



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.09

УДК 539.421.5

ТРАКТОВКА ОБОБЩЕННОГО ПАРАМЕТРА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПЛАСТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

А.В. Туманов, Н.В. Бойченко

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ «Казанский научный центр» РАН, Казань, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 октября 2020 г.
Принята: 22 марта 2021 г.
Опубликована: 15 апреля 2021 г.

Ключевые слова:

пластический коэффициент
интенсивности напряжений,
вязкость разрушения,
статистический анализ,
распределение Вейбула.

АННОТАЦИЯ

Основной целью данной работы является статистический анализ вязкости разрушения компактных образцов, выполненных из стали S55C, в терминах упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений. Для сравнительного статистического анализа параметров разрушения использованы результаты испытаний по определению вязкости разрушения при трехточечном изгибе. Вязкость разрушения определялась на образцах различной толщины, выполненных из стали S55C, содержащих предварительно выращенную трещину. Испытано по пять образцов различной толщины при постоянном отношении длины трещины к ширине образца. В результате испытаний получены значения разрушающей нагрузки для различных сочетаний длины трещины и толщины образца. Помимо этого, проведены испытания цилиндрических образцов на одноосное растяжение для определения основных механических свойств материала, которые были использованы при проведении численных расчетов.

Для определения упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений проведены численные исследования. На основе полученных в результате испытаний криволинейных форм фронта трещины сформированы трехмерные расчетные схемы метода конечных элементов. В результате численного расчета получены поля напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины для каждого из испытанных образцов. На основе полученных полей рассчитывались значения пластических коэффициентов интенсивности вдоль криволинейных фронтов трещины.

На основе полученных критических значений упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений проведен статистический анализ вязкости разрушения компактных образцов, выполненных из стали S55C. Продемонстрированы преимущества использования пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве обобщенного параметра вероятности разрушения. Помимо этого, чувствительность пластического коэффициента интенсивности напряжений к эффектам стеснения позволяет избежать введения дополнительных параметров в статистические модели оценки вероятности разрушения.

© ПНИПУ

© Туманов Андрей Владиславович – к.т.н., в.н.с., e-mail: tymanoff@rambler.ru, iD: [0000-0002-4969-3464](https://orcid.org/0000-0002-4969-3464).
Бойченко Наталья Валерьевна – к.т.н., с.н.с., e-mail: nataboi@yandex.ru, iD: [0000-0002-5959-470X](https://orcid.org/0000-0002-5959-470X).

Andrey V. Tumanov – CSc in Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: tymanoff@rambler.ru,
iD: [0000-0002-4969-3464](https://orcid.org/0000-0002-4969-3464).

Natalia V. Boychenko – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: nataboi@yandex.ru,
iD: [0000-0002-5959-470X](https://orcid.org/0000-0002-5959-470X).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INTERPRETATION OF THE GENERALIZED PARAMETER OF THE PROBABILITY OF FAILURE THROUGH THE PLASTIC STRESS INTENSITY FACTOR

A.V. Tumanov, N.V. Boychenko

Institute of Power Engineering and Advanced Technologies,
FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 October 2020
Accepted: 22 March 2021
Published: 15 April 2021

Keywords:

plastic stress intensity factor,
fracture toughness, statistical
analysis, Weibull distribution.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to statistically analyze the fracture toughness of compact specimens made of S55C steel in terms of elastic and plastic stress intensity factors. The fracture toughness tests results at three-point bending were used for a comparative statistical analysis of the fracture parameters. Five type of specimen configuration with various thicknesses were tested at a constant ratio between crack length and specimen width. The critical loads were obtained as a tests result for various combinations of crack length and specimen thickness. In addition, uniaxial tensile tests were carried out to determine the main mechanical properties of the material. Obtained material properties were used in numerical calculations.

Numerical calculations were carried out to determine the elastic and plastic stress intensity factors. Three-dimensional finite element analysis was performed on the basis of the experimental data on curvilinear crack front positions in tested specimens. The crack tip stress-strain fields were obtained for each of the tested samples as a result of numerical calculations. These fields were used to calculate the values of the plastic intensity factors along the curvilinear crack fronts.

A statistical analysis of the fracture toughness of compact specimens made of S55C steel was carried out based on the obtained critical values of elastic and plastic stress intensity factors.

The advantages of using the plastic stress intensity factor as a generalized parameter for the fracture probability are demonstrated. In addition, the sensitivity of the plastic stress intensity factor to constraint effects avoids the introduction of additional parameters into the statistical models.

