

УДК 620.17 + 539.421 + 004.942
EDN RLYVXW

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ОБРАЗЦАХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Ю. Филин, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: ctod@crism.ru

А.В. Мизецкий, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: npk3@crism.ru

Д.Р. Бараков, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: npk3@crism.ru

Немаловажным аспектом защиты национальных интересов России в Арктике является использование судостроительных сталей, обеспечивающих отсутствие хрупких разрушений при низких температурах эксплуатации. Хладостойкость сталей проверяется с помощью специальных механических испытаний, требования к результатам которых должны иметь расчетное обоснование.

В статье рассмотрено моделирование конструкционных элементов из листовой стали и образцов методом конечных элементов (МКЭ) и представлено описание предлагаемых условий конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения. Локальные условия разрушения связывают событие хрупкого разрушения с достижением критического значения жесткости напряженного состояния, вязкого разрушения — с накопленной пластической деформацией отрыва и сдвига. Их совместное применение в расчетах позволяет моделировать вид излома и количественно оценивать соотношение различных параметров, например, в случае испытания падающим грузом — доли волокнистой составляющей и работы разрушения, а также оценивать трещиностойкость, необходимую для торможения трещины в типовом конструкционном элементе. Это позволяет перейти к обоснованию требований к результатам испытаний по определению температур вязко-хрупкого перехода.

Ключевые слова: судостроительные стали, хладостойкость, испытания падающим грузом, механика разрушения, моделирование методом конечных элементов.

Для цитирования: Филин В.Ю. Многофакторная модель распространения трещины в конструкционных моделях и образцах для расчетов методом конечных элементов / В.Ю. Филин, А.В. Мизецкий, Д.Р. Бараков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 65 — 73. — EDN RLYVXW.

MULTIPARAMETRICAL MODEL OF CRACK PROPAGATION IN STRUCTURAL ELEMENTS AND SPECIMENS FOR FEM CALCULATIONS

V.Yu. Filin, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: ctod@rambler.ru

A.V. Mizetsky, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

D.R. Barakov, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

An important aspect of Russian national interest protection in Arctic is the application of shipbuilding steels ensuring no cases of brittle fracture at low service temperatures. Cold resistance of steels is verified by special mechanical tests, their required results should have a calculated substantiation.

This paper considers finite element method (FEM) simulation of structural members made of steel plate and specimens and gives a description of suggested conditions of concurring brittle and ductile fracture. Local fracture conditions connect a brittle fracture event with an attainment of a critical first principal stress to stress intensity ratio while a ductile one with an accumulated plastic tear and shear strain. Their simultaneous application allows the simulation of fracture appearance and quantitatively assessment of the interrelation of different parameters, e.g. in case of drop weight tear test, the shear portion and impact energy, as well as the fracture toughness needed to arrest a crack in a typical structural element. The above technique gives an opportunity of the required ductile-to-brittle transition temperatures substantiation.

Keywords: shipbuilding steels, cold resistance, drop weight tear test, fracture mechanics, simulation by finite element method.

For citation: Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Barakov D.R. Multiparametrical model of crack propagation in structural elements and specimens for FEM calculations. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 65 — 73. EDN RLYVXW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие арктических территорий имеет стратегическое значение: значительная часть запасов энергоресурсов России находится на шельфовых месторождениях. Защита национальных интересов России в Арктике приобретает особое значение и требует развития морской, прибрежной и материковой инфраструктуры. Строятся новые суда для Северного морского пути.

Крупногабаритные сварные конструкции Арктики изготавливают из низколегированных сталей, обеспечивающих прочность при умеренной стоимости. Однако такие конструкции могут хрупко разрушаться при эксплуатационном нагружении в условиях низких климатических температур. Поэтому принята система контроля качества материалов и уровни требований, многие годы обеспечивавшие малое количество случаев разрушения. Однако проектные характеристики современных конструкций делают необходимым применение более прочного проката в больших толщинах, в то же время стоит противоположная задача удешевления его изготовления. Разработаны марки стали с индексом «Arc» [1, 2], обсуждается применимость существующих требований Регистра к материалам для новых типов конструкций [3] либо в случаях, когда таковые не были конкретизированы [4]. В таких условиях научное обоснование требований к материалам играет ключевую роль.

В статье [5] была показана связь минимально необходимой работы удара металла проката судостроительных сталей при статочных испытаниях с возможностью торможения трещины, распространяющейся в конструкции по хрупкому механизму. Расчетные соотношения получали на основании расчетов МКЭ.

