

Научная статья

УДК 621.791:629.02

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.013>

Оценка остаточной надежности судокорпусных конструкций из феррито-перлитных сталей с макротрещинами по структурным и механическим характеристикам

Молоков К.А.^{1,2} spektrum011277@gmail.com, Новиков В.В.¹ leka1551@rambler.ru

¹Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), ²Владивостокский государственный университет (ВВГУ)

Аннотация. Надежность конструкций судового корпуса напрямую связана с критической плотностью повреждений и их величиной. В условиях волнения и вибраций корпус испытывает циклические нагрузки с разными частотами и амплитудами, поэтому его эксплуатация в жизненном цикле судна практически маловероятна без повреждений в виде возникающих микро и макротрещин трещин. Актуальной задачей остается определение плотности повреждений или их величины, необходимых для оценки момента начала катастрофического разрушения.

На основе некоторых допущений и упрощений получена аналитическая зависимость существенно влияющих на момент окончательного разрушения характеристик и параметров, участвующих в структурно-механической модели, на размер критической макротрещины в феррито-перлитных сталях. По результатам этой зависимости удалось проанализировать совместное влияние изменения механических характеристик на критический размер макротрещины сталей 10, Ст22К, Ст3сп, 50. Зависимость позволяет оценить и спрогнозировать наилучшие комбинации значений коэффициентов степенного упрочнения, Пуассона, среднего диаметра зерна и предела текучести сталей, найти наибольшее оптимальное значение длины критической трещины, а также оценить остаточную прочность судна с макротрещинами в условиях старения феррито-перлитных сталей судового корпуса. В работе представлена зависимость критической длины макротрещины от указанных механических характеристик и диаметра зерна. Аналитически показано, что на критическую длину трещины оказывает значительное влияние показатель степенного упрочнения, предел текучести и коэффициент Пуассона при условиях плоской деформации в вершине макротрещины.

Ключевые слова: Корпусная конструкция, критическая макротрещина, КИН, пороговый коэффициент интенсивности напряжений, диаметр зерна, коэффициент упрочнения, феррито-перлитная сталь

Благодарности: Авторы выражают признательность сотрудникам департамента морской техники и транспорта ДФУ за рекомендации при разработке темы, затронутой в данной статье.

Для цитирования: Молоков К.А., Новиков В.В. Оценка остаточной надежности судокорпусных конструкций из феррито-перлитных сталей с макротрещинами по структурным и механическим характеристикам, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3 часть 2, С. 102—109. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.013.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.013>

Assessment of the residual reliability of ship hull structures made of ferrite-pearlite steels with macrocracks based on structural and mechanical characteristics

Konstantin A. Molokov^{1,2} spektrum011277@gmail.com, Valery V. Novikov¹ leka1551@rambler.ru

¹Far Eastern Federal University (FEFU), Russian Federation; ²Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The reliability of ship hull structures is directly related to the critical density of damage and its magnitude. In conditions of waves and vibrations, the hull experiences cyclic loading with different frequencies and amplitudes, so its operation in the life cycle of the vessel is almost unlikely without damage in the form of micro- and macro-cracks. An urgent task remains to determine the density of damage or its magnitude necessary to assess the moment of the onset of catastrophic destruction.

Based on some assumptions and simplifications, an analytical dependence of the characteristics and parameters involved in the structural-mechanical model that significantly influence the moment of final destruction on the size of the critical macrocrack in ferrite-pearlite steels is obtained. Based on the results of this dependence, it was possible to analyze the combined effect of changes in mechanical characteristics on the critical size of a macrocrack in steels 10, St22K, St3sp, 50. The dependence allows us to evaluate and predict the best combinations of the values of power-law hardening coefficients, Poisson, average grain diameter and yield strength of steels, and to find the greatest optimal value the length of the critical mother-in-law, as well as assess the residual strength of a ship with macrocracks under aging conditions of ferrite-pearlite steels of the ship hull. The paper presents the dependence of the critical length of a macrocrack on the specified mechanical characteristics and grain diameter. It is analytically shown that the critical crack length is significantly influenced by the power hardening index, yield strength and Poisson's ratio under conditions of plane strain at the tip of the macrocrack.

Key words: Hull structure, critical macrocrack, SIF, threshold stress intensity factor, grain diameter, hardening coefficient, ferrite-pearlite steel.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the staff of the Department of Marine Engineering and Transport of the Far Eastern Federal University for their recommendations in developing the topic raised in this article.

