УДК 539.3:539.42 EDN WKOWAY

Применение двухпараметрической механики разрушения для анализа трещиностойкости трубопроводных систем

© А.М. Покровский, П.М. Захаров, А.И. Казанцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Для модели трубы с продольной трещиной и растянутой в двух направлениях пластины с трещиной проведено сравнение результатов численного расчета в конечно-элементном комплексе ANSYS основных параметров двухпараметрической линейной механики разрушения. В частности, были рассмотрены коэффициент интенсивности напряжений, а также несингулярные T_{xx}- и T_{zz}-напряжения, входящие в асимптотическое распределение Вильямса для напряжений в окрестности фронта трещины в трехмерном теле. Показано, что для анализа трещиностойкости газопровода без потери точности можно использовать расчетную модель пластины. При этом количество конечных элементов по сравнению с моделью трубы уменьшается более чем в 3 раза. Проведена оценка трещиностойкости линейного участка магистрального газопровода с продольной поверхностной полуэллиптической трещиной на удалении от поперечного сварного шва. Установлено, что однопараметрический силовой критерий разрушения Ирвина дает заниженные результаты в сопоставлении с более точным двухпараметрическим критерием разрушения, учитывающим двухосное стеснение деформаций по фронту трещины. Показано, что по мере увеличения отношения полудлины полуэллиптической продольной поверхностной трещины в газопроводе к ее глубине критическая глубина трещины уменьшается.

Ключевые слова: *трубопровод, трещиностойкость, коэффициент интенсивности напряжений, Т-напряжения, двухпараметрический критерий разрушения, трещина нормального отрыва*

Введение. Анализ трещиностойкости нагруженных внутренним давлением трубопроводов — чрезвычайно актуальная задача, так как задачи этого типа характерны для нефте- и газопроводов, трубопроводных систем атомных реакторов, гидравлических и пневмотрубопроводов в авиационной и космической технике. В современной инженерной практике анализа прочности трубопроводных систем применяют два подхода, а именно использование теории прочности или механики разрушения. При этом различие между ними определяется характером рассматриваемого предельного состояния конструкционного элемента. Теория прочности ориентирована на расчет критической нагрузки, приводящей к разрушению целостной конструкции при отсутствии исходных трещиноподобных дефектов. Данный подход представлен, например, в работах [1–3].

Механика разрушения фокусируется на анализе поведения конструкции с уже имеющимися дефектами: трещинами, надрезами,

коррозионными повреждениями. Анализ статической прочности детали или конструкции на основе механики разрушения обычно называется оценкой трещиностойкости. Такая оценка нагруженных внутренним давлением трубопроводов представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Это обусловлено тем, что основным механизмом разрушения трубопроводных систем является процесс коррозионного растрескивания [4]. Следует подчеркнуть, что в большинстве опубликованных исследований, посвященных оценке трещиностойкости трубопроводов, при анализе используются однопараметрические критерии и линейная механика разрушения, основной критерий которой — силовой критерий разрушения Ирвина. Данный подход встречается, например, в работах [5–8].

В научной литературе представлены различные методологические подходы к оценке трещиностойкости трубопроводов. Так, в работе [9] авторы применяют комбинированный метод, задействуя как линейную, так и нелинейную механику разрушения. В работе [10] фокус смещен на использование нелинейной однопараметрической механики разрушения, в данном исследовании был выбран критерий разрушения Уэллса. Помимо детерминированных методик оценки трещиностойкости в некоторых работах был принят вероятностный подход. Например, в статье [11] для прогнозирования вероятности отказа трубопровода, имеющего коррозионный дефект, применяется закон распределения Гутенберга — Рихтера.

Основное ограничение однопараметрических критериев разрушения — их неспособность учитывать эффект стеснения деформаций вдоль фронта трещины, что критически важно для корректной оценки трещиностойкости [12]. В частности, использование однопараметрического критерия Ирвина при оценке трещиностойкости трубопроводов не позволяет учесть влияние двухосности нагружения — растягивающих напряжений, ориентированных параллельно фронту трещины.

В связи с этим в современной практике оценки трещиностойкости конструкций наблюдается тенденция к применению двухпараметрической линейной механики разрушения. В отличие от однопараметрической линейной механики разрушения в двухпараметрической учитывается не только коэффициент интенсивности напряжений (КИН), но и несингулярные члены разложения Вильямса [12] для описания напряженного состояния в окрестности фронта трещины. Эти дополнительные параметры называются *T*-напряжениями. Значительный вклад в развитие численных методов их расчета внесли исследования, результаты которых приведены в [13, 14]. Однако и они обладают существенным ограничением: в рамках данных работ анализируются исключительно T_{xx}-напряжения, тогда как T_{zz}-напряжения остаются вне сферы рассмотрения.

