **FEA-Crack** [4]. Все расчеты были выполнены с использованием открытых КЭ кодов **WARP3D** [5].

На рис. 5 приведено общее НДС в виде изополос эквивалентных напряжений в технологическом трубопроводе с учетом среды и граничных условий.

Модель трещины. Область с эллиптической трещиной описывалась изопараметрическими элементами второго порядка и задавалась отдельно от основной модели с помощью инструментария **FEA-Crack**. В результате образовалась гибридная конечно-элементная модель ЦК с эллиптической трещиной.



Рис. 5. Поля напряжений в гibe технологического трубопровода при действии эксплуатационных нагрузок ($\sigma_{eqv} = 299,5$ МПа)

Гиб с трещиной с радиально-кольцевой структурой КЭ показан на рис. 6 и 7 с различным увеличением. Трещина моделировалась в форме эллипса с параметрами $2c = 30 - 60$ мм, $a = 4$ мм. Ориентацию трещины выбирали так, чтобы ось X располагалась вдоль короткого радиуса эллипса, а ось Z – вдоль длинной стороны фронта трещины.



Рис. 6. Гибридная сетка КЭ гiba с учетом трещины

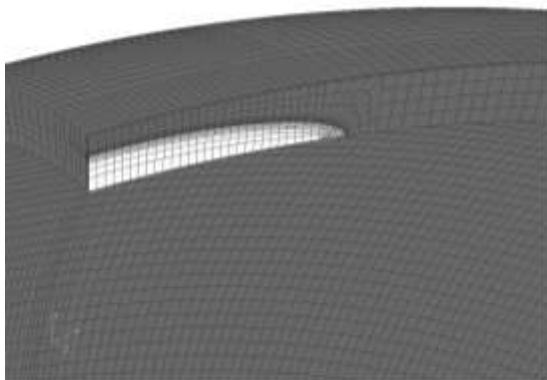


Рис. 7. Гибридная сетка КЭ в зоне трещины

Теория метода. Коэффициент интенсивности упругих напряжений первого рода K_I как было отмечено выше, рассчитывали по скорости высвобождения энергии, определяемой методом виртуального продвижения трещины [6]. На рис. 8 показан фронт трещины и контур интегрирования для расчета интеграла Черепанова–Райса.

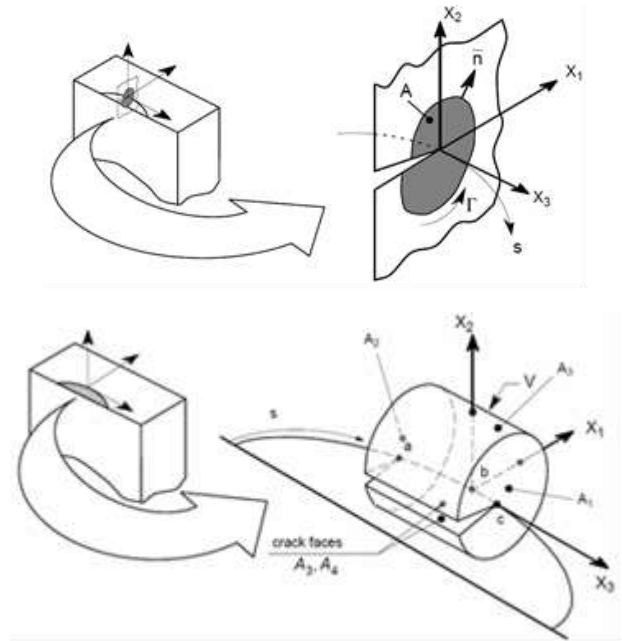


Рис. 8 Контур вокруг фронта трещины

Напряжения и деформации в области дефекта типа эллиптическая трещина находятся из соотношений [7]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_1(\Theta) \\ f_2(\Theta) \\ f_3(\Theta) \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_4(\Theta) \\ f_5(\Theta) \\ f_6(\Theta) \end{bmatrix} + O(r),$$

где r, Θ – полярные координаты с полюсом в вершине трещины; K_I, K_{II} – коэффициент интенсивности напряжений.

