

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-55-63

ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ© **Евгений Валериевич Анискович^{1,2}, Анатолий Михайлович Лепихин¹, Владимир Викторович Москвичев^{1,2}**¹ Красноярский филиал Института вычислительных технологий СО РАН — Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука», г. Красноярск, Россия; e-mail: krasn@ict.nsc.ru² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия; e-mail: info@sfu-kras.ru*Статья поступила 24 мая 2017 г.*

Проведен анализ критериев разрушения и предельных состояний для тонкостенных сосудов, работающих под давлением, с учетом влияния пластических деформаций. Описаны основные проблемы эксплуатации тонкостенных сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением, связанные с технологической дефектностью и исчерпанием нормативного ресурса. Представлены характерные технологические и эксплуатационные дефекты в сварных швах сосудов и статистические данные по их количеству и типам. Дефекты сварки составили 62 % от общего числа дефектов, остальные типы дефектов — значительно меньше процентов. Построены гистограммы размеров дефектов сварки и определены законы распределения: длина подрезов описывалась логнормальным законом распределения, глубина — нормальным законом распределения. Обозначены предельные состояния и критерии разрушения сосудов при наличии дефектов и трещин в условиях упругопластического деформирования материала. Показаны преимущества использования обобщенных уравнений вида « J -кривые» при расчете на трещиностойкость. Приведена формула для расчета « J -кривых», связывающая безразмерный J -интеграл с безразмерной нагрузкой. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенного сосуда с поверхностной полуэллиптической и внутренней эллиптической трещинами в объемной постановке. Исследованы особенности полей напряжений и деформаций в локальной области зоны трещины при упругопластическом деформировании. Выполнены расчеты и представлены результаты оценки энергетического критерия механики разрушения — J -интеграла для модели сосуда с поверхностной полуэллиптической и внутренней эллиптической трещинами при упругопластическом деформировании. Результаты представлены в виде графиков зависимости безразмерного J -интеграла от геометрических размеров сосуда и трещины. Получены уравнения « J -кривых» и определена предельная нагрузка для тонкостенных сосудов, зависящая от геометрических размеров, параметров нагружения, прочностных свойств материала, характеристик трещиностойкости и деформирования. По « J -кривым» и кривой деформирования получена формула для определения зависимости предельной нагрузки от размера трещины, параметров нагружения и характеристик материала. С использованием этой формулы построены зависимости предельного давления сосуда при упругопластических деформациях от отношения длины трещины a к толщине стенки сосуда S (a/S) для поверхностных и внутренних трещин при различных отношениях R/S (R — радиус оболочки) и J_c , позволяющих оценить уровни предельного давления для безопасной эксплуатации тонкостенных сосудов.

Ключевые слова: тонкостенные сосуды давления; эксплуатационная дефектность; поверхностная и внутренняя трещины; механика разрушения; трещиностойкость; J -интеграл; упругопластическое деформирование материала; предельное давление.

**EVALUATION OF THE STATIC CRACKING RESISTANCE
OF THIN-WALLED PRESSURE VESSELS**© **Evgeniy V. Aniskovich^{1,2}, Anatoliy M. Lepihin¹, Vladimir V. Moskvichev^{1,2}**¹ Krasnoyarsk Branch of the Institute of Computational Technologies of SB RAS — SDTB “Nauka” ICT SB RAS, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: krasn@ict.nsc.ru² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: info@sfu-kras.ru

Submitted May 24, 2017.

The analysis of failure criteria and limit states for thin-wall pressure vessels is carried out, taking into account the influence of plastic deformations. The introduction describes the main problems of operation of thin-walled vessels operating under internal excess pressure, associated with technological defectiveness and reduction of the residual life. Typical technological and operational defects in welded joints of vessels and statistical data on their number and types are presented, their grouping and statistical processing are carried out. The share of welding defects was 62 % of the total number of defects, the remaining types of defects are much smaller. The histograms of the dimensions of welding defects were constructed and the distribution laws were determined: the length of the cuts was described by the lognormal distribution law, the depth by the normal distribution law. Further, the limiting states and criteria for the destruction of vessels in the presence of defects and cracks in the conditions of elastoplastic deformation of the material are indicated. The advantages of using generalized equations of the form “ J -curves” when calculating for fracture toughness are shown. A formula is given for the calculation of “ J -curves” connecting a dimensionless J -integral with a dimensionless load. An analysis is made of the stress-strain state of a thin-walled vessel with an external half-elliptical and internal elliptical cracks, in a volumetric setting. The peculiarities of the stress and strain fields in the local region of the crack zone under elastoplastic deformation were investigated. The accountings are performed and the results of evaluation of the fracture mechanics energy criterion — J -integral for vessel model with the external half-elliptical and internal elliptical cracks in elastic-plastic deformation — are presented. The results are presented as graphs of the dimensionless J -integral dependency on the geometrical sizes of the vessel and crack. The equations of “ J -curve” were obtained and the ultimate load for thin-wall pressure vessels were determined. That ultimate load depends on the geometrical dimensions, loading parameters, structural behaviors of material, the characteristics of crack strength and deformation. On the “ J -curves” and the deformation curve, a formula is obtained for determining the dependence of the ultimate load on the crack size, loading parameters and material characteristics. Using this formula, we plotted the dependences of the vessel’s limiting pressure for elastoplastic deformations on the ratio a/S for surface and internal cracks for different ratios R/S and J_c , which allow estimating the levels of limiting pressure for the safe operation of thin-walled vessels.

Keywords: thin-wall pressure vessels; operational defectiveness; external and internal cracks; fracture mechanics; crack strength; J -integral; elastic-plastic deformation of the material; pressure limit.