Необходимо отметить, что несмотря на определенные успехи в области оценки трещиностойкости конструкций, проблема учета двухосного стеснения деформаций по фронту трещины по-прежнему не может считаться до конца решенной. В данной статье для оценки трещиностойкости газопровода используется двухпараметрический критерий разрушения [15], позволяющий учитывать двухосное стеснение деформаций по фронту трещины. В отличие от существующих подходов, в этот критерий наряду с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) включены T_{xx} и T_{zz}. При этом T_{xx}-напряжения описывают стеснение деформаций в поперечном направлении, а T_{zz}-напряжения отвечают за учет стеснения деформаций в продольном направлении. Важнейшее преимущество данного критерия — отсутствие необходимости в проведении специальных экспериментальных исследований. Для расчетов требуются лишь стандартные механические характеристики материала — предел текучести и вязкость разрушения, определенная в условиях максимального трехосного стеснения деформации. Таким образом, данный двухпараметрический критерий обеспечивает практическую применимость для более точной оценки трещиностойкости трубопроводных конструкций.

Цель настоящей работы — обосновать использование модели растянутой в двух направлениях пластины для оценки трещиностойкости нагруженного внутренним давлением трубопровода с полуэллиптической поверхностной трещиной, а также провести с использованием данной модели анализ трещиностойкости линейного участка магистрального газопровода, расположенного на удалении от поперечного стыкового сварного шва, с помощью классического критерия разрушения Ирвина и двухпараметрического критерия разрушения, учитывающего *T*-напряжения.

Двухпараметрический критерий разрушения. Изложим основные положения используемого в настоящей работе двухпараметрического критерия разрушения [15]. Согласно данному критерию, тангенциальные напряжения в зоне предразрушения равны локальной прочности материала [12]. При этом локальная прочность записывается для объемного тела, т. е. с учетом не только T_{xx}-, но и T_{zz}- напряжений [15]:

$$\frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r_c}} = \sigma_0 = -\frac{T_{xx} - 2T_{zz}}{2(1-2\mu)} + \sqrt{\left(\frac{T_{xx} - 2T_{zz}}{2(1-2\mu)}\right)^2 + \frac{\sigma_{\mathrm{т}}^2 - T_{xx}^2 - T_{zz}^2 + T_{xx}T_{zz}}{(1-2\mu)^2}}, \quad (1)$$

где K_{I} — КИН первого типа; r_c — размер зоны предразрушения; σ_0 — локальная прочность материала; T_{xx} и T_{zz} — компоненты несингулярных *T*-напряжений; μ — коэффициент Пуассона; $\sigma_{\mathrm{т}}$ — предел текучести.

Размер зоны предразрушения определяется на основании гипотезы пластичности Треска — Сен-Венана аналогично тому, как это делается при вычислении поправки Ирвина на пластическую зону, но только с учетом *T*-напряжений [15]:

$$r_c = \frac{(1-2\mu)^2}{2\pi}\left(\frac{K_{\mathrm{Ic}}}{\sigma_{\mathrm{т}} + T_{zz}}\right)^2, \qquad (2)$$

где K_{Ic} — вязкость разрушения.

Подстановка формулы (2) в уравнение (1) и введение для упрощения параметров χ_x и χ_z приводит к следующему выражению для эффективного КИН [15]:

$$K_{\mathrm{I}}^{\mathrm{эф}} = \frac{2(1+\chi_z)K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{(\chi_x - 2\chi_z)^2 + 4(1-\chi_x^2-\chi_z^2+\chi_x\chi_z)} - \chi_x + 2\chi_z}, \qquad (3)$$

где $\chi_x = \frac{T_{xx}}{\sigma_y}$, $\chi_z = \frac{T_{zz}}{\sigma_y}$ — отношения T_{xx} и T_{zz} к пределу текучести соответственно.

В результате критерий разрушения принимает такой вид:

$$K_{\mathrm{I}}^{\mathrm{эф}} = K_{\mathrm{Ic}}. \qquad (4)$$

Для оценки трещиностойкости вычисляются КИН и компоненты *T*-напряжений по фронту трещины, а по формуле (3), зная $\sigma_{\mathrm{т}}$, определяется эффективный КИН. Опасной точкой фронта будет та, в которой $K_{\mathrm{I}}^{\mathrm{эф}}$ станет максимальным.

Постановка задачи. Рассмотрим трубу магистрального газопровода с продольной краевой полуэллиптической трещиной. Размеры трубы, мм: внешний диаметр — 1420; толщина стенки — 21. Были приняты: внутреннее давление в трубопроводе равным 9,8 МПа, предел текучести равным 650 МПа; длина трубы равной 5680 мм.

Для тонкостенной трубы, какая выбрана для рассматриваемого газопровода, с отношением среднего диаметра к толщине более 67, при вычислении осевых и окружных напряжений с высокой степенью точности можно применять «котельные» формулы:

$$\sigma_m = \frac{pD_0}{4\delta}, \quad \sigma_t = \frac{pD_0}{2\delta}, \qquad (5)$$

где p — давление в трубе; D_0 — средний диаметр; δ — толщина стенки; σ_m, σ_t — осевые и окружные напряжения соответственно.

