

УДК [621.6:536.2]:539.3

РАСЧЕТ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В ОБЕЧАЙКЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

И. Н. Будилов

budilov02@mail.ru

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

Поступила в редакцию 20.04.2016

Аннотация. Выполнен трехмерный упругий расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) для эллиптической трещины расположенной в цилиндрической обечайке теплообменного аппарата. Установлено, что для эллиптической трещины силовые и энергетические параметры разрушения нелинейно изменяются вдоль фронта трещины. Получены качественные и количественные соотношения силовых параметров разрушения и J -интеграла по фронту трещины с учетом ее размеров и формы фронта.

Ключевые слова: Теплообменный аппарат; обечайка; напряженно-деформированное состояние; коэффициент интенсивности напряжений; интеграл Черепанова - Райса.

Теплообменный аппарат (ТА) предназначен для нагрева газосырьевой смеси изомеризации и представляет собой горизонтальный, однокорпусный, жесткотрубный аппарат кожухотрубчатого типа, многоходовый по трубному и межтрубному пространствам с противоточным движением сред. Газосырьевая смесь движется в межтрубном пространстве, техническая вода в трубах. Поверхность теплообмена состоит из трубок $\varnothing 20 \times 2,0$ мм, расположенных по периметру равностороннего треугольника, закрепленных в трубных досках вальцовкой и обваркой. Положение труб в корпусе фиксируется дистанционирующими решетками, которые соединены между собой маяковыми трубами. Корпус теплообменника выполнен из оболочки $\varnothing 1000$ мм. Для организации ходов по межтрубному пространству в корпусе установлены продольные перегородки.

Сырье (газосырьевая смесь) подводится в межтрубное пространство по штуцерам. Камера разделена перегородками на полости для организации ходов по трубному пространству. Аппарат устанавливается на 2 опорные стойки, одна из которых является неподвижной, а другая подвижная.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Общий вид теплообменного аппарата показан на рис. 1, а конечно-элементная 3D

модель на рис. 2. Геометрия теплообменного аппарата соответствует обычной практике проектирования сосудов давления [1]. Теплообменный аппарат был выполнен из материала 12ХМ свойства которого представлены в табл. 1.

В расчетах учитывалась температура среды в межтрубном пространстве равной 480 °С. Допустимые напряжения для данного материала при температуре 160 °С равно 145,5 МПа, при 480 °С равно 114,0 МПа.

Таблица 1

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Характеристики			
	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Модуль Юнга, $E, \text{МПа}$	Коэффициент Пуассона ν	Предел текучести, $\sigma_T, \text{МПа}$
20	7850	210000	0,36	440,0
300	7760	195000	0,36	290,0
500	7690	179000	0,36	235,0

Механические свойства в промежутке температур от 20 °С до 500 °С определялись линейной аппроксимацией.

В расчетах принимались следующие размеры: толщина стенки аппарата равна 21 мм, диаметр обечайки 1000 мм, диаметр штуцера 300 мм. Форма трещины в области катета сварного шва приварки штуцера к обечайке ТА приведена на рис. 3.