Расчет силовых критериев и интеграл Черепанова–Райса выполнялся по известным формулам [8]:

$$K_I = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{\pi}{2L}} \Delta U_i, \quad i = 1, 2, 3,$$

где ΔU_i – функция перемещения в вершине трещины.

Энергетический интеграл вычислялся по формуле:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \sigma_{ij} u_j \frac{\partial U_i}{\partial x} dS \right)$$

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты выполненного расчета МКЭ по оценке силовых и энергетических параметров разрушения позволили выявить качественные и

количественные закономерности с учетом размеров трещины и ее формы фронта. Размеры трещины варьировались $2C=30; 40; 50$ и 60 мм, $a=4$ мм.

Изменение K_I и J -интеграла по фронту трещины показано на рис. 9, где $\phi=\pi/\varphi 2$ – относительный угол по фронту трещины, измеряемый от конца трещины, находящегося на поверхностигиба. Для анализируемой нами глубины трещины с геометрическими параметрами (a – глубина, $2C$ – длина трещины) было установлено, что коэффициент интенсивности напряжений первого рода K_I постоянно изменяется вдоль фронта трещины за исключением небольшого участка около каждой из свободных поверхностей (при выходе трещины на поверхность).

Влияние длины и глубины трещины. Не разрушающими методами контроля, часто выявляются различные по геометрии трещины, расположенные в зонегиба технологических трубопроводов (рис. 4). Поэтому представляется целесообразным оценить влияние размеров трещины (длины и глубины), а также места залегания трещины в зонегиба на силовые параметры разрушения. В данном расчете трещина располагалась в зонегиба технологического трубопровода, как это показано на рис. 6. На рис. 9, *а, б* показаны результаты расчета силовых параметров разрушения, выполненные на КЭ моделигиба технологических трубопроводов с эллиптической трещиной, расположенной на внутренней стороне с учетом ее размеров. Длина трещины $2C$ варьировалась от 30 до 60 мм при максимальной глубине трещины $a=4$ мм.

Установлено, что при изменении глубины, силовые параметры разрушения достигают максимума на максимальной глубине по фронту трещины. Было установлено, что максимальное значение K_I равно $400 \text{ Н} \times \text{мм}^{-3/2}$, что характерно для трещины, расположенной на внутренней сторонегиба.

При длине трещины с 40 до 60 мм на максимальной глубине по фронту трещины, при $a=4$ мм наблюдается рост КИН первого рода в 1,23 раза. При изменении глубины трещины с 2,0 до 4,0 мм на максимальной глубине по фронту трещины при $2C=60$ мм наблюдается рост КИН первого рода в 1,6 раза.

Влияние формы трещины и места ее расположения. Трещина может образовываться как на внутренней, так и на внешней сторонегиба и иметь различную форму, что приведет к изменению значений силовых параметров разрушения, и соответственно повлияет на остаточную живучесть такого соединения. Поэтому

был выполнен численный эксперимент по оценке влияния формы трещины и места ее расположения на силовые параметры разрушения.

На рис. 9 показан фрагмент твердотельной и конечно-элементной моделигиба технологического трубопровода с эллиптической трещиной, расположенной на внешней сторонегиба.

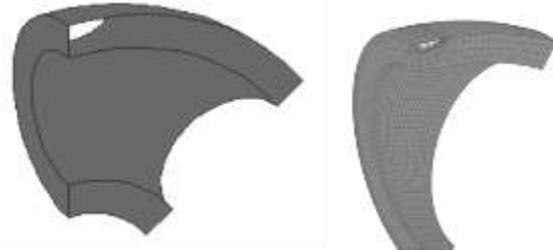


Рис. 9. Фрагмент 3D КЭ-моделигиба (*а*) и твердотельной модели (*б*) с поверхностной трещиной, расположенной на внешней стороне

Результаты расчета силовых параметров разрушения в области трещины расположенной на внешней и внутренней сторонах приведены на рис. 10.