Тонкостенные сосуды, работающие под давлением (ТСВД), широко применяются в нефтехимической и машиностроительной отраслях, авиационной, холодильной и компрессорной технике, в различных типах технологического оборудования. К таким сосудам относятся воздухо- и масло-сборники, ресиверы, холодильные агрегаты, регуляторы давления, промежуточные сосуды, ректификационные колонны и т.д. [1 – 4]. На объектах, поднадзорных Ростехнадзору, используют ТСВД из сталей марок 10, 20, ВСтЗ, 09Г2С, 16ГС, 17ГС, 10Г2, 12Х18Н10Т (08Х18Н10Т). Толщины стенок сосудов варьируются от 5 до 20 мм, внутренние диаметры обечайки корпуса сосудов и аппаратов изменяются от 600 до 3600 мм, рабочие нагрузки (избыточное давление) составляют от 0,07 до 5 МПа, диапазон изменения рабочей температуры — ± 40 °С.

Основные проблемы ТСВД связаны с возникновением эксплуатационной дефектности и исчерпанием нормативного ресурса. Большинство ТСВД изготовлены в 1960 – 1970-х гг., отработали свой проектный ресурс и эксплуатируются на основании расчетных оценок остаточного ресурса дальнейшей безопасной эксплуатации. Основной причиной отказов и аварий является старение оборудования, приводящее к появлению критических размеров дефектов и повреждений [5 – 10]. На рис. 1 представлены характерные

технологические и эксплуатационные дефекты в сварных швах сосудов, а на рис. 2 — статистические данные по количеству разных типов дефектов в ТСВД [7, 8].

Различные типы дефектов можно сгруппировать следующим образом: дефекты сварки, дефекты основного металла, коррозионные дефекты и трещины. Дефекты сварки (см. рис. 2) составляют 62 % от общего числа дефектов, коррозионные дефекты — 13 %, вмятины — 11 %, задиры и расслоения — 6 %, смещения осей — 4 %. Гистограммы размеров дефектов сварки на примере характерного дефекта сварного шва — подреза представлены на рис. 3. Распределение длины подрезов описывается логнормальным законом распределения, а глубины подрезов — нормальным законом распределения (табл. 1).

Цель данной работы — оценка статической трещиностойкости ТСВД с наличием эксплуатационных дефектов и трещин при упругом и упругопластическом деформировании.

Предельные состояния и критерии разрушения

В основе проектирования и расчетов на прочность ТСВД лежат оценки общего НДС, которые к настоящему времени достаточно детально разработаны и обобщены в ряде работ [1 – 5] и доку-

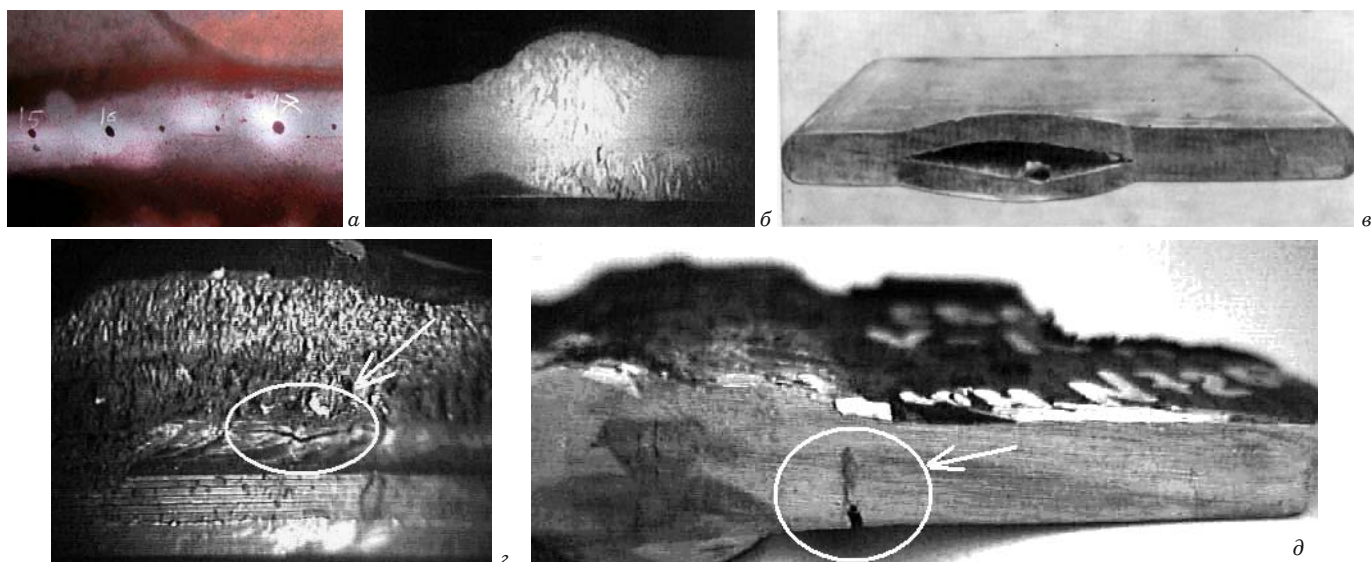


Рис. 1. Характерные технологические и эксплуатационные повреждения сварных швов и основного металла сосудов: *а* — цепочка пор; *б* — межкристаллитные трещины; *в* — расслоение основного металла; *з* — трещина в сварном шве; *д* — наружный трещиноподобный дефект (стрелками показано расположение дефекта)