For citation: Konstantin A. Molokov, Valery. V. Novikov, Assessment of the residual reliability of ship hull structures made of ferrite-pearlite steels with macrocracks based on structural and mechanical characteristics, Marine intellectual technologies. 2024. № 3 part 2, P. 102—109. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.013.

Введение

Известно, что в судокорпусных сварных конструкциях со временем появляются повреждения в виде усталостных трещин (рис. 1). Они, как правило, берут свое начало от концентраторов напряжений, сварных швов и др. [1, 2].

В жестких точках, где имеются сварные швы, трещины могут распространяться в области зоны термического влияния (ЗТВ), имеющей наименьшую трещиностойкость, как вдоль швов (продольная трещина), так и поперек. Под влиянием температурно-деформационных циклов в ЗТВ как структурные, так и механические характеристики после сварки будут значительно отличаться от характеристик основной стали. Поэтому с точки зрения адекватности расчетов для определения

критической длины продольной сквозной трещины в ЗТВ необходимо иметь зависимости, базирующиеся на структурных и механических входных данных. Поиск одной из таких зависимостей и является целью данной работы.

Следует отметить, что по мере эксплуатации конструкций происходит деградация характеристик стали. Это дополнительно приводит к ухудшению ее трещиностойкости, учесть которое представляется возможным только с учетом оценки параметров структуры материала [3, 4, 5, 6]. Таким образом, представляется необходимым установить взаимосвязь критической полудлины трещины $L_{кр}$ с характеристиками металла, имеющими склонность к изменению в процессе старения.

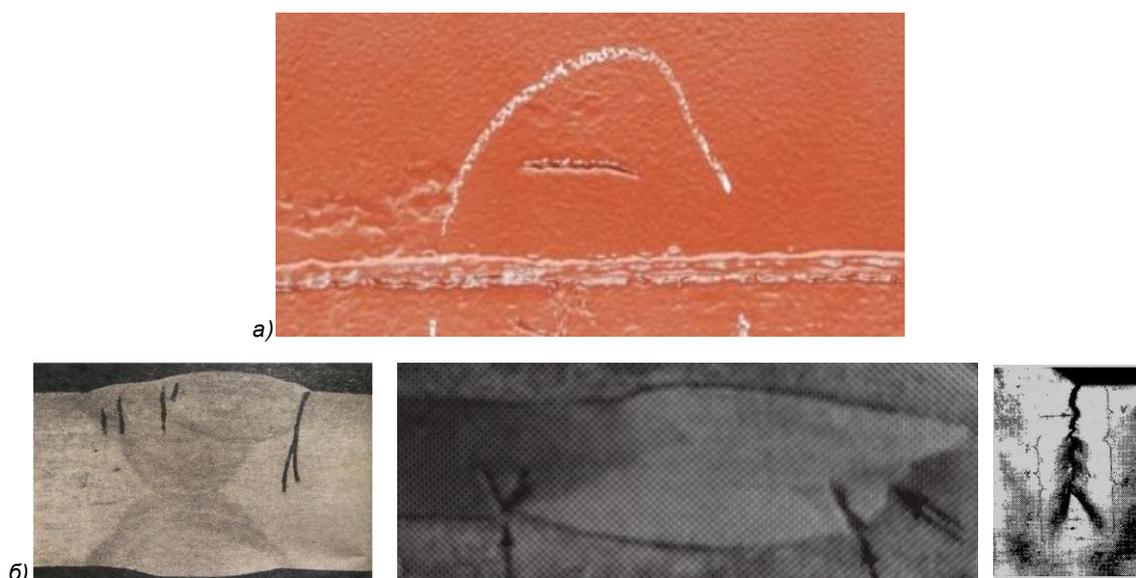


Рис. 1. Трещина в наружной обшивке т/х «Ладога», развивающаяся при поперечной нагрузке вне области ЗТВ (а), и трещины в сварном шве и ЗТВ (б) в соединениях корпусных конструкций и трубопроводов [7, 8]

Отметим также, что на надежность и остаточную прочность судовых конструкций с трещинами оказывают достаточно существенное влияние факторы эксплуатационного ресурса корпуса и температуры. Так, работами сотрудников Ленинградской школы ФТИ в результате проведения исследований различных материалов (включая и металлы) обоснована концепция С.Н.Журкова о роли тепловых колебаний в явлении прочности (так называемая долговременная прочность) [9]. Результаты данных исследований коренным образом изменяют наши представления о причинах разрушения твердых тел со временем.