Подобные расчеты также проводили для образцов, используемых при специальных механических испытаниях по определению температур вязко-хрупкого перехода: температуры нулевой пластичности NDT [6], температуры критической на больших образцах $T_{КБ}$ [7], температуры TDWTT, определяемой при испытаниях на разрыв падающим грузом DWTT (ИПГ) [8], а также для конструктивных элементов. Цель выполненных расчетов — с использованием механики разрушения определить связь критических событий либо температур, связанных с каждым видом испытания, и подтвердить либо откорректировать температурные запасы, ранее внесенные в Правила РС [9] для сталей с индексом «Arc», применяемых для наиболее ответственных конструкций Севера.

Предлагаемый подход не ограничивается исключительно арктическими марками сталей и может быть использован для любых трубных и судостроительных сталей, в том числе для сталей толщиной от 7,5 мм, которые могут быть испытаны по методике DWTT, но для них не могут быть определены температуры NDT и $T_{КБ}$.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ

Как было отмечено в статье [5], для обеспечения торможения трещины критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I должен быть как минимум равен нагруженности в вершине трещины, которая также определяется в терминах КИН. Такие значения КИН могут быть найдены для конструктивных элементов в разных толщинах и практически любых образцов, используемых для механических испытаний, в том числе специальных. Сравнение КИН для образца и конструктивного элемента позволяет перейти к температурному запасу между наступлением данных событий с использованием известной ожидаемой зависимости КИН в температурной области вязко-хрупкого перехода,

$$K_I|_{T_D} = K_I|_{T_{II}} \exp(0,02(T_D - T_{II})), \quad (1)$$

где T_D — минимальная температура применимости материала, соответствующая торможению трещины в конструктивном элементе,
 T_{II} — температура испытания, соответствующая выполнению условия по какой-либо процедуре испытания.

Оценка минимального КИН материала, необходимого для торможения туннелирующей трещины в конструктивном элементе, также описывается численной процедурой, предложенной А.В. Ильиным, не связанной с применением МКЭ [10, 11]:

$$K_{Ia} = \sqrt{3,5 \cdot 10^{-5} \sigma_{T3}^{2,42} S}, \quad (2)$$

где $\sigma_{T3} \approx 1,33 R_{p02}$ — эффективный предел текучести материала при быстром нагружении [5], МПа,
 S — толщина металла, мм,
 K_{Ia} — КИН при торможении трещины.

Расчеты МКЭ распространения трещины в моделях образцов для специальных механических испытаний позволяют оценить уровни K_{Ia} , соответствующие достижения условий, различных для разных видов испытаний: распространение трещины до края образца NDT, 70 % волокнистой составляющей в изломе образца T_{KB} или DWTT. Также возможно установление соответствия КИН и работы разрушения образца, что, в первую очередь, было использовано в [5] при оценке необходимого уровня работы удара. Такой подход также важен для перехода к количественной оценке результатов испытания по методике DWTT [8].

В расчетах используются трехмерные модели с равномерной сеткой конечных элементов (КЭ) в области распространения трещины и несколько конкурирующих условий хрупкого и вязкого разрушения в плоскости надреза, также добавлено условие возникновения расщепления в середине толщины металла. Такое расщепление характерно для сталей, произведенных методами термомеханической обработки (ТМО).

2. ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ МОДЕЛИ ОБРАЗЦА ИЛИ КОНСТРУКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ТРЕЩИНОЙ

«Разрушение» при моделировании, реализованное в виде «расщепления» (снятия условия совместности перемещения) узлов сетки КЭ, осуществляется при выполнении хотя бы одного из перечисленных ниже условий, с фиксацией данного события в протоколе расчета. Это позволяет строить карты изломов и определять долю волокнистой составляющей согласно стандартным процедурам испытаний образцов. Основной задачей при формулировании условий разрушения было обеспечение их применимости в двух ситуациях: для тела без трещины и тела с распространяющейся трещиной, в котором первые главные напряжения преимущественно нормальны к ее плоскости. Такие варианты охватывают необходимые типовые случаи нагружения.

Условие 1: достижение критического значения жесткости напряженного состояния — отношения первых главных напряжений к интенсивности напряжений $\chi = \sigma_1 / \sigma_i$ — известный силовой критерий хрупкого разрушения, калибровка значений которого для элементов равномерного разбиения сетки КЭ предложена А.В. Ильиным [11]. Значения в элементах сетки используются потому, что в ее узлах, выходящих на текущий фронт трещины, МКЭ дает некорректные значения компонент напряжений, что естественно в связи с их сингулярностью у вершины трещины. Поскольку величина χ зависит от размера КЭ, для определения связи данного условия с КИН материала используется решение калибровочной задачи.