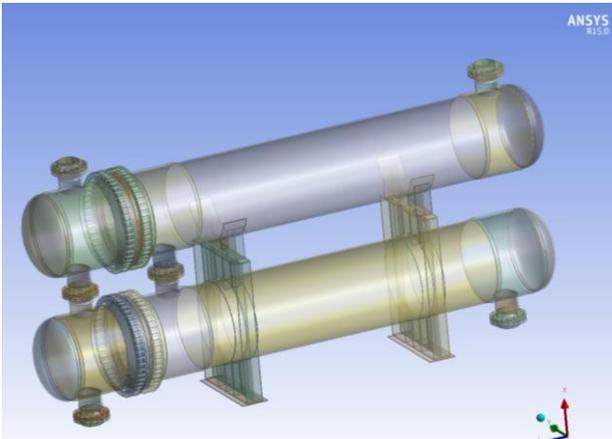


Рис. 1. Общий вид теплообменного аппарата

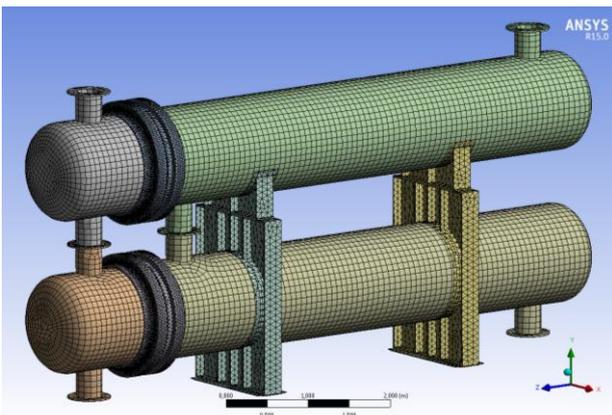


Рис. 2. Конечно-элементная 3D модель

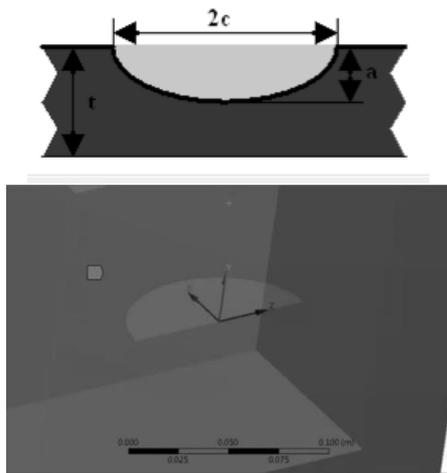


Рис. 3. Форма трещины и ее размеры

Все расчеты были выполнены в статической постановке в пакете *ANSYS/Workbench* [2]. Один из вариантов сетки конечных элементов для полноразмерного объекта теплообменного аппарата приведен на рис. 6, в.

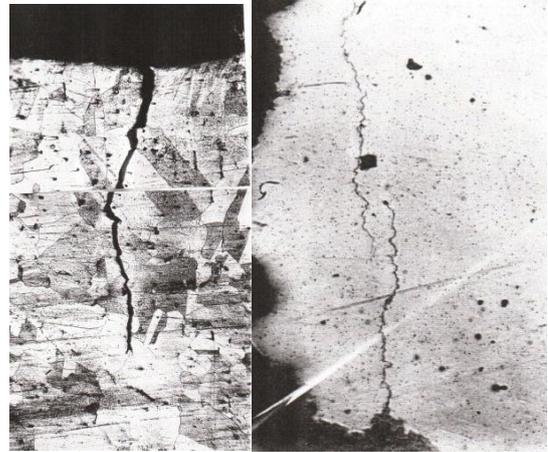


Рис. 4. Примеры трещин

Расчетные параметры конечно-элементной модели. На первом этапе был выполнен упругий расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) теплообменного аппарата МКЭ. Твердотельная модель теплообменного аппарата, граничные условия и сетка конечных элементов для этого расчета показана на рис. 6. На рис. 6, б приведено общее НДС в виде изополос эквивалентных напряжений в теплообменном аппарате с учетом внутреннего давления и температуры теплоносителя. Во всех частях КЭ модели ТА использовали четыре элемента по толщине стенки. К внутренней поверхности обечайки ТА прикладывали нагрузку в виде давления. Его величина равна расчетному давлению $P_D = 4,0$ МПа. Установлено, что максимальные напряжения наблюдаются в зоне сварных швов пересечения обечайки и патрубков и составляет 86,18 МПа.

При визуальном осмотре в сварном соединении пересечения обечайки и патрубка ТА, после проведенного АЭ контроля, были обнаружены поверхностные дефекты (трещины), (см. рис. 4). Сетка КЭ, которая в дальнейшем использовалась для расчетов МКЭ в зоне сварного шва с трещиной показана на рис. 6.

Теория метода расчета. Коэффициенты интенсивности упругих напряжений первого, второго и третьего рода K_1 , K_2 и K_3 , как было отмечено выше, рассчитывали по скорости высвобождения энергии, определяемой методом виртуального продвижения трещины [2–3].

J -интеграл определяли, согласно рис. 5, по формуле:

$$J(s) = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E^*(s)} + \frac{1 + \nu(s)}{E(s)} K_{III}^2.$$

Граничные условия. Граничные условия и сетка конечных элементов показаны на рис. 6 а, в. В опорных стойках аппарата задавались ограничения перемещения по вертикали, а в зоне опоры подвижной стойки задавались контактные условия с учетом проскальзывания опорной поверхности стойки.