Разрушение судовых конструкций, а также катастрофические переломы корпусов судов (хотя и случались не часто) обычно происходили, когда корпусная сталь имеет значительную наработку – 30 и более лет, а судно находилось в штормовых

условиях [3]. Данный факт может свидетельствовать об общем износе материала со временем, проявляющемся в значительном снижении его трещиностойкости, при котором незначительные размеры усталостных трещин на начальном этапе эксплуатации будут являться критическими в конце срока эксплуатации.

1. Основные преобразования

Несомненно, привлекательным является непосредственное вычисление критической длины трещины без наличия известных значений предела выносливости и K_{1c} . На практике такая возможность удобна, так как позволяет сразу сопоставить известную существующую длину трещины с расчетным критическим размером $2L_{кр}$. Кроме того, это даст возможность проанализировать влияние

основных структурных и механических характеристик на $L_{кр}$. Существуют различные подходы и возможности для определения этой длины [1, 7, 4].

Например, в одном из источников рассмотрен подход, основанный на структурно деформационном критерии начала критического разрушения. Однако предложенная зависимость существенно чувствительна к входящим значениям параметров, в частности, к коэффициенту Пуассона [7]. По этой причине использование данного подхода на практике может быть затруднено.

Примем следующие допущения и формализуем задачу:

1) Для простоты выводов положим, что предел выносливости σ_{-1} равен пределу текучести (это несколько скажется на точности расчета, но качественно не отразится на результатах).

2) Для пороговой характеристики будем считать, что источником микроскола является субмикротрещина у границы действительного зерна, а напряжение микроскола при истинной деформации $e = 1$ возрастает в $K_{MC} = 1,618$ раз от напряжений микроскола R_{Mc} при $e = 0$.

3) Главные моды фрагментов для феррито-перлитных сталей, согласно предыдущему пункту, составляют значения в 2,618 меньше среднего диаметра зерна и являются константой в рамках полученных выводов.

4) Критический скачок макротрещины происходит при значении K_{1c} и для феррито-перлитных сталей составляет 0,618 диаметра зерна.

Принимая во внимание принятые допущения и основываясь на концепции критической плотности упругой энергии деформации, предложенной в модели Дж. Си [4], будем считать правомерным следующее обстоятельство. Отношение квадратов порогового K_{th0} и критического K_{1c} коэффициентов интенсивности напряжений обладает пропорциональностью по отношению величин, соответствующих им длин трещин в начальной (пороговой) и конечной (критической) стадии её стабильного развития:

$$\frac{L_{нач}}{L_{кр}} = \left(\frac{K_{th0}}{K_{1c}}\right)^2. \quad (1)$$

В силу того, что величина нагрузки незначительно сказывается на длине макротрещины при $L \rightarrow L_{кр}$ относительно величины разброса значений $L_{кр}$, примем, что $\sigma_{-1} \cong \sigma_{0,2}$. Тогда согласно модели Дж. Си равенство (1) будет справедливо, а после подстановки выражений для коэффициентов интенсивности полудлина критической сквозной макротрещины при условии плоской деформации в ее вершине может быть представлена зависимостью:

$$L_{кр} = \frac{2,472}{(2\mu - 1)^2} \times \left(\frac{2,85K_{MC}(m + 1)(1 - 2\mu) \cdot d_g^{\frac{(m-1)}{(2m+2)}}}{\left(\frac{(m + 1)(2\mu - 1)}{\sqrt{3}} + 1\right) \cdot \sigma_{0,2}} \right)^{\frac{1+m}{m}}, \quad (2)$$

где m – показатель степенного упрочнения стали; μ – коэффициент Пуассона; d_g – средний диаметр зерна стали, м; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести стали, МПа.