Обычно в качестве расчетной схемы трубы с продольной трещиной рассматривают растянутую по двум направлениям пластину с трещиной. При этом напряжения, перпендикулярные плоскости трещины, задают равными окружным напряжениям в трубе (5), а напряжения, параллельные плоскости трещины, — осевым напряжениям (5). В настоящей работе для подтверждения возможности применения для трубы расчетной схемы пластины проведено сравнение результатов численного расчета в конечно-элементном комплексе ANSYS основных параметров двухпараметрической линейной механики разрушения.

Обоснование возможности использования модели пластины с трещиной для оценки трещиностойкости трубы с трещиной. В процессе численного моделирования был рассмотрен ряд трещин с различными типоразмерами. Размеры трещин указаны в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические размеры трещин

Номер трещины	Полудлина трещины l, мм	Глубина трещины b, мм
1	1,5	4,5
2	2,0	4,0
3	3,0	3,0
4	4,0	2,0
5	4,5	1,5

Для вычисления КИН и T-напряжений в программном комплексе ANSYS была создана конечно-элементная модель трубы с продольной трещиной (рис. 1). В зоне, прилегающей к трещине, была применена более мелкая дискретизация (рис. 2). Такая конфигурация позволяла адекватно воспроизвести высокий градиент напряжений и обеспечить требуемую точность расчета параметров механики разрушения.



Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели трубы

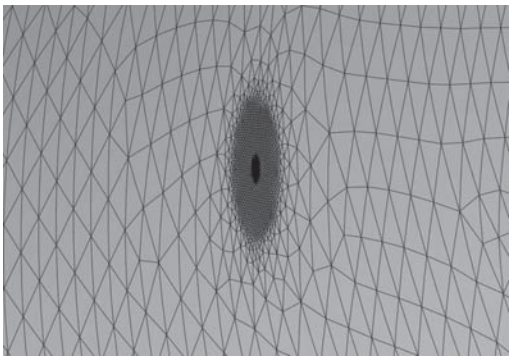


Рис. 2. Конечно-элементная модель трубы в зоне трещины

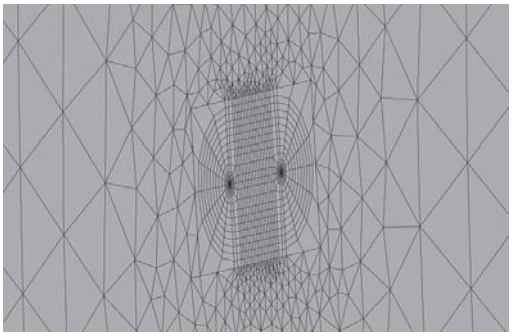


Рис. 3. Конечно-элементная модель трубы вблизи трещины

Конечно-элементная модель в окрестности трещины, демонстрирующая характер разбиения и распределение элементов вблизи фронта дефекта, представлена на рис. 3. При построении конечно-элементной модели применялись три типа конечных элементов (КЭ), каждый из которых выполнял свою функциональную роль в обеспечении точности расчета. Непосредственно в зоне фронта трещины использовались вырожденные из SOLID186 клиновые 15-узловые сингулярные КЭ. Примыкающая к фронту трещины зона описывалась 20-узловыми гексаэдрическими КЭ SOLID186. Эти элементы обеспечивали плавное сопряжение с клиновыми КЭ, расположенными по фронту трещины, и адекватно передавали характер напряженно-деформированного состояния в ближней зоне от трещины. Для заполнения остальной части расчетной области применялись 10-узловые тетраэдрические элементы SOLID187. Конечные элементы данного типа хорошо подходят для дискретизации объемных областей сложной геометрической формы, позволяя сохранять разумный баланс между точностью решения и вычислительными затратами. Конечно-элементная модель трубы состояла из 768 клиновых элементов, 3840 гексаэдрических и 206 329 тетраэдрических элементов.

При создании конечно-элементной модели пластины с полуэллиптической трещиной был использован подход, аналогичный принятому при создании конечно-элементной модели трубы. Применялись КЭ трех типов. Количество клиновых, гексаэдрических и тетраэдрических конечных элементов в модели составляло 384, 960 и 6228 соответственно. Размеры пластины принимались следующими, мм: ширина $W = 100$, длина $H = 100$, толщина $\delta = 21$. Конечно-элементная модель такой пластины представлена на рис. 4 и 5.