Условие 2: достижение критической величины пластической деформации — имело очевидный недостаток: критическая деформация при полностью вязком характере разрушения различна в изломе образца с трещиной и в изломе гладкого образца на одноосное растяжение (для сталей — порядка 0,6 [12] и 2,0, соответственно). В настоящее время условие 2 отдельно не используется и является частью условия 4.

Условие 3: достижение критического значения накопленной пластической сдвиговой деформации $\gamma_{cpl} = (\varepsilon_{1pl} - \varepsilon_{3pl})/2$ — условие вязкого разрушения срезом. Данное условие относится к разрушению «губ среза» и проверялось только на моделях тел с трещиной. Поскольку, как сказано выше, предельная величина ε_{1pl} для судостроительной стали при вязком разрушении в таком случае достигает 0,6, то интервал возможных значений γ_{cpl} составляет от 0,3 при $\varepsilon_{3pl} = 0$ до 0,6 при $\varepsilon_{3pl} = -\varepsilon_{1pl}$ (деформации в направлении толщины отрицательны, происходит утяжка поперечного сечения). Значение γ_{cpl} принимали в середине этого диапазона, подбирая его по получаемому при одновременном применении условий 3 и 4 соотношению площадей, соответствующих областям вязкого среза и отрыва в изломе.

Условие 4 — двойное: нормализованное по величине накопленной пластической деформации условие вязкого отрыва Кокрофта — Лэтэма — Оха CLONE (Cockroft Latham Oh Normalized by ε) [8] и одновременное достижение некоторого уровня накопленной пластической деформации ε_{ipl} .

Кокрофт и Лэтэм предложили свое условие вязкого разрушения в 1967 году [13] по результатам исследования образцов на растяжение, оно имело размерность плотности работы деформирования,

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^* d\varepsilon, \quad (5)$$

где ε_f — деформация при разрушении, $\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1-\psi}$, ψ — относительное сужение,

σ^* — «максимальные нормальные напряжения» растяжения (по смыслу то же, что первые главные напряжения σ_1 , иногда также обозначают σ_1^+).

В 1979 году Ох и др. [14] нормализовали критерий (5) по напряжениям, разделив подынтегральное выражение на величину интенсивности напряжений σ_i и приведя его к безразмерному виду,

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_1^+ / \sigma_i) d\varepsilon. \quad (6)$$

В виде (6) критерий широко применяется для анализа способности металлов к глубокой пластической деформации, например, при штамповке [15], поскольку в таких задачах напряжения при нагружении могут менять знак. В статье Стебунова и др. [16] перечислены и более поздние модификации критерия Кокрофта — Лэтэма вида

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_{ipl}} \frac{1}{\varepsilon_{if}(\chi, \mu_\sigma)} d\varepsilon_{ipl}, \quad (7)$$

где Ψ — повреждающий фактор,

ε_{if} — разрушающие деформации, зависящие от жесткости НДС и от параметра Лоде — Надаи

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)}{0,5(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{\sigma_2 - \gamma}{\gamma},$$

учитывающего влияние вторых главных напряжений. Иными словами, учитывается многоосность нагружения.

Условия вида (7) имеют следующие особенности [16]: локальный рост «повреждаемости» пропорционален росту пластических деформаций и обратно пропорционален величине разрушающих деформаций, которая, в свою очередь, зависит от жесткости НДС. В дополнение, рост «повреждаемости» не зависит от пути нагружения, что соответствует гипотезе линейного суммирования повреждений.

Предлагаемый критерий CLONE (8) является менее радикальным изменением условия (6):

$$CLONE = C / \varepsilon_{ipl} = \frac{1}{\varepsilon_{ipl}} \int_0^{\varepsilon_{ipl}} \frac{\sigma_1(\varepsilon_{ipl})}{\sigma_i(\varepsilon_{ipl})} d\varepsilon_{ipl}. \quad (8)$$

Проверка приемлемости условия CLONE в первую очередь проводилась для тел без трещины. Сопоставляли результаты расчетов МКЭ и испытаний на растяжение пятикратных образцов по ГОСТ 1497 и образцов по API 5L с длиной рабочей части 2 дюйма. Результаты представлены в таблице.

Как видно из таблицы, критерий CLONE обеспечивает значительно меньшее различие оценок на образцах со схожей жесткостью напряженного состояния, чем величина накопленной пластической деформации либо критерий Кокрофта — Лэтэма — Оха (6).