2. Анализ зависимостей и результатов

Нетрудно заметить, что зависимость приобретает неопределенность $0/0$ при $\mu = 0,5$. Это представляется логичным, так как такое значение сталь приобретает в полностью пластическом состоянии. Поэтому говорить о критической трещине для такого материала не имеет смысла. Все аргументы, входящие в эту формулу, в некотором роде физически взаимосвязаны, но для разных марок феррито-перлитной стали они могут варьироваться. Это может характеризовать ту, или иную сталь, как обладающую большей сопротивляемостью к окончательному разрушению. В то же время необходимо отметить, что длительность стадий разрушений в целом зависит не только от конечной длины критической трещины, но и от скорости продвижения (скорости развития) трещины на этапах ее роста [10, 11, 12]. Поэтому однозначно не стоит связывать отмеченное обстоятельство с сопротивляемостью развитию трещины в процессе разрушения [6].

С увеличением времени действия нагрузки сопротивление пластической деформации и сопротивление разрушению снижаются. При комнатной температуре у металлов это становится особенно заметным при воздействии коррозионной или другой активной среды (коррозия под напряжением и эффект Ребиндера). При высоких же температурах с течением времени при постоянном напряжении наблюдается прирост пластической деформации. Однако здесь ползучесть учитывать не будем.

Положим, что как R_{Mc} , так и предел текучести стали $\sigma_{0,2}$, уменьшаются с течением времени и зависят от температуры эксплуатации стали. Опираясь на то, что модель развития трещины по Дж. Си справедлива при $T = const$ на всем промежутке времени работы, получим зависимость подобного вида (2) с учетом температурно-временных значений (T, τ) . Тогда формула критической полудлины сквозной трещины примет вид:

$$L_{кр}(T, \tau) = \frac{2,472 \left(1 - \frac{5RT \cdot \ln(\tau)}{5U_0 - 161RT}\right)^2}{(2\mu - 1)^2} \times \left(\frac{2,85K_{MC}(m + 1)(1 - 2\mu) \cdot d_g^{\frac{(m-1)}{(2m+2)}}}{\left(\frac{(m + 1)(2\mu - 1)}{\sqrt{3}} + 1\right) \cdot \sigma_{0,2}} \right)^{\frac{1+m}{m}} = \left(1 - \frac{5RT \cdot \ln(\tau)}{5U_0 - 161RT}\right)^2 L_{кр}, \quad (3)$$

где $K_{MC} = 1,618$ – коэффициент увеличения сопротивления микроскола от деформированной структуры при истинной деформации $e = 1$ феррито-перлитных сталей; τ – время в секундах; T – абсолютная температура эксплуатации, °K; U_0 – энергия сублимации железа, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · K).

Для разных типов источников микроскола зерна в фрагментированной структуре K_{MC} изменяется от 1,4 при $e \cong 0,45$ и до 1,7 при $e \cong 1$; при этом для данного диапазона можно отметить однообразный характер увеличения K_{MC} . После подстановки крайних значений K_{MC} в формулу (3) получаем, что он

значительно влияет на величину критической трещины, а получение наиболее близкого значения K_{1c} к экспериментальному соответствует K_{MC} при $e \cong 1$. Это подтверждает тот факт, что для феррито-перлитных сталей в области вершины трещины должна достигаться такая критическая истинная деформация, которая соответствует началу катастрофического разрушения при нагрузках предела выносливости.

Взаимосвязь между пределом текучести стали и средним диаметром зерна может быть получена на основе известного выражения Холла-Петча $\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k/\sqrt{d_g}$ по экспериментальным данным феррито-перлитных сталей обычной и средней прочности. Заменяя в (1) $\sigma_{0,2}$ на зависимость Холла-Петча, будем иметь, что фактически $L_{кр}$ определяется некоторыми микрофизическими константами материала σ_0 – сопротивлением деформированию монокристалла, k – коэффициентом Холла-Петча, d_g и m . Так как структурно-механическая модель справедлива для областей мезоуровня, то и преобразованное выражения (2) или (3) будут справедливы только в области зерно-граничного упрочнения, т.е. когда $k > 0$.

Полученная формула (2) отражает влияние основных характеристик и параметров структурно-механической модели на размер критической макротрещины. Она предоставляет возможность анализа и в некоторых случаях прогнозирования оптимальных комбинаций значений характеристик m, μ, d_g и $\sigma_{0,2}$ сталей, обладающих большими $L_{кр}$, включая прогнозирование остаточного ресурса судна с большими сквозными макротрещинами. Если имеются данные о деградации характеристик от старения стали, то появляется возможность спрогнозировать влияние старения на критический размер трещин феррито-перлитных сталей судового корпуса. Рассмотрим поверхность критических размеров макротрещин по найденной зависимости (3), предположив, что механические характеристики

стали m, μ, d_g остаются независимыми от времени t и температуры T (рис.2). Здесь и в дальнейшем на графиках представлены результаты расчетов по формуле для стали 10 с характеристиками $\sigma_{0,2} = 190$ МПа, $m = 0,17, d_g = 66$ мкм, $\mu = 0,28$.