© PNRPU

Введение

При проектировании элементов оборудования, из соображений безопасности, выдвигаются очень строгие требования к точности определения их минимального ресурса. Рост трещин и выход из строя элементов оборудования связан с накоплением и развитием в процессе эксплуатации микрповреждений в местах концентрации напряжений. Рост плотности дислокаций приводит к образованию пор, которые, в свою очередь, по мере развития и объединения превращаются в макротрещину. Таким образом, ограничение безопасного ресурса оборудования связано с максимально допустимым размером дефектов. Условия эксплуатации оборудования и требования к его безопасности в совокупности с отличающимися свойствами сопротивления росту трещин различных материалов приводят к тому, что в каждом отдельном случае допустимый размер трещин может варьироваться в очень широких пределах. В общем случае состояние конструкции характеризуется некоторой критериальной величиной, описывающей локальное распределение полей напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины. Наиболее распространенной характеристикой сопротивления разрушению является коэффициент интенсивности напряжений. Термином «коэффициент интенсивности напряжений» обозначается амплитудный коэффициент в асимптотическом разложении Вильямса упругих полей напряжений и перемещений в области вершины

трещины [1]. Данная характеристика позволяет с помощью всего одного параметра описать локальное напряженно-деформированное состояние в области вершины трещины в том случае, когда материал проявляет только упругие свойства.

Одной из основных упругих характеристик сопротивления росту трещин материала принято считать критическое значение упругого коэффициента интенсивности напряжений, называемое вязкостью разрушения. При определении вязкости разрушения создаются условия, в которых материал находится в максимально стесненных условиях и зона пластических деформаций в вершине трещины минимальна. В таких условиях разрушение будет хрупким из-за того, что материал в области вершины трещины очень быстро исчерпывает свои возможности деформирования. Такие условия являются самыми неблагоприятными с точки зрения безопасности конструкции, приращение длины трещины в случае ее страгивания максимально. Именно поэтому вязкость разрушения чаще всего заложена в основу расчета минимально допустимого безопасного ресурса оборудования.

Модельные представления, заложенные в упругий коэффициент интенсивности, не подразумевают учета эффектов стеснения. При прогнозировании критических состояний элементов конструкций предполагается, что материал находится в условиях, близких к плоской деформации. Это подразумевает более консервативную оценку, приводящую к дополнительному увеличению

запаса прочности конструкции помимо запаса, параметрически заложенного в инженерных расчетах. Такой подход благоприятен с точки зрения надежности и допустим в тех случаях, когда большая разница между реальным и прогнозируемым ресурсом оборудования экономически выгодна.

В реальных конструкциях эффекты стеснения оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние тел. В тех случаях, когда требуется более точно определить состояние конструкции, применение упругих коэффициентов интенсивности напряжений становится нецелесообразным. Для этих целей вводится второй дополнительный параметр, который дополняет упругие модельные представления и позволяет описать локальное напряженно-деформированное в области вершины трещины [18–21, 26, 28, 30]. Подобные двухпараметрические критерии очень неудобны с точки зрения их практического применения. Более того, в области вершины трещины всегда возникает область пластических деформаций. По мере приближения к вершине трещины для пластичных материалов упругая составляющая плотности энергии деформации уменьшается вплоть до того, что в некоторых случаях ею пренебрегают в расчетах. В связи с этим напрашивается вывод о том, что для материалов, проявляющих свойства пластичности критериальная характеристика сопротивления разрушению должна учитывать пластические свойства материала. В качестве данной характеристики сопротивления разрушению в таких случаях может выступать пластический коэффициент интенсивности напряжений, введенный в работах Хатчинсона [2], Райса и Розенгрена [3] для плоских задач. В работе [4] была разработана методика расчета пластического коэффициента интенсивности напряжений для общего трехмерного случая, что дало возможность определения данной характеристики в реальных конструкциях. В последующих работах была доказана возможность использования пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве характеристики сопротивления разрушению, чувствительной как к пластическим свойствам материала, так и к эффектам стеснения и условиям нагружения [5–7].

Исследования механических свойств материалов, в том числе характеристик сопротивления росту трещин, связаны со статистическим анализом результатов испытаний. Вне зависимости от выбора оцениваемой характеристики наблюдается разброс экспериментально определяемых значений. Помимо этого, критериальные характеристики трещиностойкости при их экспериментальном определении зависят от толщины испытательного образца [23–25]. Однако если критериальная характеристика выбрана правильно и измерительные приборы позволяют достичь необходимой точности замеров, то дисперсия плотности разброса должна соответствовать нормальному распределению Гаусса – Лапласа [8]. Для оценки критериальных характеристик сопротивления росту трещин и вероятности разрушения более удобно использовать статистический разброс

данных в форме, представленной Вейбулом [9]. Распределение Вейбула получило широкое распространение для анализа критериальных величин, в том числе механики трещин [10–13, 18–22, 29, 30]. Анализ параметров статистических моделей позволяет оценить применимость исследуемой характеристики в качестве критериальной в оговоренных условиях сравнения. Основной целью данной работы является статистический анализ вязкости разрушения компактных образцов, выполненных из стали S55C, в терминах упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений.

Теоретические предпосылки

Согласно [14] нормальное распределение вероятности разрушения можно определить, отсортировав результаты наблюдений анализируемой величины следующим образом:

$$P_{eq,i} = \frac{i-0,3}{N+0,4}. \quad (1)$$

Вероятностное распределение, полученное таким образом, в дальнейшем используется в качестве первого приближения в итерационных процессах определения параметров статистических моделей.