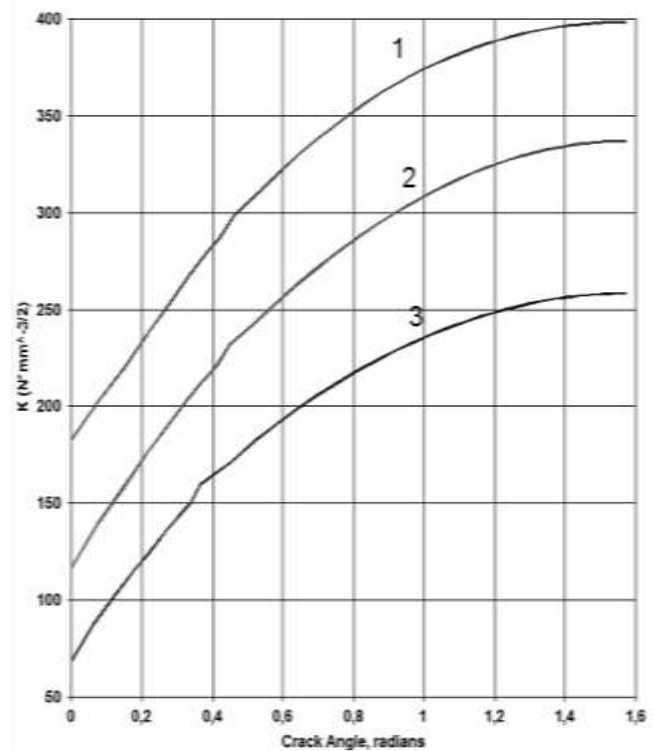


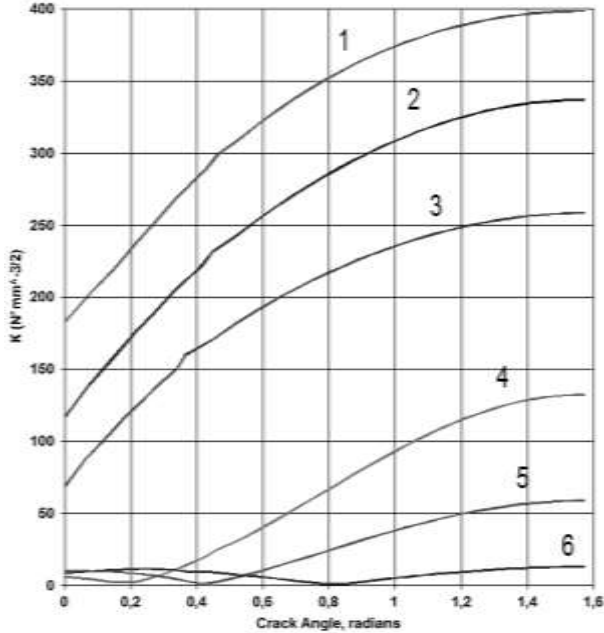
Рис. 10. Зависимость изменения силовых параметров разрушения для трещины, расположенной на внутренней сторонегиба:

- 1 – $a=4$ мм; 2 – $a=3$ мм;
3 – $a=2$ мм; при $2c=60$ мм

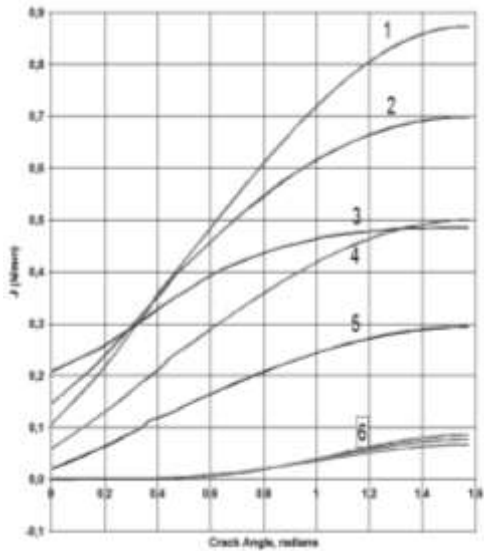
Влияние размеров трещины и ее формы при ее расположении на внутренней и внешней сторонах, также показано на рис. 10. При этом гео-

геометрия трещины варьировалась по длине $2C=40-80$ мм, по глубине $a=2,0-4,0$ мм.