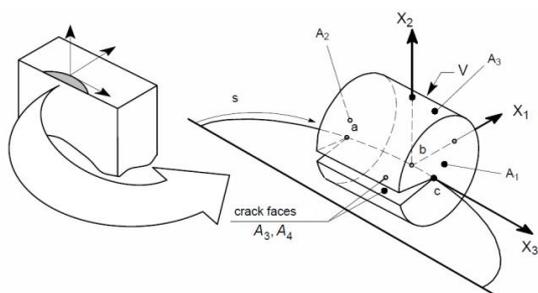
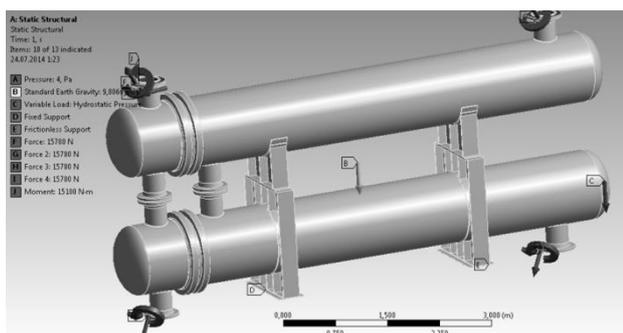
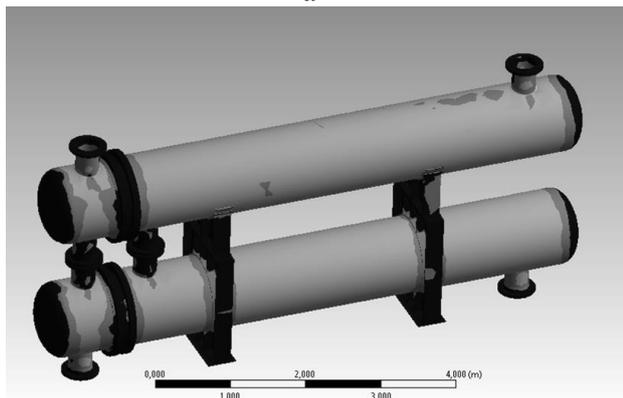


Рис. 5. КЭ-модель трещины



а



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ

Неразрушающими методами контроля часто выявляются различные по размеру и геометрии трещины, расположенные в зоне сварного шва приварки патрубка к обечайке ТА. Поэтому представляется целесообразным оценить влияние размеров трещины (длины и глубины), а также места залегания трещины на силовые и энергетические параметры разрушения. На рис. 8 показана область раскрытия трещины и изополюсы перемещений, полученные в результате численного моделирования по методике [2, 3].

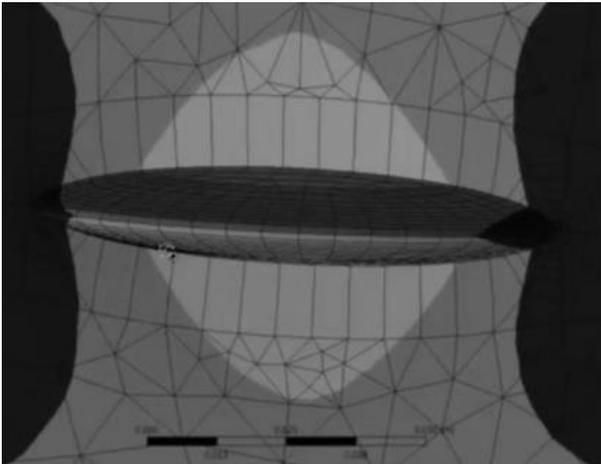


Рис. 8. Раскрытие трещины под нагрузкой

Влияние длины трещины. В данном расчете трещина в форме эллипса располагалась в зоне сварного шва приварки штуцера и обечайки теплообменного аппарата (см. рис. 6).

Рассчитанные значения силовых параметров разрушения K_I , K_2 и K_3 и J -интеграла по фронту трещины показаны на рис. 9–13, где C – длина фронта трещины, a – глубина. 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.