В основу вероятностной оценки положена модифицированная модель Вейбула [10]. Вероятность разрушения в данной модели определяется из следующего выражения:

$$P_{int} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{GP - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right], \quad (2)$$

в данной модели λ, δ, β – определяемые параметры статистической модели; GP – анализируемый критериальный параметр. При обратном решении задачи значение критического значения параметра определяется из заданной вероятности разрушения как

$$GP_i = \delta \left[-\log(1 - P_{int,i}) \right]^{1/\beta} + \lambda. \quad (3)$$

В качестве параметра GP в этой модели может быть использована любая критериальная величина. В работе [10] была предпринята попытка в качестве критериального параметра разрушения использовать значения упругих коэффициентов интенсивности напряжений. В силу того что данный параметр не чувствителен к эффектам стеснения, в трехпараметрическую модель Вейбула была добавлена относительная толщина образца. Итоговая модель интегральной вероятности разрушения для образцов различной толщины в данной работе авторов [10] была принята в следующем виде:

$$P_{int} = 1 - \prod \left(1 - \exp \left[- \frac{\Delta B_{ij}}{B_{ref}} \left(\frac{GP_{ij} - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right] \right). \quad (4)$$

Таким образом, зная экспериментальные распределения критических значений исследуемого параметра, с помощью итерационных методов можно определить параметры модифицированной модели Вейбула. Подробно итерационный алгоритм нахождения неизвестных параметров данной модели изложен в [15].

Экспериментальные исследования

В данной работе для сравнительного статистического анализа параметров разрушения были использованы результаты испытаний по определению вязкости разрушения при трехточечном изгибе, полученные в работе [16]. Вязкость разрушения определялась на образцах различной толщины, выполненных из стали S55C, содержащих предварительно выращенную трещину. Геометрия образцов выполнена в соответствии с требованиями международного стандарта ASTM E1820 [17]. Было испытано по пять образцов различной толщины (рис. 1) при постоянном отношении длины трещины к ширине образца $a/W = 0,5$.

В результате испытаний были получены значения разрушающей нагрузки для различных сочетаний длины трещины и толщины образца. Длина трещины измерялась после разрушения в девяти различных сечениях по толщине образца вдоль линии фронта предварительно выращенной трещины (рис. 2).

Результаты замеров длины трещины, толщины образцов и значений разрушающей нагрузки, полученные в результате проведения испытаний, занесены в табл. 1.

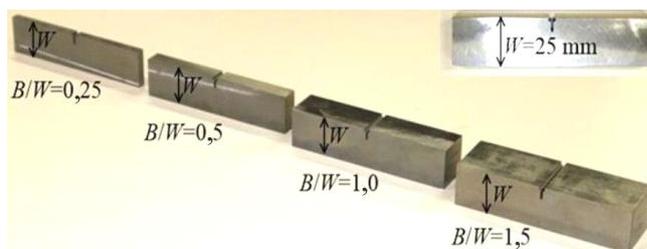


Рис. 1. Образцы для испытаний на определение вязкости разрушения при трехточечном изгибе

Fig. 1. Specimens for tests of the three-point bending fracture toughness



Рис. 2. Образец после испытаний

Fig. 2. Test specimen after failure

Помимо этого, были проведены испытания цилиндрических образцов на одноосное растяжение для определения основных механических свойств материала. Механические свойства стали S55C, полученные в результате анализа диаграммы одноосного растяжения, представлены в табл. 2. Данные свойства были использованы при проведении численных расчетов.

Таблица 1

Результаты испытаний

Table 1

Results of tests

B/W = 0,25		№№	1	2	3	4	5
Разрушающая нагрузка	F_c , кН		5,39	6,26	5,29	5,99	6,17
Толщина образца	B , мм		6,24	6,25	6,23	6,25	6,23
Длина трещины в различных сечениях образца	$a1$, мм		12,33	12,03	11,91	12,28	12,17
	$a2$, мм		12,61	12,33	12,34	12,53	12,41
	$a3$, мм		12,75	12,53	12,52	12,66	12,56
	$a4$, мм		12,80	12,63	12,58	12,70	12,67
	$a5$, мм		12,83	12,67	12,65	12,72	12,69
	$a6$, мм		12,75	12,64	12,63	12,69	12,61
	$a7$, мм		12,68	12,63	12,55	12,62	12,53
	$a8$, мм		12,60	12,63	12,45	12,50	12,40
	$a9$, мм		12,42	12,35	12,22	12,14	12,22
B/W = 0,5		№№	1	2	3	4	5
Разрушающая нагрузка	F_c , кН		10,50	12,03	10,82	11,56	11,45
Толщина образца	B , мм		12,51	12,48	12,51	12,48	12,51
Длина трещины в различных сечениях образца	$a1$, мм		11,97	12,01	11,99	12,05	12,07
	$a2$, мм		12,33	12,43	12,39	12,51	12,46
	$a3$, мм		12,51	12,64	12,60	12,68	12,61
	$a4$, мм		12,65	12,77	12,69	12,74	12,70
	$a5$, мм		12,70	12,85	12,79	12,78	12,76
	$a6$, мм		12,67	12,82	12,71	12,74	12,68
	$a7$, мм		12,62	12,74	12,62	12,63	12,63
	$a8$, мм		12,51	12,57	12,42	12,47	12,44
	$a9$, мм		11,99	12,15	11,93	12,05	12,06