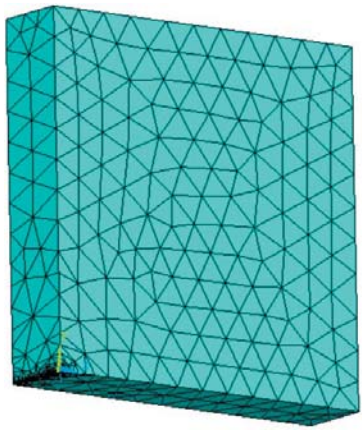


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной модели пластины

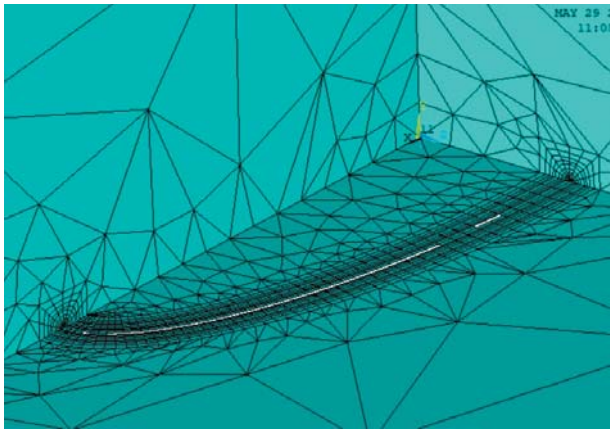


Рис. 5. Конечно-элементная модель пластины вблизи трещины

Для каждой модели был проведен сравнительный анализ параметров, необходимых для оценки трещиностойкости с использованием двухпараметрической линейной механики разрушения, а именно, КИН, T_{xx}- и T_{zz}-напряжений по фронту трещины. Следует отметить, что для вычисления КИН и T_{xx}-напряжений в ANSYS имеется встроенная функция. Значения T_{zz}-напряжений определялись по формуле [16]:

$$T_{zz} = \mu T_{xx} + E\varepsilon_z, \qquad (6)$$

где E — модуль Юнга; ε_z — деформация вдоль фронта трещины.

Отметим, что при расчете T_{zz}-напряжений по формуле (6) для каждой рассматриваемой точки фронта трещины использовалась локальная система координат, жестко привязанная к данной точке и адаптированная к геометрии дефекта. Ось x располагалась в плоскости трещины и была направлена перпендикулярно фронту, ось z также лежала в плоскости трещины, но была ориентирована по касательной к фронту, а ось y была перпендикулярна плоскости трещины. При этом T_{xx}-напряжения и ε_z определялись по фронту трещины с помощью ANSYS, а затем подставлялись в формулу (6) для вычисления T_{zz}-напряжений. Распределение ε_z по фронту трещины № 1 (см. табл. 1) приведено на рис. 6, где по оси абсцисс отложена относительная координата $\eta = s/s_0$ (s — координата точки фронта трещины, отсчитываемая от центра полуэллипса, s_0 — четверть периметра эллипса, величина $\eta = 1$ соответствует выходу трещины на поверхность).

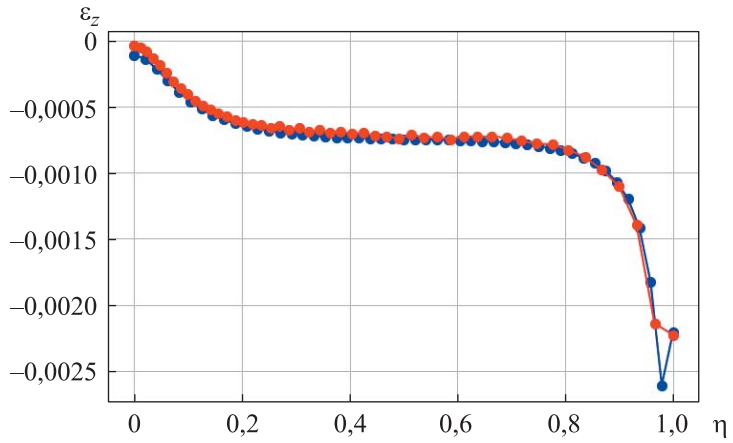


Рис. 6. Распределение окружных деформаций в пластине и трубе по фронту полуэллиптической продольной трещины ε_z № 1:
— труба; — пластина

Зависимости T-напряжений, КИН и эффективного КИН по фронту трещины соответственно представлены на рис. 7–10.

Проведенное численное исследование показало, что для всех трещин № 1–5 (см. табл. 1) рассматриваемых типоразмеров расхождение T_{xx}- и T_{zz}-напряжений не превышало 10 %, а КИН и эффективного КИН, полученных с использованием модели трубы и пластины, — менее 3 %. На основании этого был сделан вывод о возможности проводить без потери точности оценку трещиностойкости трубы с использованием расчетной схемы пластины.