Далее исследовали применение условия CLONE для тела с трещиной. Первое достижение критического

Таблица

Проверка условия вязкого разрушения при растяжении

Труба с толщиной стенки 27,5 мм, ориентация образцов поперечная. Материал — сталь X80 (K65). $R_{p02} = 600$ МПа, $R_m = 660$ МПа			
Образец по ГОСТ: ширина 30 мм, длина 175 мм (кратность 5,4), напряжение в момент разрушения 371 МПа*. Образец по API: ширина 38 мм, длина 51 мм (кратность 1,4), напряжение в момент разрушения 397 МПа*.			
Результаты моделирования МКЭ	Образец по ГОСТ	Образец по API (короткий)	Разность, %
Напряжение в момент разрушения*, МПа	371	398	—
$\varepsilon_{ipl}(\max)$	1,438	1,394	3,0
$C(\max)$, формула (6)	1,970	1,888	4,0
CLONE (max), формула (8)	1,370	1,366	0,3
Труба с толщиной стенки 16,0 мм, ориентация образцов поперечная. Материал — сталь X100 (K80), $R_{p02} = 749$ МПа, $R_m = 808$ МПа			
Образец по ГОСТ: ширина 30 мм, длина 125 мм (кратность 5,0), напряжение в момент разрушения 510 МПа*. Образец по API: ширина 38 мм, длина 51 мм (кратность 1,8), напряжение в момент разрушения 523 МПа*.			
Результаты моделирования МКЭ	Образец по ГОСТ	Образец по API (короткий)	Разность, %
Напряжение в момент разрушения*, МПа	511	524	—
$\varepsilon_{ipl}(\max)$	1,220	1,300	6,0
$C(\max)$, формула (6)	1,650	1,750	5,7
CLONE (max), формула (8)	1,366	1,379	1,0
*Напряжение в момент разрушения определяли как нагрузку в данный момент, отнесенную к начальному поперечному сечению рабочей части образца.			

значения CLONE при нагружении такой модели происходит при уровне K_I , ожидаемо пропорциональном пределу текучести материала, при низких значениях ε_{ipl} , практически при появлении зоны пластических деформаций. Данный момент ожидаемо оказывается сеточно зависимым. Поэтому, на первый взгляд, применять такое условие для образца с трещиной не имеет смысла. Однако вычисление CLONE в ходе моделирования продвижения трещины показало, что области достижения заданных величин CLONE и ε_{ipl} не совпадают, и «разрушение» при достижении только одного из двух условий не происходит. Это приближает модельную диаграмму деформирования тела с трещиной и поглощенную энергию (площадь под диаграммой) к получаемым экспериментально.

Критическое значение ε_{ipl} (бывшее условие 2) принимали достаточно большим ($\varepsilon_{ipl}=0,5$ для цифрового двойника стали K65/X80) на основании решения еще одной калибровочной задачи. Использовали модель конструкционного элемента со сквозной трещиной и тем же размером КЭ, что был принят при расчетах моделей образцов DWTT. Калибровочную модель нагружали растяжением, чтобы оперировать термином «номинальные напряжения», распространение трещины не моделировали. Вместо этого устанавливали связь приложенных брутто-напряжений и накопленной интенсивности пластической деформации. Значение $\varepsilon_{ipl}=0,5$ достигается при приложенных напряжениях на 0,5% выше напряжений общей текучести модели, что дает некоторый допуск на деформационное упрочнение для исследуемого материала.

Условие 5 используется с целью исследования склонности стального проката к расщеплениям параллельно прокатанным поверхностям. Оно отличается от условия 1 только величиной и местом применения — для элементов, выходящих на плоскость симметрии модели (к середине толщины металла).

Дополнительные особенности применения рассматриваемых условий разрушения:

- условия 1 и 5, относящиеся к хрупкому разрушению, анализируются по значениям, получаемым для элементов сетки КЭ. Остальные условия, относящиеся к вязкому разрушению, исследуются по значениям, получаемым в узлах сетки;

- условия 1 и 5 в ходе расчетов МКЭ анализируются с того момента, когда в конкретном КЭ начинается пластическая деформация (материал выходит за поверхность текучести). Задаваемые критические величины χ должны находиться в пределах, получаемых при решении калибровочной задачи. Например, для стали марки X80 (K65), при размере КЭ в области равномерного разбегания 0,5 мм, $\chi=2,25 \dots 2,83$, последнее соответствует максимально достижимой в модели жесткости. Очевидно, что с ростом размера КЭ верхний предел значений χ снижается. Достижение условия 1 в ходе нагружения модели не всегда означает наступление «хрупкого разрушения», например, если дальнейшее продвижение трещины требует увеличения приложенного перемещения, а также если величина накопленной пластической деформации в данной области излома превышает некоторую величину, по данным [12], разделяющую диапазоны, характерные для хрупкого и вязкого разрушения, например $\varepsilon_{ipl}=0,1$. Картограмму излома следует анализировать совместно с модельной диаграммой нагружения и распределением ε_{ipl} в изломе;