$B/W = 1,0$	№№	1	2	3	4	5
Разрушающая нагрузка	F_c , кН	22,69	22,36	24,07	23,85	–
Толщина образца	B , мм	24,97	25,02	24,96	25,01	–
Длина трещины в различных сечениях образца	$a1$, мм	11,70	11,59	11,81	10,47	–
	$a2$, мм	12,36	12,33	12,56	12,08	–
	$a3$, мм	12,54	12,58	12,73	12,52	–
	$a4$, мм	12,65	12,70	12,78	12,62	–
	$a5$, мм	12,70	12,73	12,80	12,75	–
	$a6$, мм	12,66	12,71	12,73	12,80	–
	$a7$, мм	12,53	12,60	12,60	12,76	–
	$a8$, мм	12,31	12,39	12,33	12,64	–
$a9$, мм	11,66	11,65	11,72	12,07	–	
$B/W = 1,5$	№№	1	2	3	4	5
Разрушающая нагрузка	F_c , кН	34,90	35,74	37,27	35,04	–
Толщина образца	B , мм	37,48	37,50	37,52	37,52	–
Длина трещины в различных сечениях образца	$a1$, мм	11,35	11,86	11,84	11,20	–
	$a2$, мм	12,18	12,58	12,59	12,28	–
	$a3$, мм	12,40	12,72	12,73	12,56	–
	$a4$, мм	12,56	12,83	12,75	12,69	–
	$a5$, мм	12,62	12,83	12,73	12,80	–
	$a6$, мм	12,63	12,77	12,63	12,83	–
	$a7$, мм	12,60	12,60	12,52	12,83	–
	$a8$, мм	12,37	12,43	12,27	12,71	–
$a9$, мм	11,62	11,66	11,53	11,83	–	

Таблица 2

Механические свойства стали S55C

Table 2

Mechanical properties of S55C steel

Марка стали	Модуль упругости E , ГПа	Предел текучести σ_0 , МПа	Предел выносливости σ_B , МПа	Истинное сопротивление отрыву S_k , МПа	Константа модели Рамберга – Осгуда α	Показатель деформационного упрочнения n
S55C	212,4	393	703	1274	1,265	5,45

Численные исследования

Для определения пластических коэффициентов интенсивности напряжений были проведены численные исследования. На основе полученных в результате испытаний криволинейных форм фронта трещины были сформированы трехмерные расчетные схемы метода конечных элементов. Задача моделировалась в симметричной постановке в программном комплексе ANSYS. Трещина моделировалась в виде математического разреза (рис. 3).

Расчетные схемы состояли в среднем из 500 тысяч 20-узловых элементов второго порядка. Свойства материала задавались линейно-степенной зависимостью Рамберга – Осгуда на основе результатов испытаний на одноосное растяжение. Для обеспечения сходимости результатов в рассматриваемых областях зоны пластичности виртуальная модель имеет значительное сгущение сетки конечных элементов по мере приближения к фронту моделируемой трещины, минимальный размер

элементов в области вершины трещины составлял не более 0,5 мкм.

В результате численного моделирования были получены поля напряженно-деформированного состояния испытанных образцов, необходимые для определения пластических коэффициентов интенсивности напряжений.

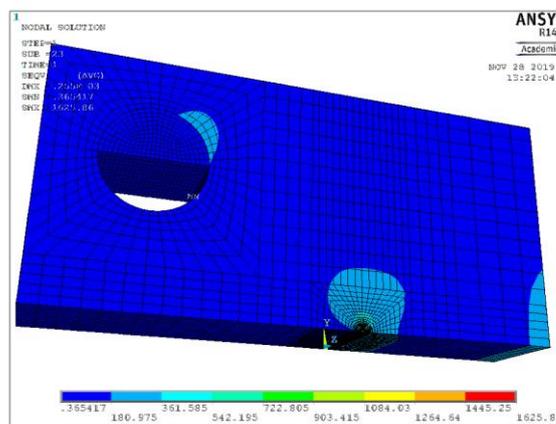


Рис. 3. Конечно-элементная модель компактного образца

Fig. 3. Finite element model of the compact tension specimen

Обработка результатов

Значения пластического коэффициента интенсивности напряжений определялись согласно методике, описанной в [4]. Для этого из численного решения упруго-пластических полей напряжений и деформаций в области вершины трещины находятся значение контурного I_p -интеграла и входящие в него функции напряжений и перемещений:

$$I_n = \frac{n}{n+1} (\tilde{\sigma}_e^{n+1})^{FEM} \cos\theta - \left[\tilde{\sigma}_{rr}^{FEM} \left(\tilde{u}_0^{FEM} - \frac{d\tilde{u}_r^{FEM}}{d\theta} \right) - \tilde{\sigma}_{r\theta}^{FEM} \left(\tilde{u}_r^{FEM} + \frac{d\tilde{u}_\theta^{FEM}}{d\theta} \right) \right] \sin\theta - \frac{1}{n+1} (\tilde{\sigma}_{rr}^{FEM} \tilde{u}_r^{FEM} + \tilde{\sigma}_{r\theta}^{FEM} \tilde{u}_\theta^{FEM}) \cos\theta, \quad (5)$$

где индекс *FEM* относится к полям напряжений и перемещений, полученных в результате численного анализа по методу конечных элементов, $\tilde{\sigma}_{rr}^{FEM}, \tilde{\sigma}_{\theta\theta}^{FEM}, \tilde{\sigma}_e^{FEM}$ – безразмерные функции радиальных, угловых и эквивалентных напряжений; $\tilde{u}_r^{FEM}, \tilde{u}_\theta^{FEM}$ – радиальные и угловые функции перемещений в полярной системе координат, центрированной на вершину трещины [4].