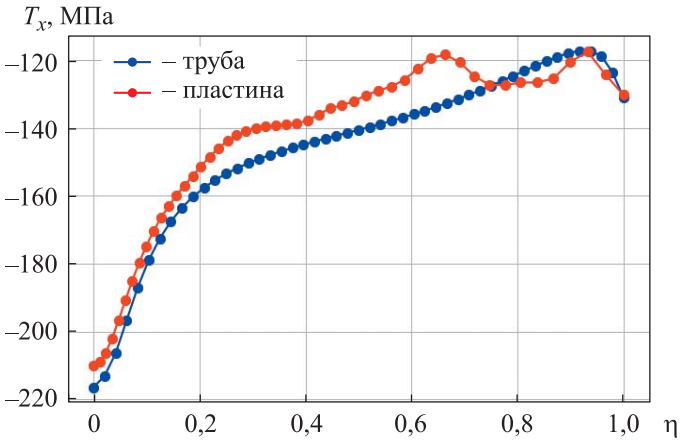


Рис. 7. Распределение T_{xx}-напряжений в пластине и трубе по фронту трещины № 1

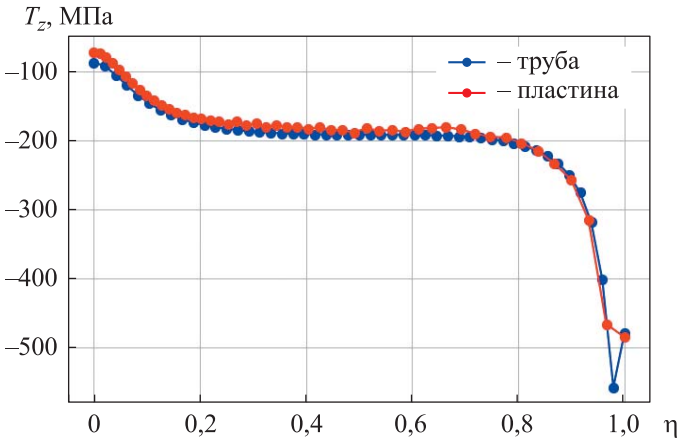


Рис. 8. Распределение T_{zz}-напряжений в пластине и трубе по фронту трещины № 1

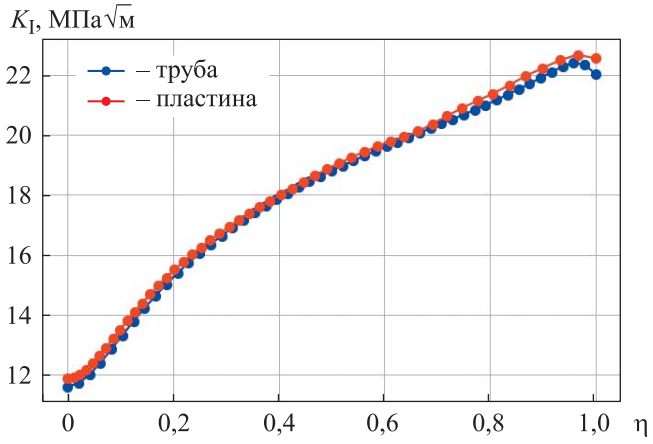


Рис. 9. Распределение КИН в пластине и трубе по фронту трещины № 1

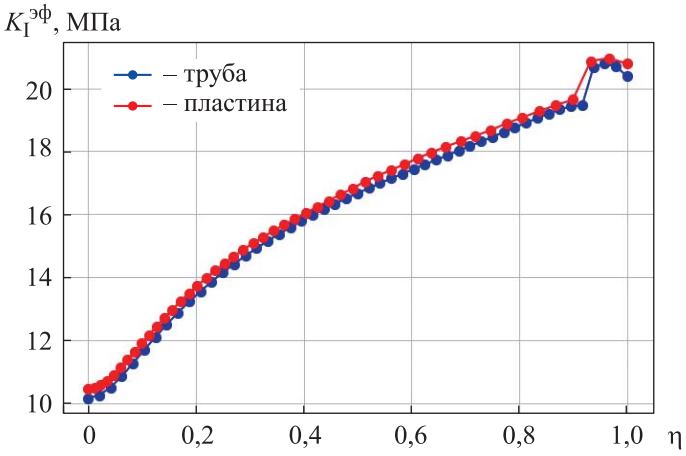


Рис. 10. Распределение эффективного КИН в пластине и трубе по фронту трещины № 1

Численный анализ трещиностойкости газопровода. На основании вышеизложенного оценка трещиностойкости газопровода проводилась с использованием расчетной схемы пластины, причем согласно одно- и двухпараметрической механике разрушения. В расчетах использовался однопараметрический силовой критерий разрушения Ирвина и описанный выше двухпараметрический критерий разрушения. Следует отметить, что в случае использование критерия Ирвина осевые напряжения в трубопроводе в расчет не принимаются, так как КИН зависит только от раскрывающих трещину окружных напряжений. Учесть осевые напряжения при оценке трещиностойкости трубопровода можно только посредством применения двухпараметрического критерия разрушения, в который кроме КИН входят T-напряжения.

В ходе анализа трещиностойкости газопровода итерационным способом определялись критические размеры полуэллиптической трещины, т. е. ее полудлина l и глубина b. Для двухпараметрического критерия итерационный алгоритм представлен ниже:

1) задавались начальные размеры трещины в соответствии с табл. 1;

2) вычислялись КИН, T_{xx}- и T_{zz}-напряжения по фронту трещины;

3) по формуле (3) определялся максимальный эффективный КИН по фронту трещины $K_I^{эф(max)}$ и сравнивался с вязкостью разрушения K_{Ic}, которая принималась равной 45 МПа $\sqrt{м}$;

4) корректировались значения размеров трещины, которые увеличивались, если $K_I^{эф(max)} < K_{Ic}$, и уменьшались, если $K_I^{эф(max)} > K_{Ic}$; при этом отношение полудлины трещины к ее глубине сохранялось;

5) все повторяется, начиная с п. 2;

6) итерационный процесс прекращается, когда $K_I^{эф(max)}$ отличается от K_{Ic} не более чем на 1 %.