На рис. 9 показаны результаты расчета силовых параметров разрушения, выполненные на КЭ модели ТА с эллиптической трещиной, расположенной в зоне катета сварного шва приварки патрубка к обечайке и с учетом ее размеров и формы фронта. В данном расчете длина трещины C варьировалась от 8 до 12 мм при максимальной глубине трещины $a = 2$ мм.

Было установлено, что коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_2 и K_3 нелинейно изменяются вдоль фронта трещины и при этом зависят от формы фронта трещины и места ее расположения.

Силовые параметры разрушения K_I достигают максимума на максимальной глубине по фронту трещины (рис. 9). С ростом длины трещины $2C$ от 8 мм до 12 мм наблюдается изменение значений КИН (K_I , K_2 , K_3) и энергетического интеграла.

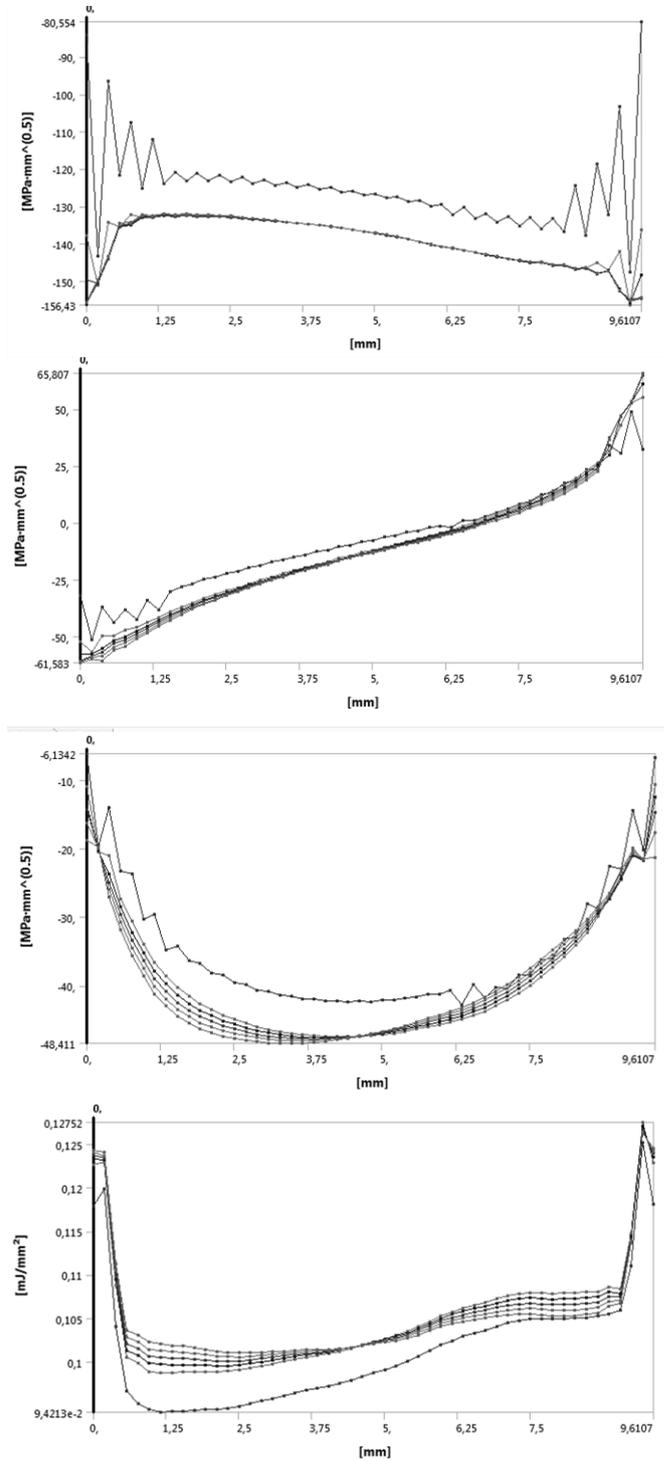


Рис. 9. Значения силовых параметров разрушения K_I , K_2 , K_3 , J -интеграл:
 $2C - 8,0$ мм; $a = 2,0$ мм

Для трещины с параметрами $2C=12$ мм наблюдается изменение характера кривых K_I и J , максимальные значения параметров в этом случае наблюдается при выходе фронта трещины на поверхность.

