

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПУТЕМ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПОДХОДОВ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Прокопьев Л.А.¹, Семенов С.О.¹, Андреев Я.М.¹, Лукин Е.С.²

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск;*

²*Институт физико-технических проблем Севера Сибирского отделения Российской Академии наук, Якутск*

Ключевые слова: зона пластичности, хладноломкость, хладостойкость, вязкость разрушения, вязко-хрупкий переход, коэффициент концентрации напряжений.

Аннотация. Отмечены современные проблемы в области исследования явления хладноломкости конструкционных сталей. Исследовано влияние понижения температуры на размер зоны пластичности у вершины трещины в металле с применением критериев и уравнений механики разрушения и классической механики. Предложено теоретическое описание модели вязко-хрупкого перехода, заключающейся в уменьшении размеров зоны пластичности при понижении температуры с использованием объединения подходов классической механики и механики разрушения. Согласно предложенной модели, значение критического коэффициента интенсивности напряжений состоит из двух составляющих: части, отвечающей за сопротивление хрупкому отрыву и части, учитывающей влияние зоны пластичности. Показано, что предложенная модель, разработанная на основе подходов классической механики и механики разрушения, качественно описывает экспериментально наблюдаемый вязко-хрупкий переход в виде зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений от температуры.

TO DETERMINE THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE FRACTURE TOUGHNESS OF METALS BY COMBINING THE APPROACHES OF CLASSICAL MECHANICS AND FRACTURE MECHANICS

Prokopyev L.A.¹, Semenov S.O.¹, Andreev Ya.M.¹, Lukin E.S.²

¹*The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk;*

²*V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk*

Keywords: plasticity zone, cold brittleness, cold resistance, fracture toughness, ductile-brittle transition, stress concentration factor.

Abstract. Modern problems of studying the phenomenon of cold brittleness of structural steels are noted. The effect of temperature decrease on the size of the plasticity zone at the crack tip in a metal has been studied using the equations of fracture mechanics and the finite element method. A theoretical description of the ductile-brittle transition model is proposed, which consists in a decrease in the size of the plasticity zone with decreasing temperature using a combination of the approaches of classical mechanics and fracture mechanics. According to the proposed model, the value of the critical stress intensity factor consists of two components: the part that is responsible for the resistance to brittle fracture and the part that takes into account the influence of the plasticity zone. It is shown that the proposed model, developed on the basis of the approaches of classical mechanics and fracture mechanics, qualitatively describes the experimentally observed ductile-brittle transition in the form of a dependence of the critical stress intensity factor on temperature.

Введение. Как известно, снижение показателей ресурса деталей металлоконструкций и техники, работающих в условиях низких температур, обуславливается несколькими факторами. Изменение свойств материала при понижении температуры, в виде увеличения предела прочности и предела текучести, а также снижение пластичности, приводящие к его охрупчиванию, довольно широко изучено [1, 2]. Решение данной проблемы заключается в

правильном выборе марки стали, способной обеспечить несущую способность конструкции при проектной температуре эксплуатации. Однако, как указывается в работе [3], нарушение температурного режима сварки существенно снижает пластичность в местах концентрации напряжений, в сварных швах и в зоне термического влияния, при этом конструкция в целом остается подверженной влиянию климатически низких температур. Ударные нагрузки также снижают способность материала пластически деформироваться из-за ограниченной скорости протекания процессов пластичности. Влияние данного фактора усиливается при понижении температуры из-за обратной связи скорости пластического течения от температуры [4]. Также известно, что трещиноподобные дефекты чаще всего являются очагами хрупких разрушений конструкций [5, 6]. Совместное влияние вышеописанных факторов катастрофически уменьшает ресурс конструкций, долговечность, наработку до отказа деталей машин, работающих при климатически низких температурах [7].