Для однопараметрического силового критерия разрушения Ирвина в итерационном алгоритме в п. 2 вычислялся только КИН и сравнивалось его наибольшее значение по фронту с вязкостью разрушения. Следует отметить, что итерационный процесс определения критической глубины трещины является достаточно трудоемким, так как на каждой итерации приходится генерировать новую конечно-элементную сетку для трещины с новыми размерами. Результаты анализа сведены в табл. 2 и представлены на рис. 11.

Таблица 2

Критические размеры трещин согласно однопараметрическому критерию разрушения Ирвина и двухпараметрическому критерию

Номер трещины	Критерий разрушения Ирвина		Двухпараметрический критерий разрушения	
	$l_{кр}$, мм	$b_{кр}$, мм	$l_{кр}$, мм	$b_{кр}$, мм
1	5,85	17,55	6,89	20,67
2	6,52	13,04	7,34	14,68
3	9,43	9,43	10,27	10,27
4	14,12	7,06	16,5	8,25
5	17,16	5,72	20,53	6,51

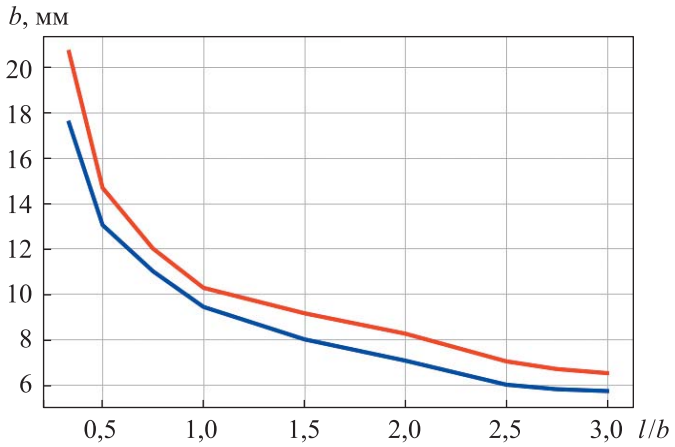


Рис. 11. Зависимости критической глубины трещины от отношения полудлины к глубине для одно- и двухпараметрического критериев разрушения:
— двухпараметрический критерий; — силовой критерий Ирвина

Заключение. Проведенное исследование позволило сформулировать следующие выводы. Для оценки статической трещиностойкости газопровода на основе двухпараметрической механики разрушения можно без потери точности использовать конечно-элементную модель растянутой в двух направлениях пластины с трещиной. При этом количество конечных элементов в модели уменьшается более

чем в 3 раза. Окружные деформации по всему фронту продольной трещины в газопроводе отрицательные. Причем максимальные по модулю деформации возникают в точке, выходящей на поверхность, а в наиболее заглубленной точке, в которой напряженное состояние близко к плоскому деформированному состоянию, практически равны нулю. При сопоставлении двух подходов к определению критической глубины трещины выявлено, что однопараметрический критерий Ирвина дает заниженные результаты по сравнению с двухпараметрическим критерием разрушения, учитывающим двухосное стеснение деформаций по фронту трещины. По мере увеличения отношения полудлины полуэллиптической продольной поверхностной трещины в газопроводе к ее глубине критическая глубина трещины уменьшается. Таким образом, длинные трещины опаснее коротких.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00117).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Мураткин Ф.А. Классификация методов решения задач обеспечения прочности и устойчивости подводных переходов магистральных газопроводов. *Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*: в 2 т. Тюмень, ТИУ, 2015, т. 1, с. 76–80.

[2] Кульков Е.П., Красюкова С.Н., Ватутин А.А. Расчет надземных газопроводов на прочность при проведении экспертизы промышленной безопасности. *Символ науки: международный научный журнал*, 2015, № 9-1, с. 83–85.

[3] Сидоров М.М., Голиков Н.И., Тихонов Р.П. Определение напряженно-деформированного состояния магистральных газопроводов, проложенных в зоне вечной мерзлоты. *Контроль. Диагностика*, 2020, т. 23, № 12 (270), с. 58–63.

[4] Зайцев А.И., Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Вайнштейн Д.Л., Рашковский А.Ю., Удод К.А., Есиев Т.С., Ряховских И.В. Исследование причин и механизмов коррозионно-механического разрушения сталей магистральных газопроводов. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2013, № 3, с. 65–74.

[5] Макаров Г.И., Капустин О.Е., Фомин Р.С. Экспериментальная оценка трещиностойкости сварных труб магистральных газопроводов. *Тезисы XII отраслевого совещания «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО Газпром»*. Москва, 2024, с. 35.