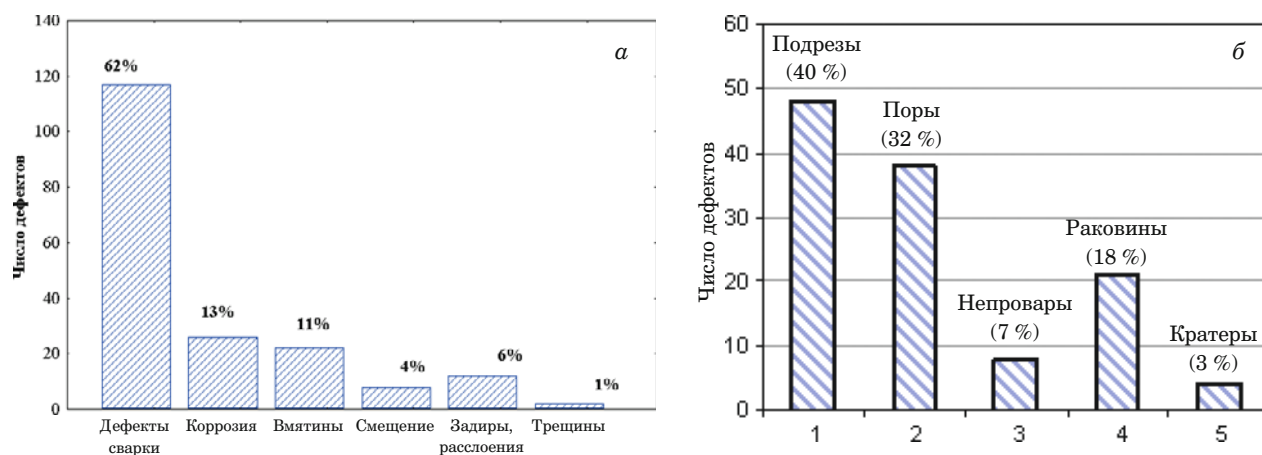


Рис. 2. Статистические данные по видам дефектов [7, 8]: *а* — общее распределение дефектов; *б* — распределение дефектов в сварных швах

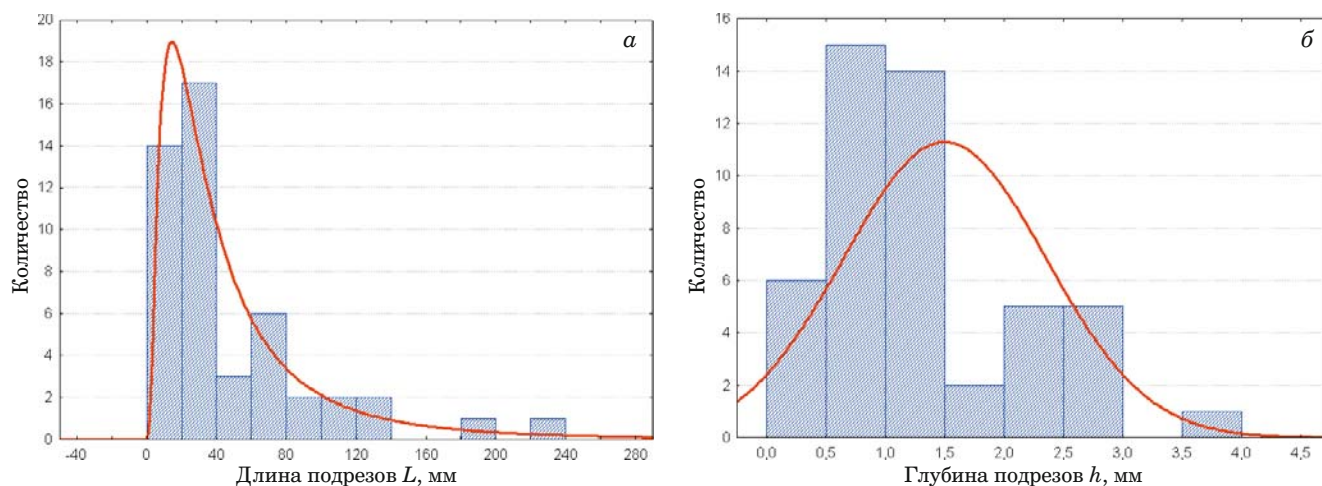


Рис. 3. Гистограммы распределения длин (*а*) и глубин (*б*) подрезов сварного шва

ментов [11, 12]. Классические подходы по расчетному обоснованию прочности сосудов давления представлены в [1 – 4 и др.], экспериментальные исследования — в [2, 13 – 16 и др.].

Анализ предельных состояний (ПС) сосудов проводится в рамках общих подходов к данной проблеме [17] с рассмотрением конструкции в целом и ее отдельных элементов. Формальное описание ПС основано на выделении базисных переменных, определяющих поведение конструкции под нагрузкой. Применительно к сосудам такими переменными являются: внутреннее давление (P), характеристики механических свойств конструкционных материалов (σ_b ; σ_T ; δ ; ψ), геометрические параметры (D , S), температура (T) и характеристики трещиностойкости (K_c , J_c). С позиции механики разрушения для тонкостенных сосудов можно выделить следующие виды предельных состояний [17].

1. Разрушение (хрупкое, квазихрупкое и вязкое):

по критерию максимальных напряжений —

$$\sigma_{\max} = \sigma_c; \quad (1)$$

по силовому критерию трещиностойкости в виде коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) —

$$K_I = K_c; \quad (2)$$

по энергетическому критерию трещиностойкости в виде J -интеграла —

$$J_I = J_c, \quad (3)$$

где σ_c , K_c , J_c — критические значения напряжений при разрушении, КИН и J -интеграла

2. Появление макротрещин:

$$\sigma_a > \sigma_{-1}, \quad (4)$$

где σ_a — амплитудные напряжения; σ_{-1} — допускаемый предел выносливости.

3. Потеря устойчивости:

$$f_{\max} > [f], \quad (5)$$

где $[f]$, f_{\max} — допустимые и максимальные перемещения элементов сосудов.

Наиболее опасными являются предельные состояния в виде хрупкого, квазихрупкого и вязкого разрушений, основным источником которых являются трещиноподобные дефекты и трещины.

Следует отметить, что вопросы обоснования критериев разрушения и оценки предельных состояний проработаны в основном применительно к оборудованию из высокопрочных сталей и сплавов [9, 11, 12]. Для широко распространенных тонкостенных сосудов из малоуглеродистых и низколегированных сталей четких и однозначных рекомендаций недостаточно. Опасность дефектов оценивают либо без достаточных обоснований критериев и моделей предельного состояния ТСВД, либо без учета пластического деформирования, либо не проводят вовсе, полагаясь на заложенные в проектах коэффициенты запаса.