Далее вычисляется непосредственно пластический коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_p = \left[\left(\frac{K_1}{\sigma_0} \right)^2 \frac{1}{\alpha I_n W} \right]^{\frac{1}{n+1}}. \quad (6)$$

Помимо этого, на основе результатов испытаний был произведен расчет упругих коэффициентов интенсивности напряжений вдоль фронта трещины. Упругие коэффициенты интенсивности напряжений рассчитывались согласно методике, описанной в ASTM E1820 [17]:

$$K_{II} = \frac{F_c S Y}{B W^{\frac{3}{2}}}, \quad (7)$$

где *S* – расстояние между опорами при трехточечном изгибе; *F_c* – нагрузка страгивания трещины; *Y* – тарировочная функция, которая определяется из следующего соотношения:

$$Y = \frac{3 \sqrt{\frac{a}{W}} \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}}. \quad (8)$$

Таблица 3

Критические значения упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений

Table 3

Critical values of elastic and plastic coefficients of stress intensity

№№	<i>B/w = 0,25</i>					<i>B/w = 0,5</i>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>K_I</i>	56,77	59,26	64,99	66,55	67,483	56,26	58,2	61,74	62,75	65,62
<i>K_p</i>	0,7	0,709	0,732	0,744	0,75	0,699	0,71	0,722	0,725	0,733
№№	<i>B/w = 1</i>					<i>B/w = 1,5</i>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>K_I</i>	59,46	60,47	63,43	65,06		61,31	62,92	64,46	66,5	
<i>K_p</i>	0,715	0,722	0,735	0,741		0,723	0,73	0,733	0,749	

Из полученных в результате расчетов значений упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений были выбраны максимальные значения вдоль каждого фронта трещины, полученного в результате испытаний. Для всех испытанных образцов данная точка фронта трещины соответствует серединной плоскости симметрии образца. Результаты расчетов критических значений коэффициентов интенсивности напряжений представлены в табл. 3.

Результаты и обсуждение

На рис. 4, *a* представлены результаты определения параметров модифицированной модели Вэйбула [10] в терминах упругих коэффициентов интенсивности напряжений. Аппроксимирующая функция в данном случае задается уравнением (4). Как уже говорилось ранее, упругий коэффициент интенсивности напряжений нечувствителен к эффектам стеснения. Даже введение в статистическую модель поправок на толщину образца не способно устранить эффекты, вызывающие увеличение или уменьшение значений разрушающих упругих коэффициентов интенсивности напряжений. Результаты показывают, что вероятность разрушения для фиксированного значения упругого коэффициента интенсивности напряжений остается зависимой от толщины образца, так как на диаграмме вероятностного разрушения образцы распределены по группам.

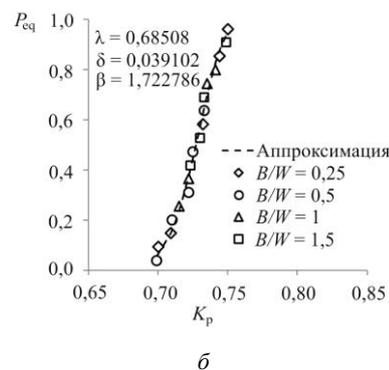
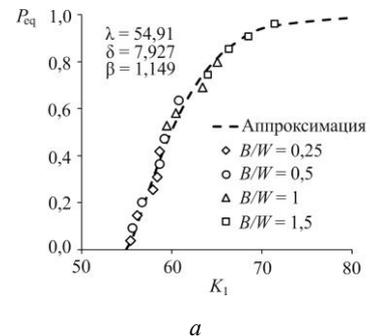


Рис. 4. Кривые вероятностного разрушения

Fig. 4. Weibull curves for failure prediction

Пластический коэффициент интенсивности напряжений является чувствительным к эффектам стеснения через управляющий параметр полей напряжений и деформаций

I_n . Таким образом, при построении диаграммы вероятностного разрушения нет необходимости во введении в модель толщины образца как таковой. При правильном подборе критериальной величины GP модифицированная модель Вейбула в форме уравнения (2) должна быть достаточной для проведения статистического анализа.

На рис. 4, б отображена кривая вероятностного разрушения в терминах пластического коэффициента интенсивности напряжений, аппроксимированная уравнением (2). Результаты анализа показывают, что толщина образца не влияет на вероятность разрушения при выборе пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве критериальной величины. При изменении толщины образца не происходит смещения массива экспериментальных точек вдоль диаграммы вероятности разрушения, и для фиксированного значения критериальной величины вероятность разрушения находится в одинаковых пределах для любой толщины образца. Процентное соотношение дисперсии результатов также выгодно отличается в сторону пластического коэффициента интенсивности напряжений (20 % против 7 %). Это говорит о том, что использование пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве критериальной величины при определении вязкости разрушения предпочтительнее использования только упругих модельных представлений.