Из рис. 11 видно, что зависимости коэффициента интенсивности первого рода и J -интеграла, рассчитанные для трещины, расположенной на внутренней стороне изменяется, как по фронту трещины, так и зависят от размеров и формы трещины. Так для эллиптической трещины КИН первого рода K_I достигает максимума в наиболее удаленной по фронту точке фронта трещины.



a



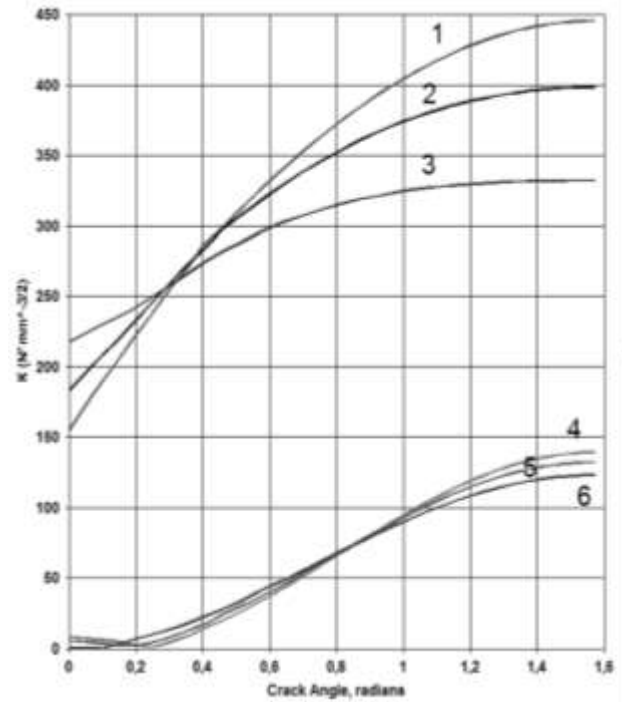
б

Рис. 11. Зависимость K_I (*a*) и J -интеграла (*б*) с учетом глубины трещины, расположенной на внешней (*1-3*) и внутренней (*4-6*) стороне гiba:
 1 – $a=4$ мм; 2 – $a=3$ мм;
 3 – $a=2$ мм; при $2c=60$ мм

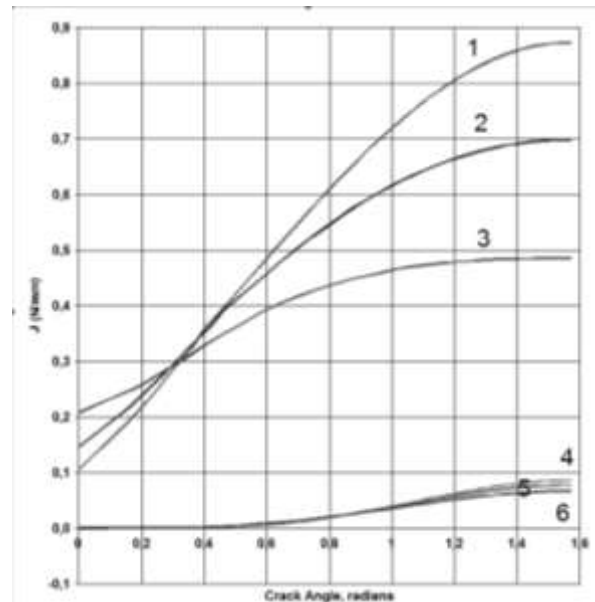
Для трещины с параметрами $2C=60$ мм, $a=6$ мм и при ее расположении на внутренней

стороне по сравнению с расположением на внешней стороне увеличение в максимально удаленной точке фронта трещины достигает 3,0 раза.