- условие 3: критическая накопленная сдвиговая деформация может находиться в диапазоне $\gamma_{cpl}=0,3 \dots 0,6$ и обычно принимается равной 0,45. От величины γ_c зависит соотношение площадей среза и отрыва в волокнистой части излома. При $\gamma_c \geq 0,5$ преобладает отрыв;

- условие 4 при расчетах МКЭ анализируется только в области больших пластических деформаций, например $\varepsilon_{ipl} > 0,5$. Используется критическая величина CLONE, вычисленная для цифрового двойника материала при решении задачи растяжения гладкого образца без трещины, для момента, когда достигаются те же напряжения при разрушении, которые были зафиксированы при реальных испытаниях (примеры в таблице). Диапазон критических значений CLONE составляет от 1,05 для высокопрочной износостойкой стали до 1,40 для судостроительной и трубной стали с пределом текучести 500 — 600 МПа;

- если любое из перечисленных условий выполнено для узлов сетки, отстоящих от текущего фронта трещины, для корректного решения задачи одновременно с «расщеплением» данных узлов необходимо снять запрет на перемещение узлов, находящихся между ними и текущим фронтом трещины, в противном случае «неразрушенная» область в дальнейшем окажется разгруженной и не будет «разрушена». Подобный процесс экспериментально наблюдается при испытаниях на торможение трещины при падающем КИН по стандарту ASTM E 1221, где называется «ligamentation».

3. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МКЭ

При расчетах МКЭ варьируемой для данного материала (зависящей от температуры) величиной является параметр χ и соответствующее ему из решения калибровочной задачи значение K_I материала.

Представлены результаты расчетов моделей конструктивных элементов и образцов ИПГ толщиной 25 мм из стали X80 (K65) с $R_{p02}=600$ МПа, эффективный («динамический») предел текучести 798 МПа, материал считается гомогенным и не склонным к расщеплениям. Для данного материала разработан цифровой двойник, описывающий «истинную» диаграмму нагружения при быстром нагружении, и определено критическое значение $CLONE=1,37$. По формуле (2) значение $K_{Ia}=96$ МПа·м^{0,5}.

Подробное описание моделей КЭ было представлено в [8]. Модель конструктивного элемента представляет собой пластину больших размеров в плане со сквозной центральной трещиной длиной $2a=1,12S$. Размер КЭ в зоне трещины 0,5 мм. Нагружение производится приложенным перемещением с шагом 0,1 мм; на каждом шаге анализируются условия разрушения, приводящие к продвижению трещины, до полного прекращения их выполнения, после чего осуществляется следующий шаг по перемещению. Трещина считается остановившейся, если на нескольких последующих шагах нагружения не происходит нового старта магистрального хрупкого разрушения (на каждом шаге требуется увеличение приложенной нагрузки), а уровень приложенных напряжений при этом превышает 0,7 статического предела текучести R_{p02} .

Выполнены расчеты МКЭ для $\chi=2,55$ ($K_I=92$ МПа·м^{0,5}), $\chi=2,58$ ($K_I=97$ МПа·м^{0,5}) и $\chi=2,83$ ($K_I=194$ МПа·м^{0,5}). В первом случае трещина неограниченно распространяется по хрупкому механизму при приложенных брутто напряжениях растяжения 523 МПа, во втором случае отмечено торможение трещины после максимального подраста $\Delta a=11,5$ мм, при этом приложенные брутто напряжения 585 МПа. Таким образом, расчетное значение K_{Ia} соответствует полученному по формуле (2).

Наиболее показательной для иллюстрации конкурирующих условий разрушения является картограмма излома, полученного при $\chi=2,83$, где разрушение распространялось преимущественно по вязкому механизму, приведенная на рис. 1.