Необходимо отметить, что модельные представления, заложенные в аналитическое решение пластических полей напряжений и деформаций в области вер-

шины трещины, предполагают пренебрежимо малую составляющую упругих деформаций. Таким образом, использование пластического коэффициента интенсивности напряжений наиболее оправданно при значительных областях пластических деформаций. В тех же случаях, когда упругие и пластические деформации соизмеримы, предпочтительнее выбирать обобщенную характеристику сопротивления разрушению. В качестве такой характеристики может выступать общая плотность энергии деформации, так как модельные представления, заложенные в понятие общей плотности энергии деформации, включают в себя аналитическое решение как упругих, так и пластических полей напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины.

Выводы

Проведен статистический анализ вязкости разрушения компактных образцов, выполненных из стали S55C, в терминах упругих и пластических коэффициентов интенсивности напряжений. Продемонстрированы преимущества использования пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве обобщенного параметра вероятности разрушения. Помимо этого, чувствительность пластического коэффициента интенсивности напряжений к эффектам стеснения позволяет избежать введения дополнительных параметров в статистические модели оценки вероятности разрушения.

Библиографический список

- Williams M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack // *Journal of Applied Mechanics*. – 1957. – Vol. 24. – P. 109–114.
- Hutchinson J.W. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material // *J MechPhys Solids*. – 1968. – Vol. 16. – P. 13–31. DOI: 10.1016/0022-5096(68)90014-8
- Rice J.R., Rosengren G.F. Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-law Hardening Material // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1968. – Vol. 16. – P. 1–12. DOI: 10.1016/0022-5096(68)90013-6
- Shlyannikov V.N., Tumanov A.V. Characterization of crack tip stress fields in test specimens using mode mixity parameters // *Int. J. Fract.* – 2014. – Vol. 185. – P. 49–76.
- Туманов А.В., Бойченко Н.В. Особенности определения управляющих параметров состояния в области вершины трещины на основе метода конечных элементов // *Труды Академэнерго*. – 2015. – №4. – С. 90–100. DOI: 10.1007/s10704-013-9898-0
- Shlyannikov V.N., Yarullin R., Ishtyryakov I. Effect of different environmental conditions on surface crack growth in aluminum alloys // *Frattura de Integrita Strutturale*. – 2017. – Vol. 11. – P. 31–39. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.41.05
- Захаров А.П., Шлянников В.Н., Иштыряков И.С. Пластический коэффициент интенсивности напряжений в задачах механики разрушения // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2019. – № 2. – С. 100–115.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 10-е изд., стер. – М.: Academia, 2005. – 576 с.
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.-Trans. ASME T.* – 1951. – Vol. 18 (3). – P. 293–297.
- Probabilistic Weibull methodology for fracture prediction of brittle and ductile materials / M. Muniz-Calvente, A. Fernández-Canteli, V.N. Shlyannikov, E. Castillo // *Appl. Mech. Mater.* – 2015. – Vol. 784. – pp. 443–451.
- A methodology for probabilistic definition of the apparent fracture toughness of notched elements based on the TCD / M. Muniz-Calvente, S. Blasón, J.A.F.O. Correia, S. Cicero, A.M.P. De Jesus, A. Fernández-Canteli // *2nd International Conference on Structural Integrity (FFCN 2017)*. Portugal. Madeira. 04-07 September 2017.
- A methodology for probabilistic prediction of fatigue crack initiation taking into account the scale effect / M. Muniz-Calvente, A.M.P. de Jesus, J.A.F.O. Correia, A. Fernández-Canteli // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2017. – Vol. 185. – P. 101–113. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.014
- Generalized probabilistic model allowing for various fatigue damage variables / José Correia, Nicole Apetre, Attilio Arcari, Abílio De Jesus, Miguel Muñoz-Calvente, Rui Calçada, Filippo Berto, Alfonso Fernández-Canteli // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100/1. – P. 187–194. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.031
- Bernard A., Bos-Levenbach E.C. The Plotting of Observations on Probability-paper // *Stichting Mathenatisch Centrum. Statistische Afdeling*. Sep. 1995.
- Бойченко Н.В., Туманов А.В. Построение интегральных функций распределения вероятности разрушения в тер-

минах упругих коэффициентов интенсивности напряжений // Труды Академэнерго. – 2019. – № 3. – С. 93–106.