Поскольку большинство ТСВД изготовлены из пластичных малоуглеродистых сталей, в локальной зоне дефектов (или трещин) возникают достаточно развитые пластические деформации, сопоставимые по размеру с дефектом. Это предопределяет необходимость проведения детальных исследований влияния дефектности в условиях упругопластического деформирования материала. Наиболее информативной характеристикой нелинейного напряженно-деформированного состояния тел с трещинами является энергетический критерий в форме J -интеграла и его критериальные характеристики J_I , J_c [13, 18 – 22]. Пластическое деформирование металла в окрестности дефекта (или трещины) приводит к необходимости перехода к критериям, рассматривающим разрушение как кинетический процесс, характеризующий развитие трещины. В связи с этим локальные критерии разрушения J_I , J_c дополняются концепциями R -кривой и J_R -кривой. Для широкого использования этих критериев в расчетах прочности и трещиностойкости сосудов из малоуглеродистых и низколегированных сталей необходимы исследования особенностей нелинейного напряженно-деформированного состояния в области возможных поверхностных и внутренних трещиноподобных дефектов, уста-

Таблица 1. Результаты статистического анализа размеров подрезов сварных швов (размер выборки — 48)

Тип выборки	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение	Мин./макс. значения	χ^2	P , %	Плотность распределения
Длина подрезов L , мм	50,3	2000,8	50,0	3,50/240	3,7	15,4	$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2\right]$ $\mu = \ln(x) = 3,9; \sigma = 50,0$
Глубина подрезов h , мм	1,5	0,7	0,9	0,4/4,0	15,9	1,3	$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$ $\mu = \ln(x) = 0,4; \sigma = 0,9$

новление зависимостей нелинейных характеристик от размеров дефектов и параметров нагружения, методы оценки опасности этих дефектов.

Одна из наиболее сложных задач расчетного обеспечения прочности и безопасности тонкостенных сосудов давления заключается в построении обобщенных уравнений предельного состояния, связывающих характеристики НДС в области трещиноподобного дефекта, его размеры, характеристики механических свойств материала и параметры нагруженности. Наиболее известными обобщенными уравнениями подобного вида являются « J -кривые», связывающие безразмерный J -интеграл с безразмерной нагрузкой в виде [18, 20 – 22]:

$$\Phi_J(\bar{e}) = \frac{J_I E}{\pi \sigma_T^2 a}, \quad (6)$$

где J_I — максимальное значение J -интеграла; E — модуль упругости; σ_T — предел текучести; a — размер трещины; $\bar{e} = e/e_T$ — номинальная относительная деформация; e — максимальная деформация в локальной зоне дефекта; e_T — деформация, соответствующая пределу текучести материала.

Преимущество « J -кривых» заключается в возможности решения прямых (определение критических размеров дефектов) и обратных (определение предельных деформаций) задач механики разрушения. С учетом этого были выполнены расчеты « J -кривых» для ТСВД с поверхностными

и внутренними трещиноподобными дефектами (эквивалентными трещинами).

Анализ НДС и характеристик трещиностойкости

В большинстве случаев при упругопластическом анализе оболочек с трещинами успешно применяются теория пластического течения с поверхностью текучести Мизеса [23] и деформационная теория пластичности [24]. Основной причиной выбора деформационной теории явилось то, что она наиболее оптимально подходит для расчета тонкостенных моделей методом конечных элементов (МКЭ). Кроме того, при использовании деформационной теории пластичности и простом нагружении имеет место независимость J -интеграла от контура интегрирования [22].

Анализ НДС тонкостенного сосуда с трещиноподобным дефектом проводили в соответствии с [13, 21, 25] и с учетом [2, 15, 16, 19, 20]. Исследовали особенности полей напряжений и деформаций в локальной области в зоне дефекта. Рассматривали два случая — элемент стенки с поверхностной и внутренней трещинами. Расчетную диаграмму деформирования ($\sigma - \epsilon$) для стали СтЗсп описывали степенным уравнением ($\bar{\sigma} = \bar{\epsilon}^n$) с показателем деформационного упрочнения $n = 0,075$ (предел текучести $\sigma_T = 245$ МПа; предел прочности $\sigma_B = 373$ МПа; модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\eta = 0,3$, критический $J_c = 100$ кН/м). Расчетные

Таблица 2. Основные расчетные параметры

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Модуль упругости E , МПа	$2,06 \cdot 10^5$	Коэффициент Пуассона η	0,3
Предел текучести σ_T , МПа	245	Предел прочности σ_B , МПа	373
Коэффициент относительного сужения ψ_f	0,5	Коэффициент упрочнения n	0,075
Глубина трещины a , мм	0,5	Длина трещины $2c$, мм ($c = 3a/2$)	1,5
	1		3
	2		6
	3		9
	4		12
	5		15
	6		18
Внутреннее давление P , МПа	0,5	Параметр нагруженности $\sigma_\phi = \frac{PD}{2S_\phi}$, МПа	50
	1,0		100
	1,5		150
	2,0		200
	2,5		250
	3,0		300
	3,5		350
4,0	400		