На рис. 12 показаны зависимости приведенного КИН первого рода для эллиптической формы трещины с учетом изменения ее длины и месторасположения.



a



б

Рис. 12. Зависимости K_I (*a*) и J -интеграла (*б*) с учетом длины трещины, расположенной на внешней (кривые *4-6*) и внутренней (кривые *1-3*) стороне гiba:
 1, 4 – $2c=80$ мм; 2, 5 – $2c=60$ мм;
 3, 6 – $2c=40$ мм; $a=4$ мм

Установлено, что наибольшее значение коэффициента интенсивности напряжений первого рода K_I достигается на максимальном удалении по фронту трещины. Сравнение зависимостей силовых параметров разрушения для трещины различной длины, расположенной на внешней и внутренней сторонах гйба показало (рис. 13), что при внутреннем расположении трещины значения КИН первого рода растут, отличие составляет 3,2 раза для точки фронта максимальной глубины.

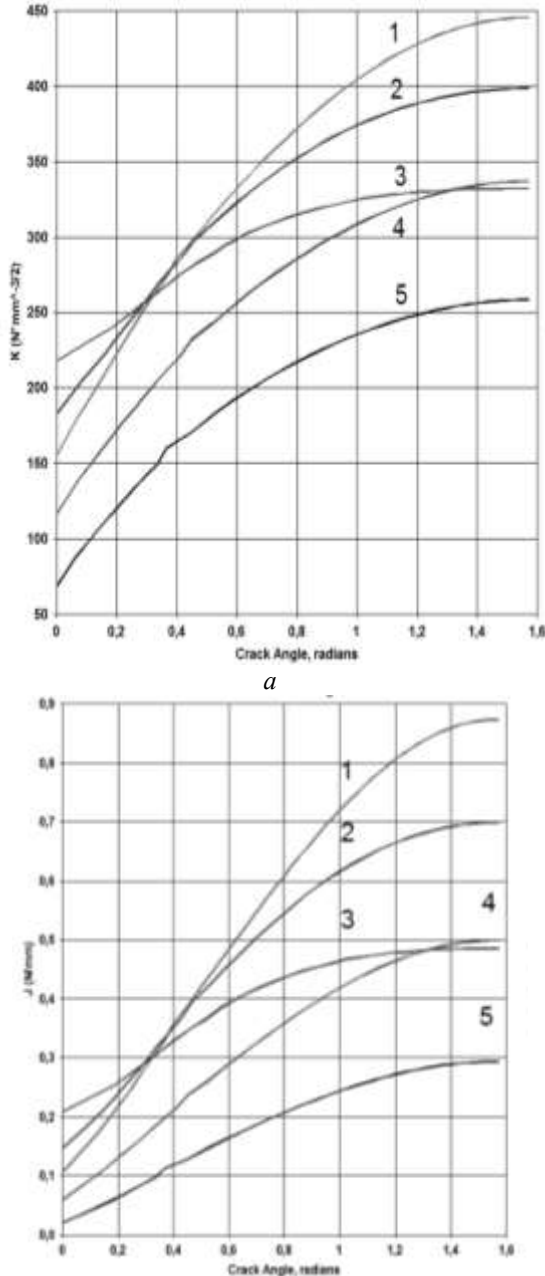


Рис. 13. Зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого рода (*a*) и *J*-интеграла (*б*) с учетом длины и глубины трещины, расположенной на внешней стороне гйба:
 1 – $2c=80$ мм; 2 – $2c=60$ мм; 3 – $2c=40$ мм; $a=4$ мм; 4 – $a=3$ мм; 5 – $a=2$ мм; $2c=60$ мм

В практике эксплуатации и проектирования встречаются гйбы различных типоразмеров, поэтому особый интерес представляет оценка силовых параметров разрушения для гйба с учетом его типоразмера.