16. Tomohiro Tanaka, Toshiyuki Meshii. Formulating Test Specimen Thickness Effect on Fracture Toughness With T33-Stress: Case of 3PB Test Specimen // American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP. – 2010. – Vol. 6. – P. 1213–1219. DOI: 10.1115/PVP2010-25872

17. ASTM E1820-11, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International. West Conshohocken, PA. 2012.

18. Ruggieri C., Dodds Jr. R.H. An engineering methodology for constraint corrections of elastic–plastic fracture toughness—Part I: A review on probabilistic models and exploration of plastic strain effects. *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – Vol. 134. – P. 368–390. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.015

19. Ruggieri C., Savioli R.G., Dodds Jr. R.H. An engineering methodology for constraint corrections of elastic–plastic fracture toughness—Part II: Effects of specimen geometry and plastic strain on cleavage fracture. *Engineering Fracture Mechanics*. – 2015. – Vol. 146. – P. 185–209. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.06.087

20. Ruggieri C. An engineering methodology to assess effects of weld strength mismatch on cleavage fracture toughness using the weibull stress approach // *International Journal of Fracture*. – 2010. – Vol. 163. – P. 231–252.

21. Gao X., Ruggieri C., Dodds R.H. Calibration of Weibull Stress Parameters Using Fracture Toughness Data. *International Journal of Fracture*. – 1998. – Vol. 92. – P.175–200.

22. Development of a Weibull model of cleavage fracture toughness for shallow flaws in reactor pressure vessel material / B.R. Bass, P.T. Williams, W.J. McAfee, C.E. Pugh // 9 international conference on nuclear engineering, France 2001.

23. A Local Approach to Assess Effects of Specimen Geometry on Cleavage Fracture Toughness in Reactor Pressure Vessel Steels / D.F.B. Sarzosa, R. Savioli, C. Ruggieri, A. Jivkov, J. Beswick // Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Con-

ference. Volume 6B: Materials and Fabrication. Prague, Czech Republic. July 15–20, 2018. V06BT06A048. ASME. DOI: 10.1115/PVP2018-85063

24. Barbosa V.S., Ruggieri C. A simplified estimation procedure for the Weibull stress parameter, m, and applications to predict the specimen geometry dependence of cleavage fracture toughness // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2020. – Vol. 188, 104228. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104228

25. Stress triaxiality effect on cleavage fracture stress / G.L. Testa, N. Bonora, A. Ruggiero, G. Iannitti, D. Gentile // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 109. – P. 102689. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102689

26. Probabilistic and constitutive models for ductile-to-brittle transition in steels: A competition between cleavage and ductile fracture // L. Chen W. Liu, L. Yu, Y. Cheng, K. Ren, H. Sui, X. Yi, H. Duan, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2020. – Vol. 135. – P. 103809. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.103809

27. A.M. Najafabadi, F.R. Biglari, K. Nikbin. Probability of brittle failure in different geometries using a simplified constraint based local criterion method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 104. – P. 102331. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102331

28. Tiwari A., Singh R.N., Stähle P. Weibull triaxiality: A novel constraint assessment parameter for cleavage fracture in ductile to brittle transition region // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1389–1401. DOI: 10.1111/ffe.12784

29. Zhang Z., Qian X. Effect of experimental sample size on local Weibull assessment of cleavage fracture for steel. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. – 2017. – Vol. 40. – P. 1128–1142. DOI: 10.1111/ffe.12571

30. A new local approach to cleavage fracture and its application in a reactor pressure vessel / G. Qian, W.-S. Lei, S. Zhu, J. Correia, A. De Jesus // *Procedia Structural Integrity*. – 2018. – Vol. 13. – P. 2174–2179. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.145

References

1. Williams M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*, 1957, vol. 24, pp. 109–114.

2. J.W. Hutchinson. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material. *J MechPhys Solids*, 1968, vol. 16, pp. 13–31. DOI: 10.1016/0022-5096(68)90014-8

3. J.R. Rice, G.F. Rosengren. Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-law Hardening Material. *J. Mech. Phys. Solids*, 1968, vol. 16, pp.1–12. DOI: 10.1016/0022-5096(68)90013-6

4. Shlyannikov V.N., Tumanov A.V. Characterization of crack tip stress fields in test specimens using mode mixity parameters. *Int. J. Fract*, 2014, vol. 185, pp.49–76.

5. Tumanov A.V., Boichenko N.V. Osobennosti opredeleniia upravliaiushchikh parametrov sostoianii v oblasti vershiny treshchiny na osnove metoda konechnykh elementov [Features of determining the control parameters of the state in the region of the crack tip based on the finite element method]. *Trudyakademenergo*, 2015, no.4, pp. 90–100. DOI: 10.1007/s10704-013-9898-0

6. Shlyannikov V.N., Yarullin R., Ishtyryakov I. Effect of different environmental conditions on surface crack growth in aluminum alloys. *Frattura de Integrita Strutturale*, 2017, vol. 11, pp. 31–39. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.41.05

7. Zakharov A.P., Shlyannikov V.N., Ishtyryakov I.S. Plastic stress intensity factor in fracture mechanics. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 2, pp. 100–115. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.08

8. Venttsel' E. S. Teoriia veroiatnostei, 10-e izd., ster. [Probability theory], Moscow, Academia, 2005, 576 p, ISBN 5-7695-2311-5.

9. Weibull, W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.-Trans. ASME T*, 1951, vol. 18 (3), pp. 293–297.

10. Muniz-Calvente M., Fernández-Canteli A., Shlyannikov V.N., Castillo E. Probabilistic Weibull methodology for fracture prediction of brittle and ductile materials. *Appl. Mech. Mater*, 2015, vol. 784, pp. 443–451.