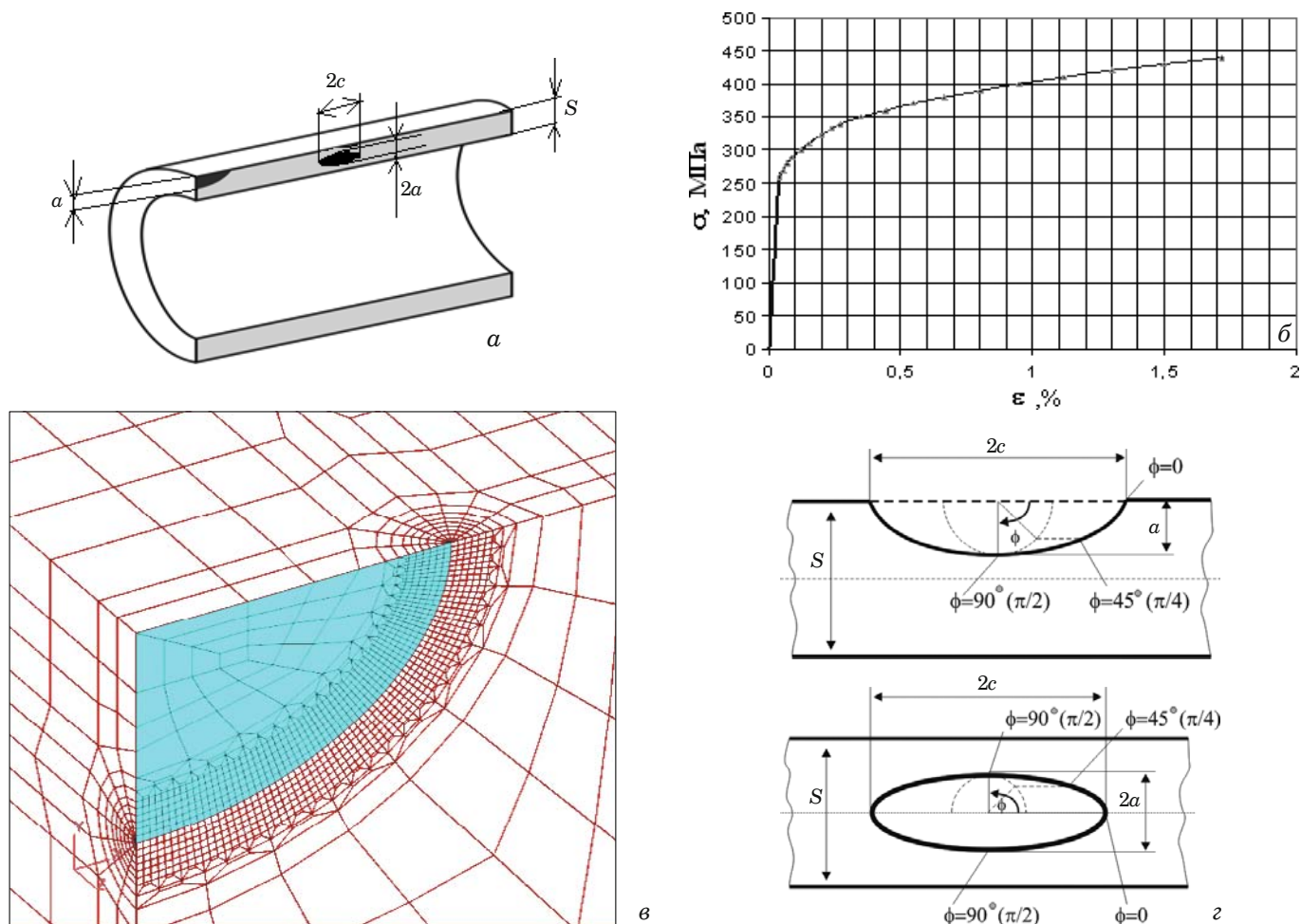


Рис. 4. Расчетная схема сосуда с поверхностной и внутренней трещинами (а); расчетная кривая деформирования (б); разбиение расчетной модели на конечные элементы (в); схематическое изображение параметров контура поверхностной и внутренней трещины с указанием направления точек контура трещины по углу ϕ (г)

параметры нагруженности, свойства материала и размеры трещин представлены в табл. 2, расчетная схема и разбиение фронта трещины конечными элементами, а также фронт трещины, на котором определяли расчетные параметры, — на рис. 4.

При анализе НДС в упругопластической области деформирования значения J -интеграла вычисляли для точек на контуре трещины, заданных углом ϕ [13, 21, 25] (см. рис. 4, г).

Отношение расчетных значений J_I для поверхностной и внутренней трещин в стенке сосуда к критическому J_c (J_I/J_c) представлено на рис. 5 в зависимости от отношения длины трещины a к толщине стенки S . Очевидно, что значения J_I выше для поверхностных дефектов (и трещин), чем для внутренних в стенке сосуда. Причем при напряжениях до 150 МПа значения J_I в вершине поверхностного дефекта значительно больше, чем в вершине внутреннего дефекта, а при напряжениях более 200 МПа, напротив, J_I для поверхностного дефекта на 20 – 30 % больше, чем для внутреннего.

Расчет на трещиностойкость ТСВД

По результатам численных расчетов были построены « J -кривые» для тонкостенного сосуда с поверхностными и внутренними трещиноподобными дефектами (эквивалентными трещинами) (рис. 6) в виде зависимостей, имеющих нелинейный вид в упругой области деформирования и линейный вид в области возникновения пластических деформаций. Построенные J -кривые позволяют определить критические значения размеров трещин и предельные нагрузки в зависимости от J_c , характеристик материала и относительных упругих/упругопластических деформаций. В настоящее время разработан ряд методик расчета предельных нагрузок для плоских элементов конструкций [13, 20 – 22].

Рассмотрим данную задачу для исследуемой расчетной схемы — цилиндрической тонкостенной оболочки, содержащей несквозную эллиптическую или полуэллиптическую трещину.