Полученный результат (см. рис. 9 и 10) в виде изменения силовых параметров разрушения типичен для многих трехмерных решений для эллиптических по форме трещин [4–7].

Выявлены закономерности изменения силовых параметров разрушения и энергетического интеграла в зависимости от размеров трещины в зоне катета сварного шва приварки патрубка к обечайке. Установлено, что максимальное значение K_I составляет $168,9 \text{ МПа} \times \text{мм}^{1/2}$, что характерно для трещины длиной 12 мм и глубиной 2 мм.

При изменении длины трещины с 8 мм до 12 мм при максимальной глубине по фронту трещины $a = 2$ мм рост КИН первого рода составляет более 1,42 раза.

На рис. 11 показаны поля эквивалентных напряжений в области наведенной трещины. Из рис. 11 видно, что в зоне вершины трещины наблюдается всплеск напряжений, существенный рост напряжений, также проявляется в области всего фронта трещины.



Рис. 11. Напряжения по Мизесу в области вершины трещины

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИНЫ

Трещина может образовываться и иметь различную форму, что приведет к изменению значений силовых параметров разрушения, и соответственно повлияет на эксплуатацион-

ную живучесть ТА. Форма трещины может изменяться при изменении не только длины, но и глубины трещины при неизменной ее длине, что необходимо также учитывать при анализе конструкционной прочности. Поэтому был выполнен численный эксперимент по оценке влияния формы трещины (при изменении ее глубины) на силовые параметры разрушения и J -интеграла.

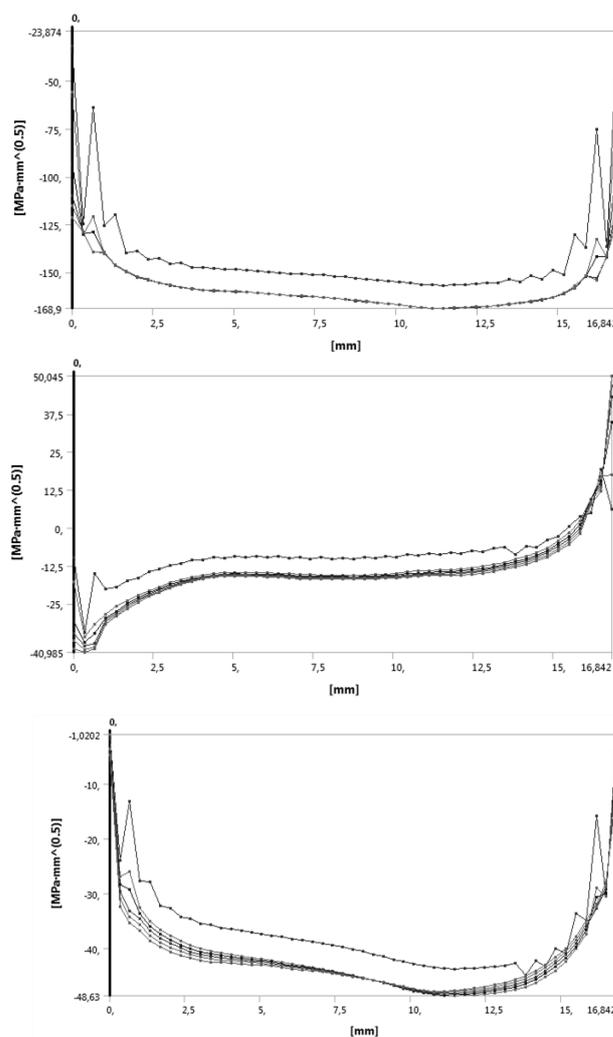


Рис. 10. Значения силовых параметров разрушения K_1, K_2, K_3 : $2C=12,0$ мм; $a=2,0$ мм

Результаты расчета силовых параметров разрушения в области трещины с учетом ее глубины и формы приведены на рис. 12 и рис. 13. При этом геометрия трещины варьировалась по длине $C = 28$ мм при глубине $a = 6,0 - 10,0$ мм.