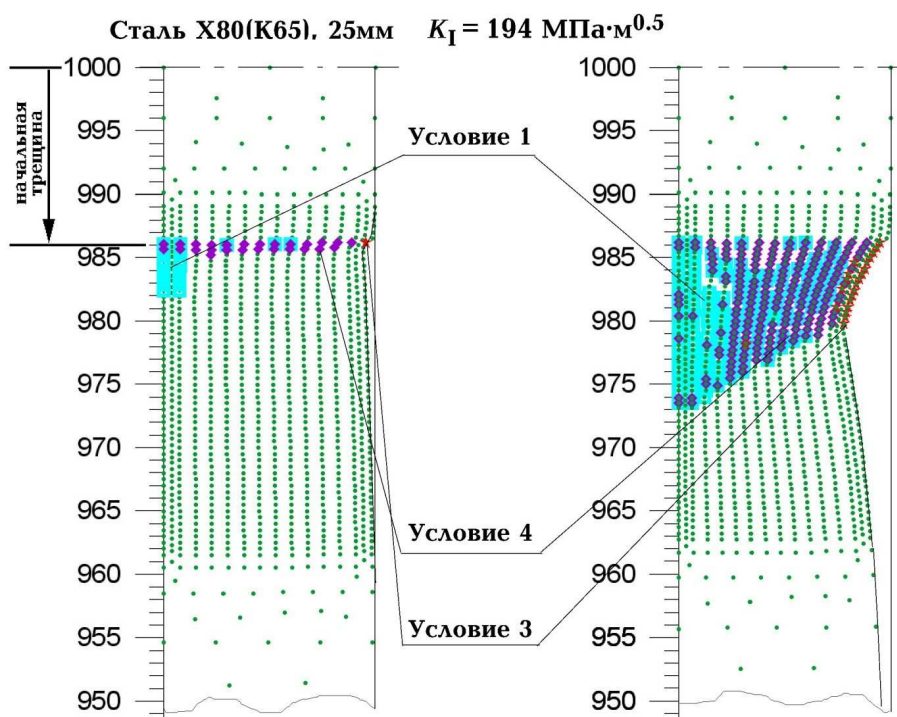


Рис. 1. Картограмма излома модели конструктивного элемента

На рис. 2 показана картограмма излома и картина распределения интенсивности пластической деформации в изломе образца ИПГ, изготовленного из того же материала, при $\chi = 2,48$ ($K_I = 83 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$). Конечноэлементная модель образца DWTT аналогична модели образца Шарпи, представленной в работе [5]. В областях вязкого разрушения модельного излома, соответствующих выполнению условий 3 и 4, накопленная пластическая деформация ε_{ipl} достигает 0,5 ... 0,6, что показано на рис. 2.

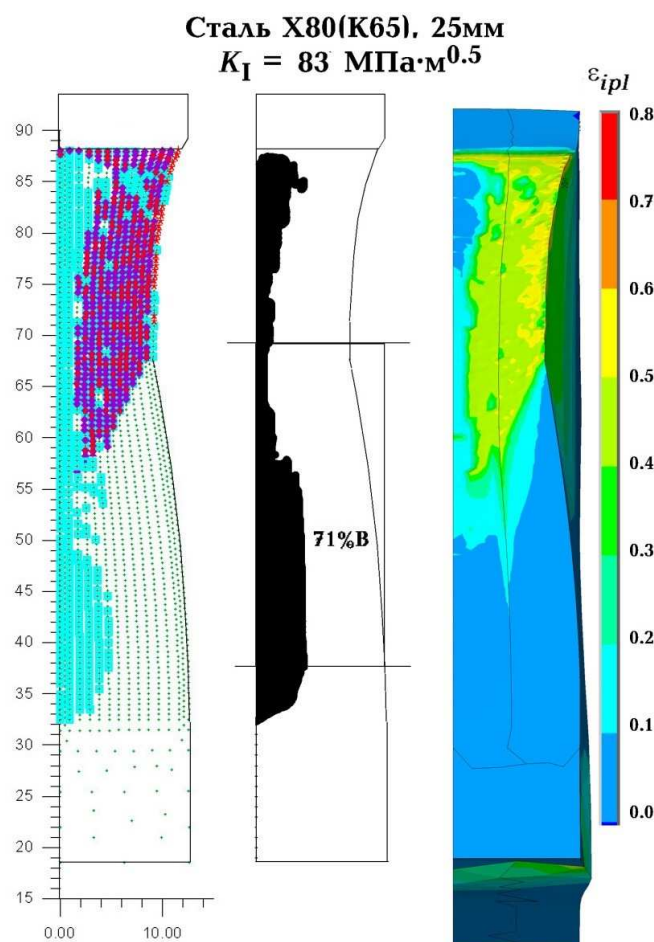


Рис. 2. Картограмма излома и распределение пластических деформаций в изломе модели образца ИПГ (нижняя часть излома на рассматриваемый момент не разрушена)

Поскольку картографирование излома на рис. 2 позволяет получить долю волокнистой составляющей около 70 %, можно считать, что заданное при расчете K_I материала соответствует температуре $T_{\text{и}} = T_{\text{DWTT}}$. Тогда, из формулы (1), $\Delta T = T_D - T_{\text{и}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, то есть температура T_{DWTT} , полученная при испытаниях падающим грузом, в данном примере должна быть несколько ниже минимальной температуры применимости материала. Для получения полной картины зависимости ΔT от толщины и категории прочности металла требуется проведение серийных расчетов.