В настоящей работе рассматривается трещиноподобный дефект, в вершине которой имеется зона пластичности некоторого размера и формы. Влияние зоны пластичности в вершине трещины на хладостойкость нагруженного элемента конструкции, изучено недостаточно полно. Сложность данной проблемы заключается в нескольких факторах: масштабном факторе, сложности экспериментального определения формы и размера зоны пластичности, влиянии многих факторов – от свойств материала до особенностей напряженно-деформированного состояния детали или образца с трещиной [7]. Также недостаточно исследований, направленных на изучение зависимости трещиностойкости металлов от температуры в диапазоне низких климатических температур. Принято считать [8], что она связана с особенностями кристаллической структуры материала. Множество работ, описывающих поведение кристаллических тел с трещинами при низких температурах, в основном, направлены на изучение изломов образцов на ударный изгиб. Несмотря на эффективность и внедрение в производство методов испытаний образцов на ударный изгиб, множество исследований указывают на его невысокую информативность. В целом, в настоящее время, недостаточно научных подходов, однозначно описывающих поведение материала в процессе его разрушения в разных температурных диапазонах. Для разработки новых методов, методик испытаний и критериев, обеспечивающих безопасную работу ответственных деталей машин и конструкций в широком диапазоне температур, необходимо проводить комплексные исследования влияния низких температур на поведение конструкционного материала с трещиной. Особенностью данного исследования является оценка влияния температуры на несколько факторов, повышающих сопротивление хрупкому разрушению: размер зоны пластичности у вершины трещины, изменение свойств материала, таких как предел текучести, сопротивление к динамическим нагрузкам. Вышеуказанные факторы могут быть взаимозависимы с точки зрения подходов классической механики и механики разрушения. В связи с этим, исследование влияния низких температур на закономерности разрушения металлических деталей машин и элементов конструкций с точки зрения подходов классической механики и механики разрушения является актуальной научно-практической задачей, направленной на развитие современных методик и разработку новых критериев и методов испытаний, обеспечивающих безопасность работы ответственных конструкций в широком диапазоне климатических температур.

Целью настоящей работы является исследование возможности объединения подходов классической механики и механики разрушения, применительно к зоне пластичности, для описания зависимости вязкости разрушения металлов от температуры.

В работе использованы современные известные модели и методики, применяющиеся для описания свойств и поведения материалов при воздействии низких температур и механических нагрузок. В качестве предельного состояния материала использован критерий Мизеса, для описания напряженно-деформированного состояния у вершины трещины, а также уравнения механики разрушения в современном их представлении. Границу зоны пластичности приближенно можно описать через известные уравнения компонент напряжений в окрестности вершины трещины:

$$\begin{cases} \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{xx} , σ_{yy} – компоненты напряжений по осям «x» и «y»; τ_{xy} – компонент касательного напряжения параллельные оси «y»; K_I – коэффициент интенсивности напряжений для нормального отрыва; r – радиус вектор; θ – угловая координата в полярной системе координат с началом, совпадающим с вершиной трещины.

Ось «x» совпадает с линией продолжения трещины, а ось «y» расположена перпендикулярно плоскости трещины. В этом случае определяется геометрическое место точек, где эквивалентные напряжения по Мизесу достигают предела текучести материала:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – максимальные, промежуточные и минимальные главные напряжения; σ_T – предел текучести материала.

Расчет компонентов напряжений в зоне у вершины трещины удобнее вести в полярной системе координат. Если выразить компоненты главных напряжений у вершины трещины, и подставить их в равенство (2) получим следующее выражение для координат теоретической границы зоны пластичности:

$$r = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} \left[\cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + 3\sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \right]. \quad (3)$$

Как показывают исследования, при понижении температуры, повышается предел текучести материала. Известна [4] экспоненциальная температурная зависимость предела текучести сталей от температуры. Для данной модели, из (3) видно, что уменьшение размера зоны пластичности происходит исключительно из-за повышения предела текучести материала. С точки зрения подходов классической механики, в том случае, если у вершины трещины появляется заметная зона пластичности, вершина трещины «затупляется». В этом случае, для оценки трещиностойкости, необходимо учесть влияние появления радиуса скругления, и перераспределение напряжений вокруг вершины трещины из-за протекания процессов пластической деформации.

В данной работе предположено, что критический коэффициент интенсивности напряжений складывается из двух составляющих: части, отвечающей за сопротивление материала хрупкому разрушению и части, учитывающей влияние зоны пластичности. При этом, при появлении зоны пластичности у вершины трещины, конфигурацию трещины будем рассматривать как вырез, с радиусом скругления, равном теоретически рассчитанному радиусу зоны пластичности.