11. M. Muniz-Calvente, S. Blasón, J.A.F.O. Correia, S. Ciceiro, A.M.P. De Jesus, A. Fernández-Canteli. Probabilistic definition of the apparent fracture toughness of notched elements based on the TCD. *2nd International Conference on Structural Integrity (FFCN 2017). Portugal. Madeira. 04-07 September 2017*.

12. Muniz-Calvente M., A.M.P de Jesus, Correia J.A.F.O., Fernández-Canteli A. A methodology for probabilistic prediction of fatigue crack initiation taking into account the scale effect. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 185.– pp. 101–113. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.014.

13. José Correia, Nicole Apetre, Attilio Arcari, Abilio De Jesus, Miguel Muñoz-Calvente, Rui Calçada, Filippo Berto, Alfonso Fernández-Canteli. Generalized probabilistic model allowing for various fatigue damage variables. *International Journal of Fatigue*, 2017, V100/1:187–194, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.031.

14. Bernard A., Bos-Levenbach E.C. The Plotting of Observations on Probability-paper. Stichting Mathenatisch Centrum. *Statistische Afdeling*. Sep.1995
15. Boichenko N.V., Tumanov A.V. Postroenie integral'nykh funktsii raspredeleniia veroiatnosti razrusheniia v terminakh uprugikh koeffitsientov intensivnosti napriazhenii [Construction of integral functions of the fracture probability distribution in terms of elastic stress intensity factors]. *Trudy Akademenergo*, 2019, no.3, S. 93-106.
16. Tomohiro Tanaka, Toshiyuki Meshii. Formulating Test Specimen Thickness Effect on Fracture Toughness With T33-Stress: Case of 3PB Test Specimen. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2010, vol.6, pp. 1213-1219. DOI: 10.1115/PVP2010-25872
17. ASTM E1820-11, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International. *West Conshohocken. PA*. 2012.
18. C. Ruggieri, R.H. Dodds Jr. An engineering methodology for constraint corrections of elastic-plastic fracture toughness—Part I: A review on probabilistic models and exploration of plastic strain effects. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol.134, pp.368-390. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.12.015
19. C. Ruggieri, R.G. Savioli, R.H. Dodds Jr. An engineering methodology for constraint corrections of elastic-plastic fracture toughness—Part II: Effects of specimen geometry and plastic strain on cleavage fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol.146, pp.185-209 DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.06.087
20. Ruggieri, C. “An engineering methodology to assess effects of weld strength mismatch on cleavage fracture toughness using the weibull stress approachs”. *International Journal of Fracture*, 2010, vol.163, pp. 231–252.
21. Gao,X., Ruggieri, C. and Dodds, R. H., Calibration of Weibull Stress Parameters Using Fracture Toughness Data. *International Journal of Fracture*, 1998, vol. 92, pp.175-200.
22. Bass, B.R., Williams, P.T., McAfee, W.J., & Pugh, C.E. Development of a Weibull model of cleavage fracture toughness for shallow flaws in reactor pressure vessel material. 9 international conference on nuclear engineering, France 2001.
23. Sarzosa, DFB, Savioli, R, Ruggieri, C, Jivkov, A, & Beswick, J. "A Local Approach to Assess Effects of Specimen Geometry on Cleavage Fracture Toughness in Reactor Pressure Vessel Steels." Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference. volume 6B: Materials and Fabrication. Prague, Czech Republic. July 15–20, 2018. V06BT06A048. ASME. DOI: 10.1115/PVP2018-85063
24. V. S. Barbosa, C. Ruggieri. A simplified estimation procedure for the Weibull stress parameter, m, and applications to predict the specimen geometry dependence of cleavage fracture toughness. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020. - vol.188, 104228. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2020.104228
25. G.l Testa, N. Bonora, A. Ruggiero, G. Iannitti, D. Gentile. Stress triaxiality effect on cleavage fracture stress. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020. - vol 109, 102689 DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102689
26. L. Chen et al. Probabilistic and constitutive models for ductile-to-brittle transition in steels: A competition between cleavage and ductile fracture. L. Chen W. Liu, L. Yu, Y. Cheng, K. Ren, H. Sui, X. Yi, H. Duan. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. - 2020, - vol.135, 103809. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.103809
27. A. M. Najafabadi, F. R. Biglari, K. Nikbin. Probability of brittle failure in different geometries using a simplified constraint based local criterion method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, vol.104, 102331 DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102331
28. A. Tiwari, R.N. Singh, P. Stähle. Weibull triaxiality: A novel constraint assessment parameter for cleavage fracture in ductile to brittle transition region. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, vol.41, pp.1389-1401. DOI: 10.1111/ffe.12784
29. Zhang, Z., and Qian, X. Effect of experimental sample size on local Weibull assessment of cleavage fracture for steel. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 2017, vol.40, pp.1128– 1142. DOI: 10.1111/ffe.12571 .
30. G. Qian, W.-S. Lei, S. Zhu, J. Correia, A. De Jesus. A new local approach to cleavage fracture and its application in a reactor pressure vessel. *Procedia Structural Integrity*, 2018, vol.13, pp. 2174-2179. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.145.