Очевидно (рис. 2,а), что при более высоких температурах размер критической трещины со временем снижается более интенсивно. В то же время при нормальных температурах (порядка 300°K) снижение критической длины довольно оказывается существенным и согласно полученной зависимости составляет ~20% за 10^6 с. Если полагаться на корректность зависимости, полученной школой С.Н. Журкова [9], то имеет место значительное снижение, и оно происходит за сравнительно малый начальный период. С другой стороны, как трещиностойкость, так и критическая величина трещины в материале, имеют большой статистический разброс на практике, что может происходить по причине снижения этих характеристик с течением времени. Представляет интерес вопрос величины стабилизации или отсутствия стабилизации разброса характеристик материала после значительного периода времени, например, после 30...50 лет эксплуатации в сравнении с только что изготовленной сталью. На данный момент нам не известны такие эксперименты, вероятно в силу их длительного проведения; возможно, что они и вовсе отсутствуют. Можно предположить, что вероятно стабильность характеристик за 30 и более лет должна убывать, но менее интенсивно. Это заметно по рис. 2,а – ось времени имеет почти линейный характер в логарифмической системе координат. Можно считать, что за этот период сталь достигает практически своих наилучших свойств сопротивляемости к трещинам, даже не принимая в расчет дополнительное ухудшение этих свойств от технологических и эксплуатационных дефектов.

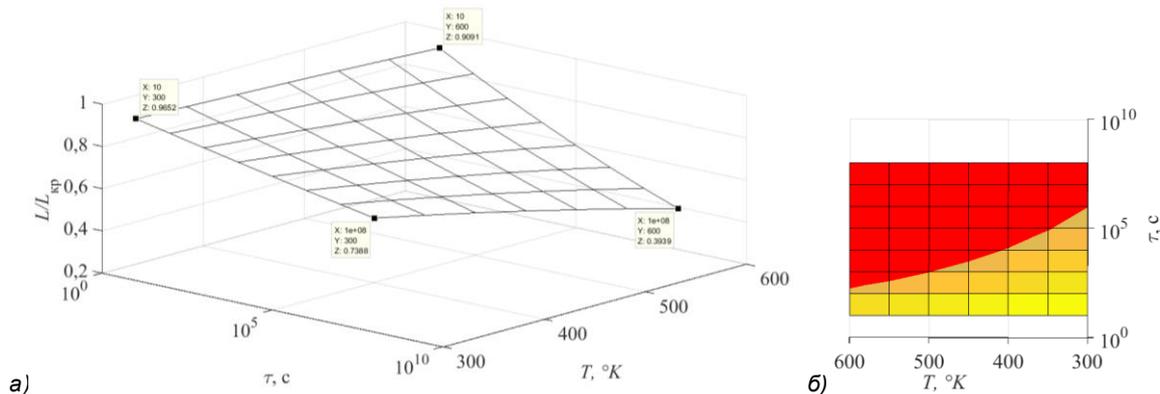


Рис. 2. Поверхность относительных полудлин трещин (а) и форма разграничения (б) допускаемых значений L на уровне $0,8L_{кр}$, для стали 10 в осях времени и температуры эксплуатации

Полагая, что d_g и μ являются точными значениями и не изменяются, построим поверхность изменения L от отклонений на $\pm 10\%$ m и μ (рис. 3). Для того чтобы длина трещины оставалась постоянной как видно, коэффициент упрочнения m должен убывать или возрастать в таком процентном отношении, на сколько процентов возрастает или убывает соответственно предел текучести, так как

зависимость между m и $\sigma_{0,2}$ оказывается практически линейна при $L = const$. При нормальных законах распределения m и $\sigma_{0,2}$ наилучшие сочетания в 1/4 случаев разброса. В 3/4 случаях длина трещины будет оставаться неизменной либо будет больше, чем $L_{кр}$, рассчитанная по наиболее вероятным значениям m и $\sigma_{0,2}$.