Установлен характер поведения кривых силовых параметров разрушения от формы фронта трещины с учетом изменения ее глубины. Так, рост глубины трещины при постоянной ее длине не происходит изменение характера КИН и J -интеграла. Максимальные значения силовых

параметров разрушения при размерах трещины $C = 28$ мм, $a = 10$ мм составили $K_1 = 222,43$ МПа \times мм $^{1/2}$, $K_2 = 112,65$ МПа \times мм $^{1/2}$, $K_3 = 113,6$ МПа \times мм $^{1/2}$.

Для трещины, расположенной в зоне сварного шва приварки штуцера к обечайке корпуса ТА силовые параметры разрушения (K_1 , K_2) монотонно растут по фронту трещины, в то время, как значение силовых параметров разрушения (K_3) несколько снижается и достигает максимальных значений $K_3 = -142,7$ МПа \times мм $^{1/2}$, при этом максимальные значения K_1 составляют $299,94$ МПа \times мм $^{1/2}$, а $K_2 = 202,27$ МПа \times мм $^{1/2}$ и величина энергетического интеграла равна $0,45$ МДж \times мм $^{1/2}$.

На рис. 12 и 13 показаны также зависимости интеграла Черепанова–Райса по фронту трещины, полученные по шести контурам интегрирования. При изменении глубины трещины с 6 мм до 10 мм значение интеграла Черепанова–Райса растет с $0,269$ до $0,459$ МДж \times мм $^{1/2}$, т.е. увеличение составляет 1,7 раза.

Таблица 2

Значения силовых и энергетических параметров разрушения

a/C , мм	K_1 , МПа \times мм $^{1/2}$	K_2 , МПа \times мм $^{1/2}$	K_3 , МПа \times мм $^{1/2}$	J , мДж/мм 2
2/4	-156,4 \div -130,0	-156 \div -130	-6,13 \div -48,4	0,12
8/2	-23,8 \div -168,9	-40,9 \div 50,1	-1,0 \div -48,6	0,15
12/2	-15,4 \div -170,0	-27,7 \div 36,1	0,5 \div -60,2	0,16
16/2	-1,71 \div -174,2	-24,5 \div 24,5	1,8 \div -67,4	0,17
24/2	0,0 \div -184,3	-23,2 \div 8,4	1,3 \div -64,8	0,18
6/28	-3,3 \div -211,9	-44,1 \div 84,8	1,8 \div -116,6	0,23
8/28	-6,7 \div -222,4	-3,4 \div 112,7	31,0 \div -113,6	0,26
10/28	-8,4 \div -238,5	-3,7 \div 137,5	6,6 \div -130,4	0,30
12/28	-9,7 \div -262,4	-6,4 \div 170,5	6,6 \div -140,6	0,45
14/28	5,2 \div -299,9	-4,0 \div 202,3	4,2 \div -142,7	0,58

Установлено, что для различных по форме трещин, зависимость интеграла Черепанова–Райса представляет собой кривую с максимумом в точке по фронту трещины при выходе ее на поверхность. Максимальное значение наблюдается для трещины с параметрами $C = 28,0$ мм при $a = 6,0$ мм и составляет $0,459$ МДж/мм 2 .

В табл. 2 представлены значения силовых и энергетических параметров разрушения для всего диапазона рассматриваемых длин и глубины трещины, расположенной в наиболее нагруженной части цилиндрической части корпуса теплообменника.

Наблюдаемое изменение K_1 , K_2 , K_3 и J -интеграла вдоль фронта трещины качественно согласуется с рядом опубликованных аналогичных

упругих расчетов для сравнимых геометрических форм сварного соединения и размеров трещины.