Критерии, объединяющие подходы классической механики и механики разрушения подробно описаны в работе [9]. В [9] предложено выражение для номинального разрушающего напряжения, выраженного через подходы классической механики и механики разрушения:

$$\sigma_H^* = \frac{\sigma_6}{K_I} + \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}} \varphi(K_I), \quad (4)$$

где σ_H^* – номинальное разрушающее напряжение, σ_6 – предел временного сопротивления, K_I – коэффициент концентрации напряжений, K_c – вязкость разрушения, $\varphi(K_I)$ – весовая функция, a – полудлина трещины.

Первое слагаемое содержит коэффициент концентрации напряжений, второе – коэффициент интенсивности напряжений. Весовая функция регулирует участие той или иной части слагаемых, и лежит в пределах от 0 до 1.

Нами предполагается, что изменение температуры оказывает влияние на размер зоны пластичности у вершины трещины. В том случае, если температура исследуемого образца достаточно низкая для появления развитой зоны пластичности, или же ее размер пренебрежимо мал, разрушение происходит хрупко – в соответствии с силовым критерием Гриффитса. В случае появления заметной зоны пластичности с повышением температуры, критический коэффициент интенсивности напряжений, по нашему предположению, включает в себя значительную часть, учитывающую пластическое «притупление» вершины трещины.

Вышеописанный критерий может адекватно описать увеличение концентрации напряжений и снижение трещиностойкости при понижении температуры. Для этого, перепишем уравнение (4), выразив критический коэффициент интенсивности напряжений. При этом, так как текущая задача состоит в объединении подходов механики разрушения и подходов классической механики именно для зоны текучести, модифицируем уравнение, применив в качестве критерия предельного состояния материала предел текучести материала вместо временного сопротивления. Предел текучести является функцией от температуры, и является основным аргументом в данной зависимости, так как мы рассматриваем, главным образом, зависимость параметров от температуры. Ввиду того, что традиционный показатель трещиностойкости в этом уравнении отвечает только за сопротивление хрупкому разрушению, обозначим его как K_{IC} , а объединенный критический коэффициент интенсивности напряжений обозначим как K_{IC}^* .

$$K_{IC}^* = K_{IC} + \varphi(K_t) \sqrt{\pi a} \frac{\sigma_T(t)}{K_t}, \quad (5)$$

где K_{IC} – показатель трещиностойкости отвечающий за сопротивление хрупкому разрушению; K_{IC}^* – объединенный критический коэффициент интенсивности напряжений.

Первое слагаемое (5) отвечает за сопротивление материала хрупкому разрушению, второе – за вклад в объединенную вязкость разрушения зоны пластичности. Весовая функция, также как и в работе [10], является функцией от коэффициента концентрации напряжений и регулирует степень участия правой части уравнения.

Как видно из рисунка 1, при понижении температуры, второй член правой части уравнения (5) исключается, и критический коэффициент интенсивности напряжений становится равным K_{IC} . При повышении температуры, увеличивается радиус зоны пластичности, из-за чего к вязкости разрушения прибавляется второй член уравнения (5). Вид переходной области, при этом, напоминает область вязко-хрупкого перехода.