[6] Веселуха В.М., Богданович А.В. Диаграмма упругопластического разрушения и характеристики трещиностойкости при статическом нагружении трубной стали в связи с эксплуатационной наработкой. *Актуальные вопросы машиноведения*, 2015, т. 4, с. 219–222.

[7] Гринь Е.А., Саркисян В.А. Коррозионная трещиностойкость стали магистральных газопроводов ХВ70*. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2010, № 4, с. 75–80.

[8] Махутов Н.А., Покровский А.М., Дубовицкий Е.И. Анализ трещиностойкости магистрального нефтепровода с учетом изменяющейся вязкости разрушения в окрестности сварного шва. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2019, № 1, с. 44–52.

[9] Конищев Б.П., Родионов А.А., Митин А.С. Оценка трещиностойкости труб магистральных газопроводов. *Труды НГТУ им. Н.Е. Алексеева*, 2010, № 2 (81), с. 77–86.

[10] Макаров Г.И. Требования к вязкости разрушения металла труб магистральных газопроводов, гарантирующие отсутствие протяженных безостановочных разрушений. *Трубопроводный транспорт: теория и практика*, 2013, № 5 (39), с. 12–16.

[11] Komla J.P.A., Pluvinage G., Capelle Ju. Probability of failure of a pipe exposed to seismic displacement and internal pressure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*, 2023, vol. 89, no. 3, pp. 70–79.

[12] Матвиенко Ю.Г. *Двухпараметрическая механика разрушения*. Москва, Физматлит, 2020, 208 с.

[13] Mushankova K.A., Stepanova L.V. Molecular Dynamics Calculation of Asymptotic Series Coefficients for Stress Fields. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2025, vol. 66 (2), pp. 350–364.

[14] Фомченкова М.А., Степанова Л.В. Процедура переопределенного метода нахождения коэффициентов разложения полей у вершины трещины, основанная на конечно-элементном решении для компонент тензора напряжений. *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*, 2024, т. 30, № 2, с. 54–66.

[15] Matvienko Yu.G., Pokrovskii A.M. Two-dimensional crack path prediction for mixed mode I/II loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, vol. 323, paper 111218. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2025.111218

[16] Nakamura T., Parks D.M. Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack front an interaction integral. *Int. J. Solid Struct*, 1992, vol. 29, pp. 1597–1611.

Статья поступила в редакцию 15.06.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Покровский А.М., Захаров П.М., Казанцев А.И. Применение двухпраметрической механики разрушения для анализа трещиностойкости трубопроводных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 10. EDN WKOWAY

Покровский Алексей Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: pokrovsky@bmstu.ru

Захаров Павел Михайлович — аспирант кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zpasha14@mail.ru

Казанцев Алексей Игоревич — аспирант кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alkazantseff@mail.ru

Application of Two-Parameter Fracture Mechanics for Analyzing the Crack Resistance of Pipeline Systems

© A.M. Pokrovsky, P.M. Zakharov, A.I. Kazantsev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

For a pipe model with a longitudinal crack and a biaxially stretched plate with a crack, a comparison of the results of numerical calculation in the ANSYS finite element software package of the main parameters of two-parameter linear fracture mechanics, namely the stress intensity factor and the non-singular T_{xx} and T_{zz} stresses entering the Williams asymptotic stress distribution in the vicinity of the crack front in a three-dimensional body, is carried out. It is shown that for analyzing the crack resistance of a gas pipeline, a plate computational model can be used without loss of accuracy. At the same time, the number of finite elements is reduced by more than a factor of 3 compared to the pipe model. An assessment of the crack resistance of a linear section of a main gas pipeline with a longitudinal surface semi-elliptical crack at a distance from the transverse weld is carried out. It is established that the one-parameter Irwin force fracture criterion yields underestimated results compared to the more accurate two-parameter fracture criterion, which takes into account the biaxial constraint of deformations along the crack front. It is shown that as the ratio of the semi-length of the semi-elliptical longitudinal surface crack in the gas pipeline to its depth increases, the critical crack depth decreases.

Keywords: *pipeline, crack resistance, stress intensity factor, T-stresses, two-parameter fracture criterion, mode I crack*

The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-19-00117).

REFERENCES

[1] Muratkin F.A. Klassifikatsiya metodov resheniya zadach obespecheniya prochnosti i ustoychivosti podvodnykh perekhodov magistralnykh gazoprovodov [Classification of Methods for Solving Problems of Ensuring Strength and Stability of Underwater Crossings of Main Gas Pipelines]. In: *Problemy funktsionirovaniya sistem transporta: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: v 2 tomakh* [Problems of Functioning of Transport Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists: in 2 volumes]. Tyumen, TIU Publ., 2015, vol. 1, pp. 76–80.

[2] Kulkov E.P., Krasyukova S.N., Vatutin A.A. Raschet nadzemnykh gazoprovodov na prochnost pri provedenii ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti [Calculation of above-ground gas pipelines for strength during industrial safety expertise]. *Simvol nauki: mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal — Symbol of Science: International Scientific Journal*, 2015, no. 9-1, pp. 83–85.