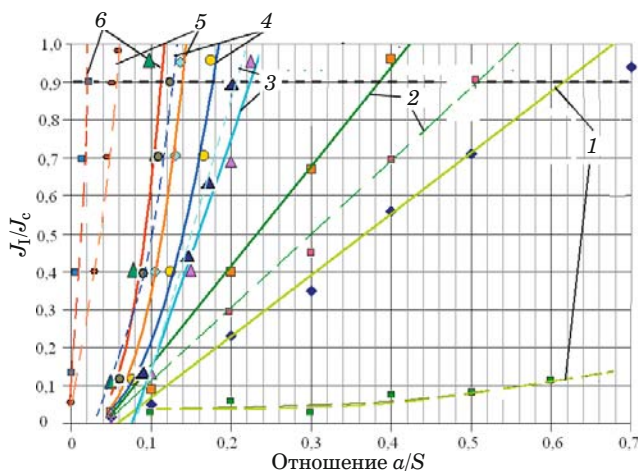


Рис. 5. Зависимости отношения J_I/J_c (при $J_c = 100$ кН/м) от a/S при различных значениях σ_ϕ для поверхностной (сплошные линии) и внутренней (пунктирные линии) трещин: 1 – 6 σ_ϕ равно 150, 200, 250, 300, 350, 400 МПа соответственно

Предельное давление для оболочечной конструкции определяли по формуле

$$[P_T] = \frac{S\sigma_T}{R}, \tag{7}$$

где S — толщина стенки; R — радиус оболочки. С учетом (7) уравнение (6) принимает вид

$$\Phi_J(\bar{e}) = \frac{JES^2}{\pi[P_T]^2 R^2 a}. \tag{8}$$

По формуле (8) были построены безразмерные « J -кривые» с учетом параметра предельного давления $[P_T]$ в упругопластической области деформирования (\bar{e} в диапазоне от 1,0 до 1,9) для поверхностной и внутренней трещин (рис. 7).

По этим кривым, а также с учетом расчетной кривой деформирования (см. рис. 4, б) получена формула для определения зависимости предельной нагрузки от размера трещины, параметров нагружения и характеристик материала:

$$[P_T] = \sqrt{\frac{J_c ES^2 e_T}{\pi R^2 a F(e)}}, \tag{9}$$

где $F(e)$ — аппроксимирующая функция: $F(e) = 162,7e - 173,8e_T$ — для поверхностной полуэллиптической трещины; $F(e) = 38,5e - 42,3e_T$ — для внутренней эллиптической трещины.

По формуле (9) построены зависимости предельного давления сосуда при упругопластических деформациях от отношения a/S для поверхностных и внутренних трещин при различных отношениях R/S и J_c . Результаты представлены на рис. 8 в виде диаграмм, позволяющих оценить уровни предельного давления для безопасной эксплуатации тонкостенного сосуда с размерами

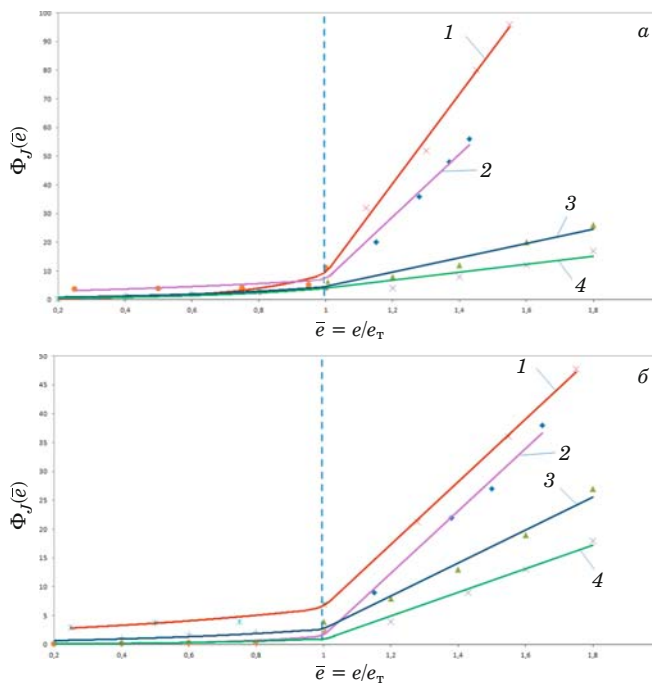


Рис. 6. « J -кривые» для поверхностной полуэллиптической (а) и внутренней эллиптической (б) трещин: 1 — расчет для тонкостенной оболочки ($R/S = 100$); 2, 3, 4 — расчет по формулам работ [25, 20, 14] соответственно

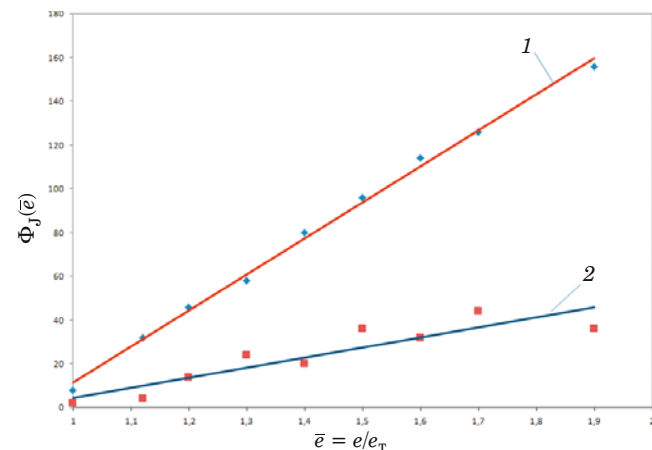


Рис. 7. « J -кривые» с учетом предельного давления для поверхностной полуэллиптической (1) и внутренней эллиптической (2) трещин в упругопластической области деформирования

R/S в диапазоне 25 – 150 при критических значениях J_c , равных 50; 100; 150; 200 кН/м. Выбранный диапазон J_c соответствует значениям трещиностойкости сталей Ст3, 09Г2С и 16ГС в рассматриваемом температурном диапазоне эксплуатации сосудов [14].