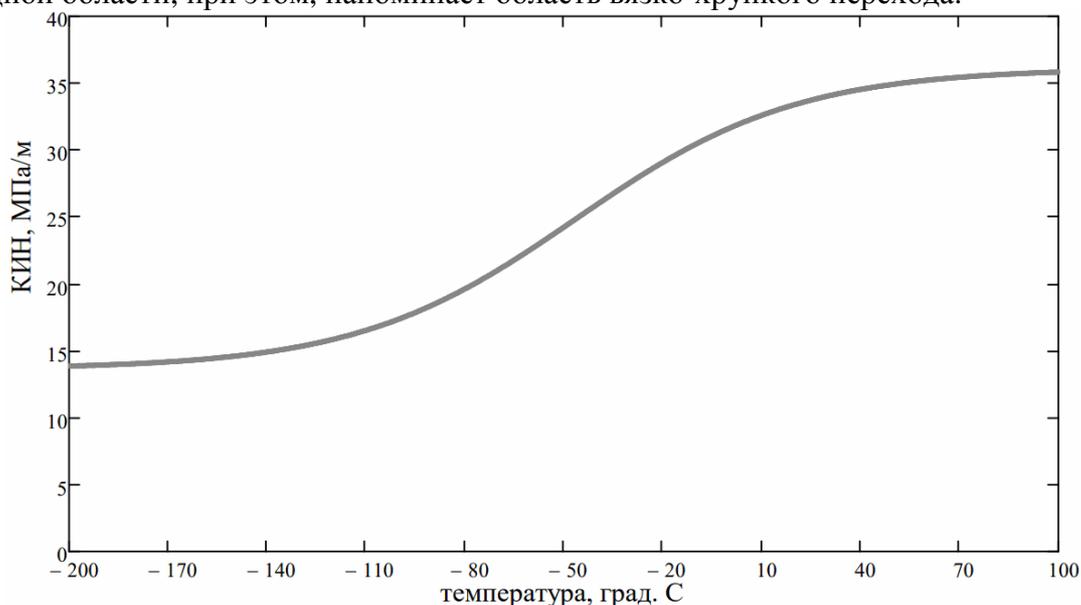


Рис 1. Зависимость вязкости разрушения от температуры

Выводы. Данный подход качественно описывает экспериментально получаемые кривые вязко-хрупкого перехода с резким снижением показателя трещиностойкости в области низких температур. Таким образом, в данной работе показано, что помимо таких факторов, как масштабный эффект, особенности кристаллической структуры металла, скорость нагружения, значительный вклад в явление хладноломкости вносят параметры классической механики и механики разрушения.

Заключение. Исследовано поведение зоны пластичности у вершины трещины в металле при понижении температуры с применением уравнений механики разрушения и метода конечных элементов. Показано теоретическое описание модели вязко-хрупкого перехода, заключающейся в уменьшении размеров зоны пластичности при понижении температуры с использованием объединения подходов классической механики и механики разрушения. Согласно данной модели, критический коэффициент интенсивности напряжений состоит из двух составляющих: части, отвечающей за сопротивление хрупкому отрыву и части, учитывающей влияние зоны пластичности. При этом, зона пластичности, образующаяся у вершины трещины, оказывает эффект «притупления» вершины трещины. В модель вводится коэффициент концентрации напряжений, рассчитываемый для радиуса скругления вершины трещины, приравниваемого к радиусу зоны пластичности. В построенной таким образом модели параметры имеют сильную зависимость от предела текучести материала. При понижении температуры, из-за увеличения предела текучести, размер зоны пластичности значительно уменьшается. Соответственно, с увеличением коэффициента концентрации напряжений, в уравнении (5) уменьшается вклад части, отвечающей за пластическую зону. Таким образом, данная модель качественно описывает экспериментально получаемые кривые вязко-хрупкого перехода с использованием объединения подходов классической механики и механики разрушения.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № НИОКТР 122042000005-4, FWRs-2022-0002). Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Список литературы

1. Захарова М.И. Анализ риска аварий резервуаров и газопроводов в условиях Севера // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 2. – С. 54-64.
2. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы / отв. ред. В.В. Филиппов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с.
3. Квагинидзе В.С., Козлов В.А. Влияние низких отрицательных температур на работоспособность металлоконструкций горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – №9. – С. 16-18.
4. Астафурова Е.Г., Мельников Е.В., Реунова К.А., Москвина В.А., Астафуров С.В., Панченко М.Ю., Михно А.С., Тумбусова И. Температурная зависимость механических свойств и закономерностей пластического течения литых многокомпонентных сплавов Fe₂₀Cr₂₀Mn₂₀Ni₂₀Co₂₀-xСx (x = 0, 1, 3, 5) // Физическая мезомеханика. – 2021. – №4. – С. 52-63. – doi.org/10.24412/1683-805X-2021-4-52-63.
5. Андреев Я.М., Большаков А.М. Повышение выявляемости зарождающихся дефектов в вертикальных резервуарах при проведении диагностирования // Живучесть и конструкционное материаловедение: Труды конференции 26–28 октября 2016 года. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2016. – С. 100-103.
6. Андреев Я. М., Большаков А.М., Бурнашев А.В. Оперативное диагностирование непроектных участков магистральных газопроводов с применением акустических систем в сложных условиях криолитозоны // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады. 18-21 сентября 2018 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. – С. 118-122.
7. Кургузов В.Д., Астапов Н.С. Аналитическая модель квазихрупкого разрушения пластины с трещиной // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 144, №1. – С. 80-96. – doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-80-96.
8. Прокопьев Л.А., Андреев Я.М., Лукин Е.С. Оценка степени опасности трещиноподобных дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля при локальном низкотемпературном нагружении // Дефектоскопия. – 2022. – №12. – С. 17-23. – doi.org/10.31857/S0130308222120028.

9. Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Рябов Д.А. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, №3. – С. 48-55. – doi.org/10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.
10. Сукнёв С.В. Градиентный подход к оценке хрупкой прочности элементов конструкции с концентраторами напряжений. Препринт. – Якутск: Изд-во «ЯНЦ СО РАН», 1997. – 32 с.

References

1. Zakharova M.I. Analysis of the risk of accidents of reservoirs and gas pipelines in the conditions of the North // Occupational safety in industry. 2015, no. 2, pp. 54-64.
2. Cold resistance of materials and structural elements: results and prospects / Edited by V.V. Filippov. – Novosibirsk: Science, 2005. – 290 p.
3. Kvaginidze V.S., Kozlov V.A. Influence has a negative effect of temperature on the performance of metal structures of mining machines // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2003, no. 9, pp. 16-18.
4. Astafurova E.G., Mel'nikov E.V., Reunova K.A., Moskvina V.A., Astafurov S.V., Panchenko M.Yu., Mikhno A.S., Tumbusova I. // Temperature dependence of mechanical properties and patterns of plastic flow of cast multicomponent alloys Fe₂₀Cr₂₀Mn₂₀Ni₂₀Co_{20-x}Cx (x = 0, 1, 3, 5) // Physical mesomechanics. 2021, no. 4, pp. 52-63. doi.org/10.24412/1683-805X-2021-4-52-63.
5. Andreev Ya.M., Bolshakov A.M. Increasing the detectability of incipient defects in vertical tanks during diagnostics // Survivability and structural materials science: Proceedings of the conference on October 26-28, 2016. – M.: Federal State Budgetary Institution of Science A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, 2016. – P. 100-103.
6. Andreev Ya.M., Bolshakov A.M. Operational diagnostics of non-project sections of main gas pipelines with the use of acoustic systems in difficult conditions of the cryolithozone // Safety and monitoring of man-made and natural systems: materials and reports. September 18-21, 2018. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 2018. – P. 118-122.
7. Kurguzov V.D., Astapov N.S. Analytical model of quasi-brittle fracture of a plate with a crack // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical engineering. 2023, vol. 144, no. 1, pp. 80-96. doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-80-96.
8. Prokopyev L.A., Andreev Ya.M., Lukin E.S. Assessment of the degree of danger of crack-like defects based on acoustic emission control under local low-temperature loading // Nondestructive testing. 2022, no. 12, pp. 17-23. doi.org/10.31857/S0130308222120028.
9. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A., Ryabov D.A. Analysis of the cold resistance of metals with different types of crystalline structure // Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2019, no. 3, pp. 48-55. doi.org/10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.
10. Suknev S.V. Gradient approach to assessing the brittle strength of structural elements with stress concentrators. – Yakutsk: YSC of the SB of the RAS, 1997. – 32 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Прокопьев Леонид Александрович – научный сотрудник	Prokopyev Leonid Aleksandrovich – researcher
Семенов Семён Осипович – младший научный сотрудник	Semenov Semen Osipovich – junior researcher
Андреев Яков Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Andreev Yakov Mikhailovich – candidate of technical sciences, senior researcher
Лукин Евгений Саввич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе	Lukin Evgeniy Savvich – candidate of technical sciences, deputy director for research
l.prokopyev@yandex.ru	

Получена 28.07.2023