[3] Sidorov M.M., Golikov N.I., Tikhonov R.P. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya magistralnykh gazoprovodov, prolozhennykh v zone vechnoy merzloty [Evaluation of the stressed deformed state of main gas pipelines running in permanently frozen grounds]. *Kontrol. Diagnostika — Testing. Diagnostics*, 2020, vol. 23, no. 12 (270), pp. 58–63.

[4] Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Baklanova O.N., Vaynshteyn D.L., Rashkovskiy A.Yu., Udod K.A., Esiev T.S., Ryakhovskikh I.V. Issledovanie prichin i mekhanizmov korrozionno-mekhanicheskogo razrusheniya staley magistralnykh

gazoprovodov [Investigation of the causes and mechanisms of corrosion-mechanical fracture of main gas pipeline steels]. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya — Problems of Ferrous Metallurgy and Materials Science*, 2013, no. 3, pp. 65–74.

[5] Makarov G.I., Kapustin O.E., Fomin R.S. Eksperimentalnaya otsenka treschinostoykosti svarnykh trub magistralnykh gazoprovodov [Experimental assessment of crack resistance of welded pipes of main gas pipelines]. In: *Tezisy XII otraslevogo soveshchaniya «Sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya svarochnogo proizvodstva PAO Gazprom»* [Abstracts of the XII Industry Meeting "State and Main Directions of Development of Welding Production of PJSC Gazprom"]. Moscow, 2024, p. 35.

[6] Veselukha V.M., Bogdanovich A.V. Diagramma uprugoplasticheskogo razrusheniya i kharakteristiki treshchinostoykosti pri staticheskom nagruzhenii trubnoy stali v svyazi s ekspluatatsionnoy narabotkoy [Diagram of elastoplastic fracture and crack resistance characteristics under static loading of pipe steel in connection with operational service life]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya — Current Issues of Machine Science*, 2015, vol. 4, pp. 219–222.

[7] Grin E.A., Sarkisyan V.A. Korrozionnaya treshchinostoykost stali magistralnykh gazoprovodov KhV70 [Corrosion crack resistance of steel of main gas pipelines KhV70]. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya — Problems of Ferrous Metallurgy and Materials Science*, 2010, no. 4, pp. 75–80.

[8] Makhutov N.A., Pokrovsky A.M., Dubovitsky E.I. Analiz treshchinostoykosti magistralnogo nefteprovoda s uchetom izmenyayushcheysya vyazkosti razrusheniya v okrestnosti svarnogo shva [Analysis of crack resistance of a main oil pipeline taking into account the changing fracture toughness in the vicinity of a weld]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin — Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2019, no. 1, pp. 44–52.

[9] Konischev B.P., Rodionov A.A., Mitin A.S. Otsenka treshchinostoykosti trub magistralnykh gazoprovodov [Gas pipeline pipes crack resistance assessment]. *Trudy NGTU im. N.E. Alekseeva — Transactions of NSTU named after R.E. Alekseev*, 2010, no. 2(81), pp. 77–86.

[10] Makarov G.I. Trebovaniya k vyazkosti razrusheniya metalla trub magistralnykh gazoprovodov, garantiruyushchie otsutstvie protyazhennykh bezostanovochnykh razrusheniy [Requirements to fracture toughness of pipe metal of main gas pipelines guaranteeing absence of extended non-stop failures]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika — Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2013, no. 5 (39), pp. 12–16.

[11] Komla J.P.A., Pluvinage G., Capelle Ju. Probability of failure of a pipe exposed to seismic displacement and internal pressure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*, 2023, vol. 89, no. 3, pp. 70–79.

[12] Matvienko Yu.G. *Dvukhparametricheskaya mekhanika razrusheniya* [Two-parameter fracture mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2020, 208 p.

[13] Mushankova K.A., Stepanova L.V. Molecular dynamics calculation of asymptotic series coefficients for stress Fields. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2025, vol. 66, no. 2, pp. 350–364.

[14] Fomchenkova M.A., Stepanova L.V. Protsedura pereopredelennogo metoda nakhozhdeniya koeffitsientov razlozheniya poley u vershiny treshchiny, osnovannaya na konechno-elementnom reshenii dlya komponent tenzora napryazheniy [Procedure of the overdeterministic method for findingthe field expansion coefficients at the crack tip basedon a finite element solution for the stress tensorcomponents]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya — Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 54–66.

[15] Matvienko Yu.G., Pokrovskii A.M. Two-dimensional crack path prediction for mixed mode I/II loading conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, vol. 323, art. no. 111218. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2025.111218.
[16] Nakamura T., Parks D.M. Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack front an interaction integral. *Int. J. Solid Struct*., 1992, vol. 29, pp. 1597–1611.

Pokrovsky A.M., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: pokrovsky@bmstu.ru

Zakharov P.M., Postgraduate Student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zpasha14@mail.ru

Kazantsev A.I., Postgraduate Student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alkazantseff@mail.ru