Рассмотрим влияние типоразмера гйба (условного диаметра D_y на силовые параметры разрушения. На рис. 14 показаны зависимости изменения КИН первого рода в зависимости от условного диаметра гйба: $D_y=100 \times 6,3$; $D_y=200 \times 8,0$; $D_y=400 \times 8,8$ и глубины трещины от 2 до 4 мм при постоянной длине $2C=60$ мм.

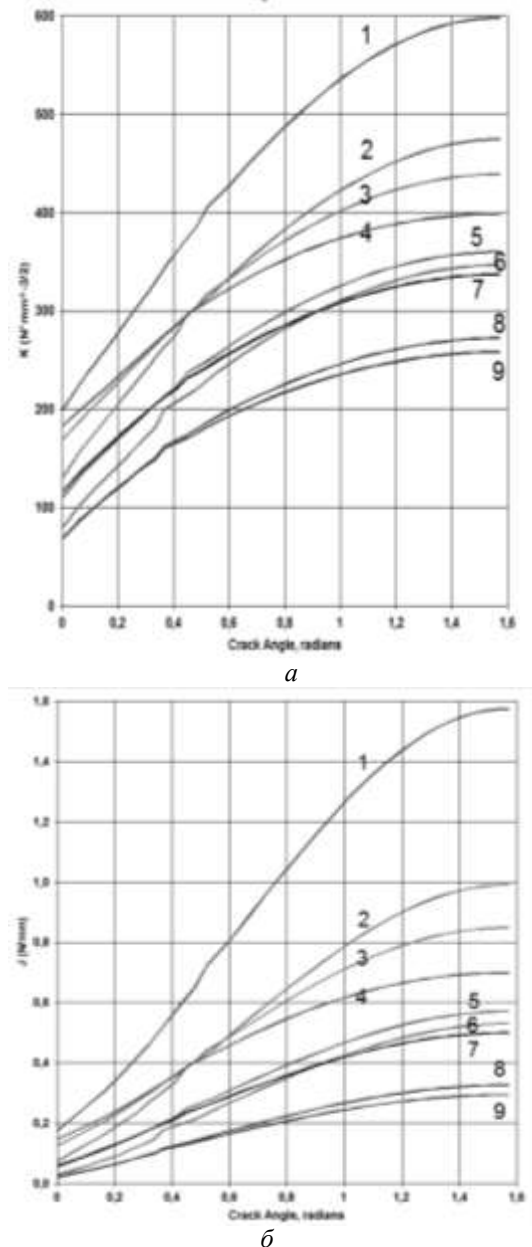


Рис. 14. Зависимость изменения силовых (*a*) и энергетических (*б*) параметров разрушения для эллиптической формы трещины на внешней стороне с учетом типоразмера гйба:
 1, 4, 7 – $a=4$ мм; 2, 5, 8 – $a=3$ мм;
 3, 6, 9 – $a=2$ мм; $2c=60$ мм;
 7–9 – $D_y=100 \times 6,3$ мм; 4–6 – $D_y=200 \times 8,0$ мм;
 1–3 – $D_y=400 \times 8,8$ мм;

Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 14 выявило изменение поведения силовых параметров разрушения в зависимости от типоразмерагиба и формы трещины.

Для трещины, расположенной на внутренней сторонегиба технологических трубопроводов силовые параметры разрушения растут с ростом условного диаметрагиба D_y . Так для типоразмера $D_y=400 \times 8,8$ мм максимальное значение КИН первого рода составляет $600 N \times \text{мм}^{-3/2}$.