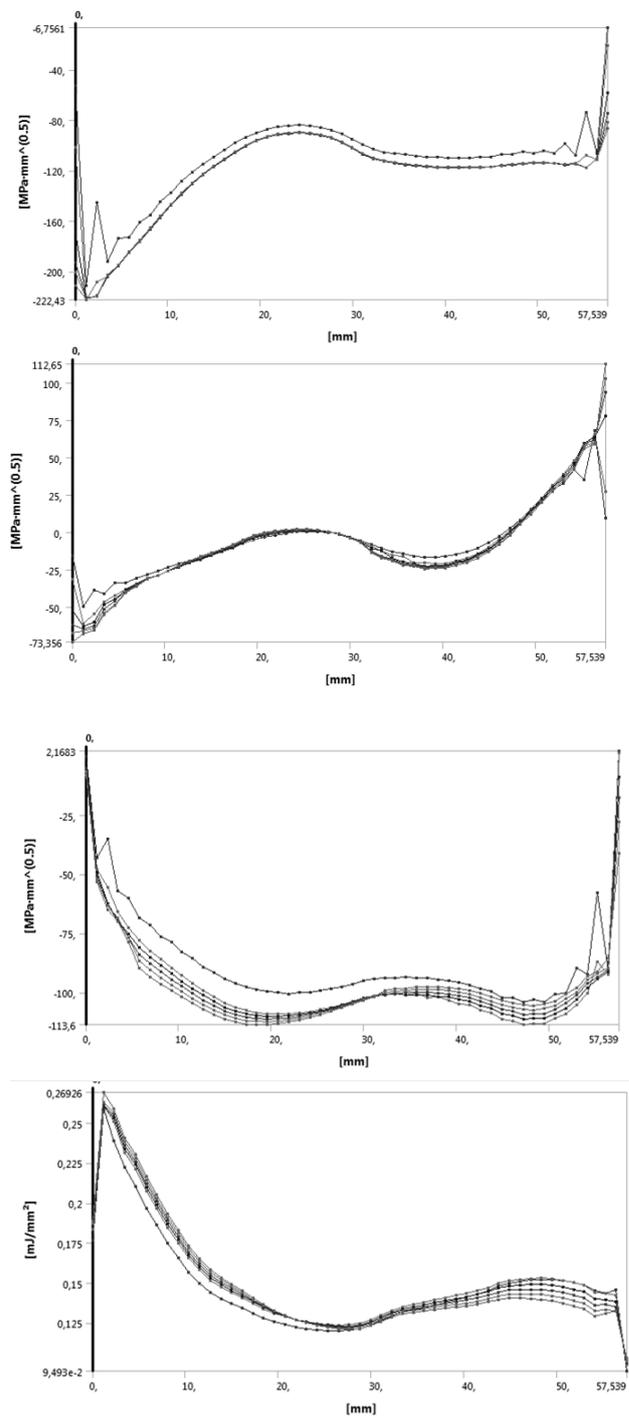


Рис. 12. Значения параметров разрушения K_1 , K_2 , K_3 ; $2C=28,0$ мм; $a=10,0$ мм

Результаты аналогичных трехмерных упругих расчетов методом конечных элементов приводятся в работах авторов [4–6] для различных длин трещин и хорошо совпадают с приведенными данными.