ВЫВОДЫ

В статье дано развернутое описание совокупности предлагаемых условий конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения для использования в расчетах МКЭ моделей образцов и конструкционных элементов. В том числе впервые рассмотрено моделирование конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения в изломе с расщеплением. Представлены границы применимости используемых условий разрушения.

Подтверждено, что результаты оценки КИН, необходимого для торможения трещины в конструкциях, получаемые с использованием численной процедуры и метода МКЭ, практически совпадают, в том числе при

наличии расщеплений. Это позволяет использовать соотношения (1) и (2) для обоснования требований к температурам вязко-хрупкого перехода, значениям работы удара и иным характеристикам судостроительных и трубных сталей. Примеры таких соотношений для однородных материалов представлены в [8]. Дальнейшие расчеты МКЭ позволят учесть особенности материалов, склонных к расщеплению при нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башаев В.К. Разработка технологии производства листового проката толщиной до 50 мм из высокопрочных сталей с индексом «Arc» / В.К. Башаев, Е.И. Хлусова, С.А. Голосиенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С. 100 — 111.
2. Башаев В.К. Хладостойкость высокопрочной легированной стали с пределом текучести 500 МПа / В.К. Башаев, Г.Д. Мотовилина, В.В. Рябов, О.В. Сыч и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 29 — 38.
3. Аносов А.П. Устройство для активной противоледовой защиты морских нефтегазовых сооружений / А.П. Аносов, Н.И. Восковчук // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 58 — 67.
4. Тряскин В.Н. Оценка возможности применения действующих Правил РС к конструкциям ледовых усилений стоечных судов / В.Н. Тряскин, В.В. Платонов, И.А. Свистунов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62/63. — С. 89 — 99.
5. Филин В.Ю. Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах. Часть 2. Сопротивление распространению трещины / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов, Е.Д. Назарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 56 — 69.
6. Филин В.Ю. Экспериментальные исследования и расчеты распространения трещины при температуре нулевой пластичности судостроительной стали / В.Ю. Филин, А.В. Мизецкий, Д.Р. Бараков, М.М. Пегливанова // Вопросы материаловедения. — 2024. — № 2(118). — С. 144 — 153.
7. Filin V.Yu. Quality control of steels for large-sized welded structures of the Arctic shelf: Application of Russian and foreign requirements / V.Yu. Filin // Inorganic Materials: Applied Research. — 2019. — Vol. 10. No. 6. — P. 1492 — 1503. — DOI 10.1134/S207511331906008X.
8. Barakov D.R. Actual problems of strength and reliability of steel arctic structures. Assessment procedures of crack start and arrest condition / D.R. Barakov, V.Yu. Filin // Proceedings of the XIII International Conference "Navy and Shipbuilding Nowadays" (NSN'24). — ИКР "NP-PRINT", 2024. — P. 239 — 246.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. «Материалы» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023. — 390 с.
10. Филин В.Ю. Количественные оценки сопротивления распространению разрушения судостроительных и трубных сталей / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов, А.В. Мизецкий и др. // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: м-лы и докл. VIII Всеросс. конф. (Красноярск, 16 — 20 сентября 2023 г.). — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. — С. 83 — 88. — DOI 10.25743/SSTS.2023.78.16.019.
11. Ильин А.В. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной / А.В. Ильин, Д.М. Артемьев, В.Ю. Филин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Т. 84. — № 1(1). — С. 56 — 65.
12. Ларионов А.В. Оценка связи сопротивления металла вязкому разрушению с поглощенной энергией при испытаниях падающим грузом / А.В. Ларионов, В.Ю. Филин, А.В. Ильин // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: м-лы XIV Всеросс. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 25 марта 2022 г.). — М.: НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, 2022. — С. 506 — 520.
13. Cockcroft M.G. Ductility and the workability of metals / M.G. Cockcroft, D.J. Latham // Journal of the Institute of Metals. — 1968. — Vol. 96. — P. 33 — 39.
14. Oh S.I. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2: Workability in extrusion and drawing / S.I. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi // Journal of Engineering for Industry. — 1979. — Vol. 101. — P. 36 — 44.
15. Власов А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2017. — Вып. 11. Ч. 1. — С. 46 — 58.
16. Stebunov S. Prediction of fracture in cold forming with modified Cockcroft-Latham criterion / S. Stebunov, A. Vlasov, N. Biba // Procedia Manufacturing. — 2018. — Vol. 15. — P. 519 — 526.