Получено, что в зависимости от условного диаметрагиба коэффициент интенсивности напряжений первого рода K_I по абсолютному значению может изменяться более, чем в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен упругий расчет силовых параметров разрушения длягиба технологического трубопровода с эллиптической трещиной, расположенной как на внешней, так и на внутренней поверхностигиба. Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого рода и энергетического интеграла с учетом формы трещины и ее размеров, месторасположения и типоразмерагиба. Показано, что для трещины, расположенной на внутренней сторонегиба, коэффициент интенсивности напряжений первого рода может изменяться (возрастать) по фронту трещины в 3,6 раза и может достигать максимальных значений, в наиболее удаленной точке фронта трещины. При этом наибольшую опасность представляют собой трещины, расположенные на внутренней поверхностигиба и с ростом типоразмера эта опасность возрастает, а силовые параметры разрушения растут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. [ГОСТ Р 52857.5-2007. Vessels and vehicles. Norms and methods of strength calculation. Calculation of shells and the bottoms from the effects of bearing loads.].
- Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L. The Finite Element Method. Fourth Edition. Vol. 1. Basic Formulation and Linear Problems. London: McGraw-Hill, 1990. P. 249.
- Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008. 256 с. [Е. М. Morozov, G. P. Nikishkov. Metod finite element mechanics razrusheniya. 2 th izd. M.: LKI Publishing / URSS, 2008.]
- FEA-CRACK User Manual v 3.2. 3D Finite Element Software for Cracks. Version 3.0. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.questintegrity.com.pdf> (дата обращения: 07.02.2017). [Fea-Crack User Manual v 3.2. 3D Finite Element Software for Cracks. Version 3.0. (2017.Feb.07). [Online]. Available: <http://www.questintegrity.com.pdf>]
- WARP-3D User's Guide 3-d Nonlinear Finite Element Analysis of Solid to Model Fracture Processes 15.8. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.questintegrity.com.pdf> (дата обращения: 07.02.2017). [WARP-3D User's Guide 3-d Nonlinear Finite Element Analysis of Solid to Model Fracture Processes. Version 3.0. (2017.Feb.07). [Online]. Available: <http://www.questintegrity.com.pdf>]
- Gosz M., Dolbow J., Moran B. Domain Integral Formulation for Stress Intensity Factor Computation Along Curved Three-Dimensional Interface Cracks // International Journal of Solids and Structures. 1998. Vol. 35. pp. 1763–1783.
- Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т. // под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 1060 с. [Stress intensity factors handbook in 2 Volumes/ Y. Murakami. Moscow. 1990-1060p.]
- Bergman. M. Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1995. Vol. 18. pp. 1155-1172.

ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, зав. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.- мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Проф., засл. деят. науки РФ, чл.-кор. АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

БУДИЛОВ Игорь Николаевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ 1998). Иссл. в обл. механики разрушения, прочности элементов ГТД и нефтехимических ТУ.

METADATA

Title: Simulation of crack growth in the area of bending technology pipeline

Authors: V. S. Zhernakov¹, I. N. Budilov²

Affiliation:

^{1,2} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹zhvs@rb.ru, ²budilov02@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 17-23, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Performed three-dimensional elastic analysis of the stress-strain state (VAT) in the area of the bending process line. The obtained qualitative and quantitative ratio for CIN and J-integral at the crack front, given its size and shape of the front.

Keywords: process piping; died; strength; stress-strain state, the stress intensity factor, integral Cherepanov – Rice.

About Authors:

ZHERNAKOV Vladimir Sergeevich, head of the department of strength of materials. Degree in mechanical engineering. (UAI, 1967). Dr. of technical sciences in heat engines of aircraft (UGATU, 1992). Prof., Honored Scientist of Russia, Corresponding Member Academy of Sciences Rep. Bashkortostan. Research in the field of solid mechanics.

BUDILOV Igor Nikolaevich, prof. of the department of strength of materials. Dipl. engineering technology and welding equipment production (UAI, 1978). Dr. of technical sciences in heat engines of aircraft (UGATU, 1998). Studies of fracture mechanics, strength elements of turbine engines and petrochemical engineering construction.