Таким образом, получены графические зависимости характеристик трещиностойкости от геометрических размеров поверхностных и внутренних дефектов (и трещин), а также от геометрических размеров сосуда (радиуса и толщины

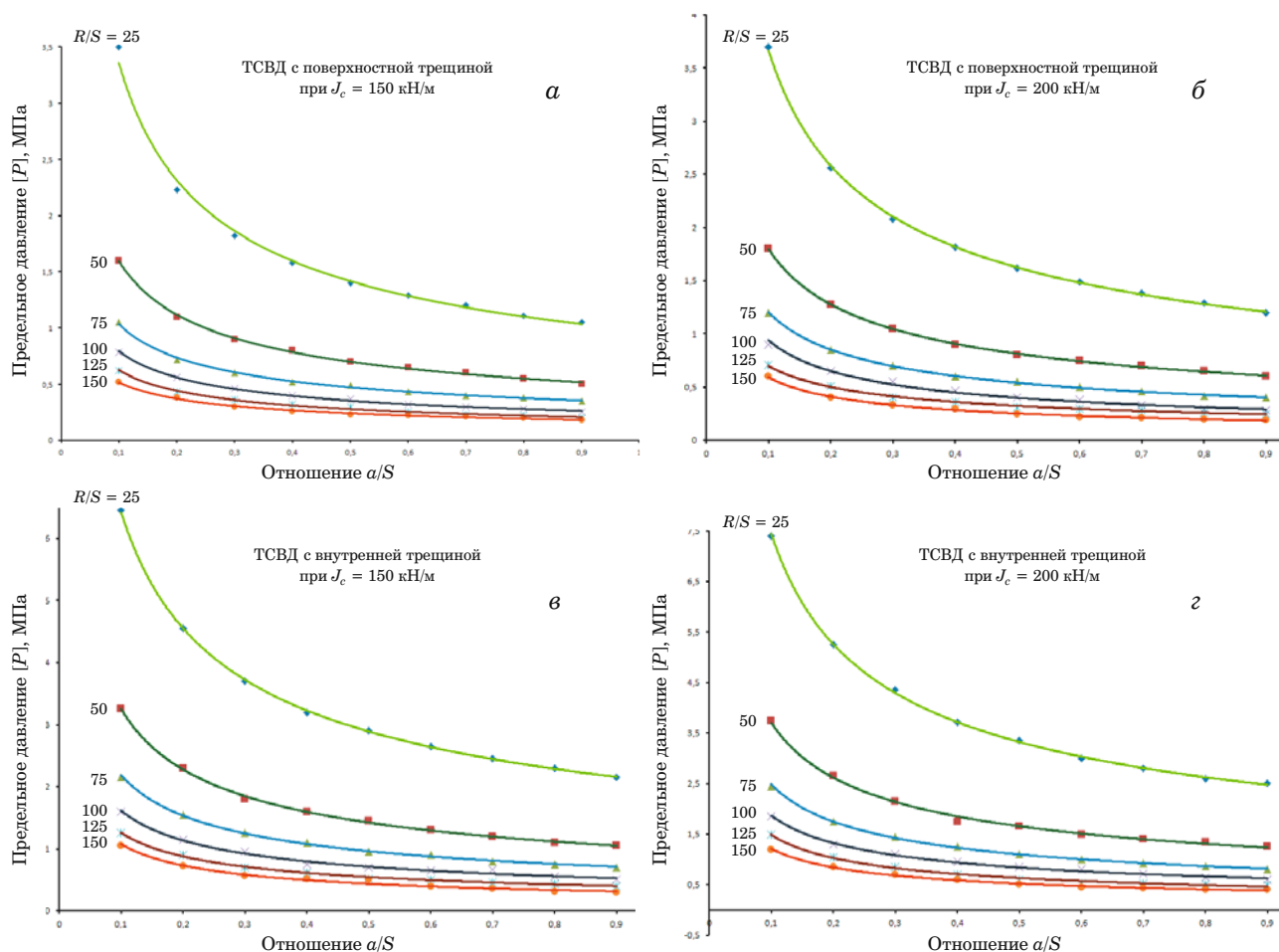


Рис. 8. Диаграммы предельного давления тонкостенного сосуда с трещиной

стенки) в безразмерных величинах. Построены « J -кривые», позволяющие определить критические размеры дефектов (и трещин) или предельные деформации при заданных значениях трещиностойкости материала.

С использованием графиков предельного давления в сосуде проведена оценка опасности поверхностных и внутренних трещиноподобных дефектов (и трещин) в тонкостенных сосудах по критериям трещиностойкости J_c или значениям предельного давления $[P_T]$ в зависимости от параметров геометрии, нагружения и прочностных характеристик материала. Все это позволяет определять параметры безопасной эксплуатации ТСВД с поверхностными и внутренними острыми дефектами и трещинами при проведении технической диагностики и решении задачи остаточной прочности и ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хисматуллин Е. Р., Королев Е. М., Лившиц В. И. и др. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
2. ASME Professional Development programs. Design, Inspection and Repair of ASME section VIII, Division 1, Pressure Vessels. — Houston, TX. — 1999.

3. Ляцинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. — Л.: Машиностроение, 1970. — 240 с.
4. Никольс Р. Конструирование и технология изготовления сосудов давления. — М.: Машиностроение, 1975. — 461 с.
5. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.
6. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.
7. Анискович Е. В., Лепихин А. М., Москвичев В. В. Оценка предельных состояний тонкостенных сосудов давления с технологической дефектностью / Тр. II Евразийского симп. по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Ч. 1. — Якутск: ЯФ ГУ «Изд. СО РАН», 2004. С. 126 – 143.
8. Анискович Е. В., Лепихин А. М., Москвичев В. В. Оценка влияния трещиноподобных дефектов на прочность тонкостенных сосудов / Тр. науч. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Т. 3. — Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. С. 5 – 10.
9. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления: Прочность и долговечность. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. — 287 с.
10. Карзов Г. П., Тимофеев Б. Т., Леонов В. П. и др. Вопросы нормирования технологических дефектов сварных соединений сосудов высокого давления. — Ленинград: ЛДНТП, 1974. — 36 с.
11. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 59 с.

12. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
13. **Chell G. G.** Post-yield fracture mechanics theory and its application to pressure vessels / *Int. J. Pres. Ves. Piping*. N 5. 1977. P. 123 – 147.
14. **Москвичев В. В., Махутов Н. А., Черняев А. П. и др.** Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. — Новосибирск: Наука, 2002. — 334 с.
15. **Махутов Н. А., Бурак М. И., Кайдалов В. Б., Ларионов В. В.** Исследование и анализ разгерметизации сосуда, нагруженного внутренним циклическим давлением жидкости / *Проблемы прочности*. 1990. № 9. С. 17 – 21.
16. **Махутов Н. А., Зайнулин Р. С., Гумеров К. М.** Прочность сосудов давления с трещиноподобными дефектами / *Ресурс и прочность оборудования нефтеперерабатывающих заводов: межвуз. научно-темат. сб.* — Уфа: УНИ, 1989. С. 40 – 52.
17. **Москвичев В. В.** Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений: в 3-х ч. Ч. 1. — Новосибирск: Наука, 2002. — 106 с.
18. **Махутов Н. А., Москвичев В. В., Козлов А. Г., Сухорук С. В.** Расчет на трещиностойкость плоских элементов конструкций с использованием J -интеграла. Сообщение 1. Обоснование метода. Сообщение 2. Учет концентрации напряжений / *Проблемы прочности*. 1988. № 8. С. 3 – 14.
19. **Морозов Е. М., Никишков Г. П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Наука, 1980. — 256 с.
20. **Плювинаж Г.** Механика упругопластического разрушения / *Пер. с франц.* — М.: Мир, 1993. — 450 с.
21. **Rice J. R., Sweldow L.** The surface crack: physical problems and computational solutions. — New York: ASME, 1972. P. 171 – 186.
22. **Rice J. R., Paris P. C., Merkle J. R.** Some further results on J integral analysis and estimates. *ASTM STP 536*, 1978. — 426 p.
23. **Hill R.** *The Mathematical Theory of Plasticity*. — Oxford Univ. Press, 1998. — 386 p.
24. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 246 с.
25. **Kim Yun-Jae, Kim Jin-Su, Young-Jae Park, Kim Young-Jin.** Elastic-plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders / *Eng. Fract. Mech.* 2004. P. 44.
- strength of materials and machines for cold climate regions. Part. 1. — Yakutsk: Izd. SO RAN, 2004. P. 126 – 143 [in Russian].
8. **Aniskovich E. V., Lepikhin A. M., Moskvichev V. V.** Evaluation of the effect of crack-like defects on strength of thin-walled vessels / *Proc. Sci. Conf. "Modern methods of mathematical modeling of natural and man-made disasters. Problems of protection of population and territories from emergency situations of natural and technogenic character"*. Vol. 3. — Krasnoyarsk: IVM SO RAN, 2003. P. 5 – 10 [in Russian].
9. **Karzov G. P., Leonov V. P., Timofeev B. T.** Welded pressure vessels. — Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd., 1982. — 287 p. [in Russian].
10. **Karzov G. P., Timofeev B. T., Leonov V. P., et al.** Standardization of technological defects in welded joints of pressure vessels. — Leningrad: LDNTP, 1974. — 36 p. [in Russian].
11. *GOST 14249-89. Vessels and equipment. Norms and methods of strength calculation.* — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 59 p. [in Russian].
12. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы для расчета прочности оборудования и трубопроводов ядерных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с. [in Russian].
13. **Chell G. G.** Post-yield fracture mechanics theory and its application to pressure vessels / *Int. J. Pres. Ves. Piping*. N 5. 1977. P. 123 – 147.
14. **Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Chernyaev A. P., et al.** Fracture toughness and mechanical properties of structural materials technical systems. — Novosibirsk: Nauka, 2002. — 334 p. [in Russian].
15. **Makhutov N. A., Burak M. I., Kaidalov V. B., Lariонов V. V.** The study and analysis of the depressurization of the pressure vessel is subjected to internal cyclic loading fluid / *Probl. Prochn.* 1990. N 9. P. 17 – 21 [in Russian].
16. **Makhutov N. A., Zainulin R. S., Gumerov K. M.** Strength of pressure vessels with cracked defects / *Resource and strength of equipment of oil refineries: interuniversity scientific-thematic collection.* — Ufa: UNI, 1989. P. 40 – 52 [in Russian].
17. **Moskvichev V. V.** Fundamentals of structural strength of technical systems and engineering structures: in 3 parts. Part. 1. — Novosibirsk: Nauka, 2002. — 106 p. [in Russian].
18. **Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Kozlov A. G., Sukhorukov S. V.** Calculation on crack resistance of plane structural elements using the J -integral. Message 1. Justification of the method. Message 2. Account of stress concentration / *Probl. Prochn.* 1988. N 8. P. 3 – 14.
19. **Morozov E. M., Nikishkov G. P.** Finite element method in fracture mechanics. — Moscow: Nauka, 1980. — 256 p. [in Russian].
20. **Pluvinage G.** *Mechanics of elastic-plastic fracture / Translate from france language.* — Moscow: Mir, 1993. — 450 p. [Russian translation].
21. **Rice J. R., Sweldow L.** The surface crack: physical problems and computational solutions. — New York: ASME, 1972. P. 171 – 186.
22. **Rice J. R., Paris P. C., Merkle J. R.** Some further results on J integral analysis and estimates. *ASTM STP 536*, 1978. — 426 p.
23. **Hill R.** *The Mathematical Theory of Plasticity*. — Oxford Univ. Press, 1998. — 386 p.
24. **Malinin N. N.** Engineering theory of plasticity and creep. — Moscow: Mashinostroenie, 1968. — 246 p. [in Russian].
25. **Kim Yun-Jae, Kim Jin-Su, Young-Jae Park, Kim Young-Jin.** Elastic-plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders / *Eng. Fract. Mech.* 2004. P. 44.

REFERENCES