REFERENCES

1. Bashaev V.K., Khlusova E.I., Golosienko S.A. Development of manufacturing procedures for rolled plates of thickness up to 50 mm made of high strength steels with index "Arc". *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2013. No. 36. P. 100 — 111. (In Russ.)
2. Bashaev V.K., Motovilina G.D., Ryabov V.V., Sych O.V. et al. Cold resistance of high strength alloy steel with a yield stress of 500 MPa. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2014. No. 37. P. 29 — 38. (In Russ.)
3. Anosov A.P., Voskovschuk N.I. Active ice protection of offshore oil and gas facilities. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 58 — 67. (In Russ.)
4. Tryaskin V.N., Platonov V.V., Svistunov I.A. Assessment of the possibility to apply current requirements of RS Rules to berth-connected ships ice reinforcement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 62/63. P. 89 — 99. (In Russ.)
5. Filin V.Yu., Ilyin A.V., Larionov A.V., Nazarova E.D. Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures. Part 2: Resistance to crack propagation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 56 — 69. (In Russ.)

6. Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Barakov D.R., Peglivanova M.M. Experimental studies and calculation of crack propagation at the nil ductility temperature of shipbuilding steel. *Voprosy materialovedeniya [Problems of materials science]*. 2014. No. 2(118). P. 144 — 153. (In Russ.)
7. Filin V.Yu. Quality control of steels for large-sized welded structures of the Arctic shelf: Application of Russian and foreign requirements. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 6. P. 1492 — 1503. DOI 10.1134/S207511331906008X.
8. Barakov D.R., Filin V.Yu. Actual problems of strength and reliability of steel arctic structures. Assessment procedures of crack start and arrest condition. *Proceedings of the XIII International Conference "Navy and Shipbuilding Nowadays" (NSN'24)*. IKP "NP-PRINT", 2024. P. 239 — 246.
9. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIII "Materials" / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024. 390 p.
10. Filin V.Yu., Ilyin A.V., Larionov A.V., Mizetsky, A.V. et al. Kolichestvennye otsenki soprotivleniya rasprostraneniya razrusheniya sudostroitel'nykh i trubnykh stalei [Quantitative estimates of fracture propagation resistance of hull and pipe steels]. *Bezopasnost' i monitoring prirodnnykh i technogennykh system: materialy i dorkady. VIII Vserossiiskaya konferentsiya* [Safety and monitoring of natural and man-made systems: materials and reports. VIII All-Russian conference] (Krasnoyarsk, 16 — 20 September 2023). Novosibirsk: FIC IVT, 2023. P. 83 — 88. DOI 10.25743/SSTS.2023.78.16.019.
11. Ilyin A.V. Artemiev D.M., Filin V.Yu. Modelirovanie MKE rasprostraneniya i tormozheniya khrupkogo razrusheniya v plastinakh s ishkodnoi treschinoi [Simulation of the propagation and arrest of the brittle fracture in steel plates with initial crack using finite element method]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Plant laboratory. Diagnostics of materials]*. 2018. Vol. 84. No.1(I). P. 56 — 65.
12. Larionov A.V., Filin V.Yu., Ilyin A.V. Ocenka svyazi soprotivleniya materiala vjazkomu razrusheniju s pogloschennoj energiej pri ispytaniyakh padayuschim грузом [On the correlation of shear fracture resistance of metal with the absorbed energy at drop weight tear test]. *Fiziko-mechanicheskie ispytaniya, prochnost', nadezhnost' sovremennykh konstrukcionnykh i funkcionnykh materialov: materialy XIV Vserossiiskoi konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam svoistv materialov "TestMat"* [Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of XIV All-Russian conference on testing and investigation of material properties. Moscow, 25 march 2022]. NRC Kurchatov institute — VIAM Publ., 2022. P. 506 — 520.
13. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*. 1968. Vol. 96. P. 33 — 39.
14. Oh S.I., Chen C.C., Kobayashi S. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2: Workability in extrusion and drawing. *Journal of Engineering for Industry*. 1979. Vol. 101. P. 36 — 44.
15. Vlasov A.V. O primeneni kriteriya Kokrofta-Latama dlya prognozirovaniya razrusheniya pri ob'emnoi shtampovke [On the application of Cockcroft-Latham criterion for fracture prediction in 3D stamping]. *Izvestia TulGU. Technicheskie nauki [News of Tula State University. Technical sciences]*. 2017. Vol. 11, part 1. P. 46 — 58.
16. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of fracture in cold forming with modified Cockcroft-Latham criterion. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 15. P. 519 — 526.