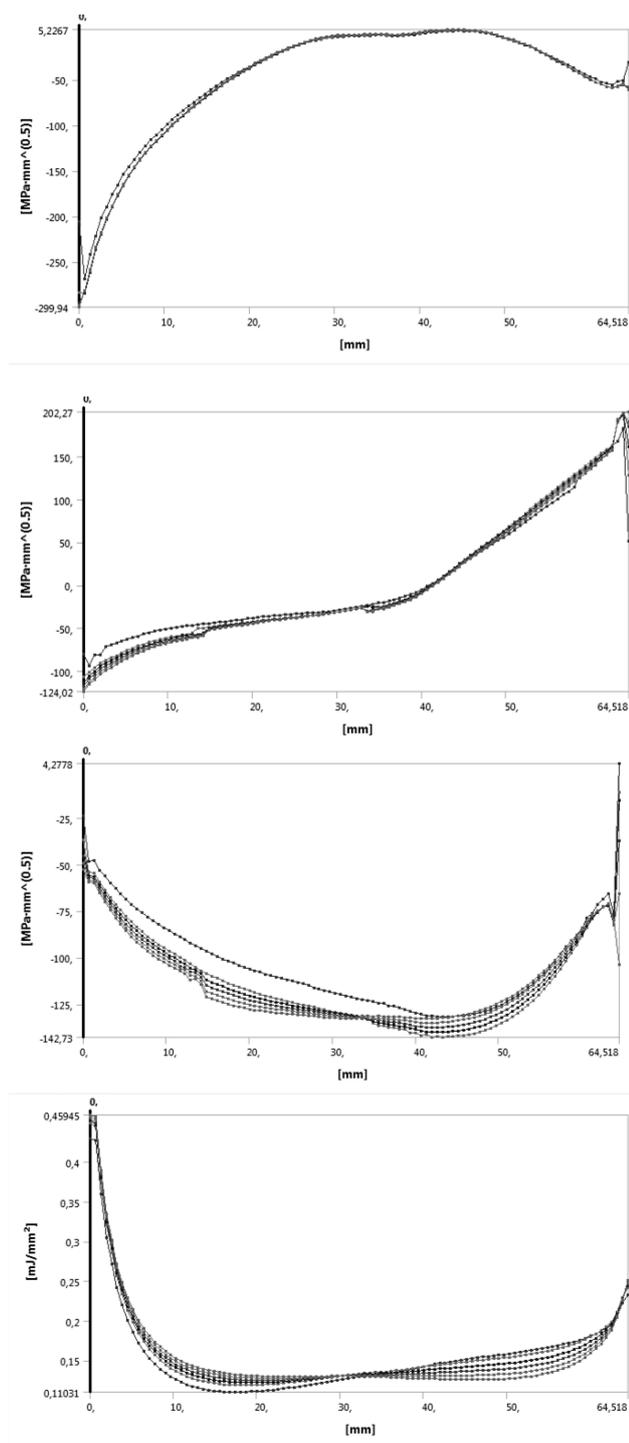


Рис. 13. Значения интеграла Черепанова–Райса: $2C=28,0$ мм; $a=6,0$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена оценка силовых и энергетических параметров разрушения для эллиптической трещины, расположенной в зоне приварки штуцера к обечайке теплообменного аппарата.

Определены зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого, второго и третьего рода и энергетического интеграла с учетом

формы трещины и ее размеров. Показано, что для трещины коэффициент интенсивности напряжений первого рода может изменяться (возрастать) по фронту трещины более чем в 1,42 раза и может достигать максимальных значений в наиболее удаленной точке фронта трещины, так и при выходе трещины на поверхность сварного шва.

При этом наибольшую опасность представляют собой трещины, расположенные в зоне сварного соединения цилиндрической обечайки корпуса и штуцера теплообменного аппарата, что необходимо учитывать при проведении регламентных работ и оценке остаточного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2008г. [Containers and apparatus. Standards and methods of strength calculation. Calculation of shells and bottoms from the effect of bearing loads, (in Russian), Federal standard R 52857.5-2007, Moscow, Federal Agency on Technical Regulation and Metrology, 2008.]
2. Ansys Release 17.0. Dokumentation. Canonsburg: Ansys Inc.
3. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Издательство ЛКИ / URS 2008. 256 с. [Morozov E. M., Nikishkov G. P. Metod finite element mechanics razrusheniya. M.: LKI Publishing / URS, 2008. 256 s.]
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: под ред. Ю. Мураками в 2-х т. М.: Мир, 1990. 1060 с. [Stress intensity factors handbook in 2 Vol./Y. Murakami. Moskow. 1990-1060p.]
5. 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.
6. Yuh J. Chao and X. K. Zhu. Constraint-modified J - R curves and its application to ductile crack growth// International Journal of Fracture. 2000. № 106. P. 135-160.

ОБ АВТОРЕ

БУДИЛОВ Игорь Николаевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж. по технол. и оборудованию сварочн. произва (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: Calculate power and energy parameters of fracture in the field the top of the crack in the shell heat exchanger .

Authors: I. N. Budilov

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: budilov02@mail.ru

Language: Russian.

Source Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 3-10, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: It completed a three-dimensional elastic analysis of stress-strain state (SSS) for an elliptic crack located in the cylindrical shell heat exchanger. It was found that for an elliptical crack power and energy parameters of nonlinear fracture vary along the crack front. Qualitative and quantitative ratios for CIN and J-integral on the crack front, given its size and shape of the front.

Key words: Reactor; shell; strength; stress-strain state; coefficient of stress intensity; Cherepanov integral - Raysa.

About autor:

BUDILOV Igor Nikolaevich, Prof., Dept. 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.