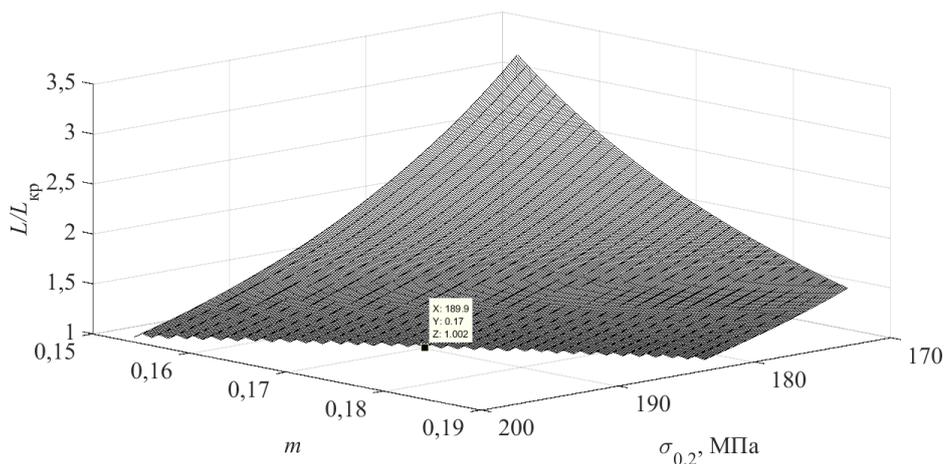


Рис. 3. Поверхность относительных приращений полудлины макротрещины при ±10% отклонениях механических характеристик стали 10

Формулы (2) и (3) обладают одинаковой чувствительностью к изменениям m и $\sigma_{0,2}$ и μ . Однако к изменению диаметра зерна d_g они не так сильно чувствительны, как к μ . Если добиться снижения d_g на 15% независимо от других характеристик, то в наихудшем сочетании m и $\sigma_{0,2}$ даст уменьшение L

только на 40%, а в лучшем сочетании увеличение L произойдет на 500% (рис. 4).

Таким образом, проведенный анализ зависимостей показывает, насколько сильно может проявляться неоднородность структурных параметров и механических характеристик сталей и влиять на разрушение корпусной конструкции.

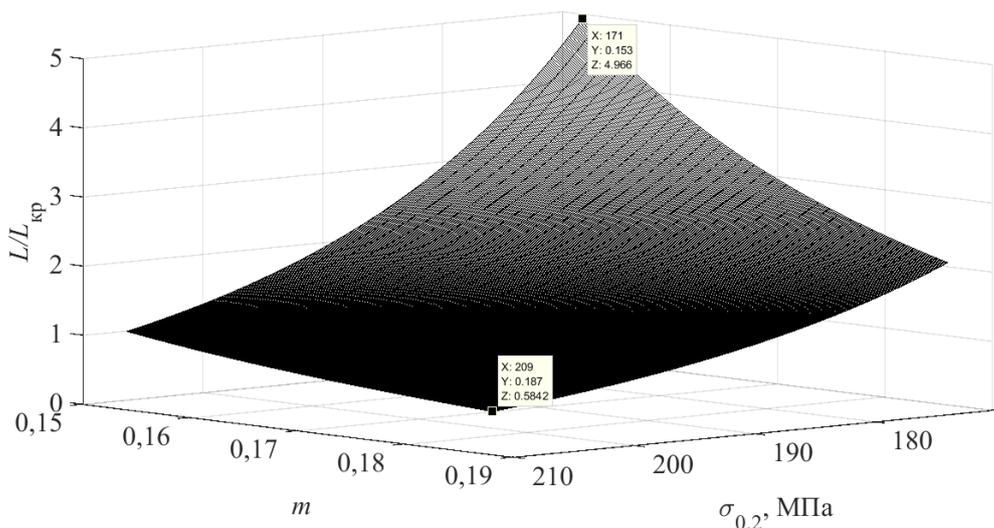


Рис. 4. Поверхность относительного изменения полудлины трещины от m и $\sigma_{0,2}$ если уменьшить средний диаметр зерна стали 10 на 15%

Кроме того, что зависимости позволяют спрогнозировать значение критической длины трещины для конкретной стали, например, при снижении среднего диаметра зерна, представляется возможным легко сравнивать стали между собой по критической величине макротрещины (рис. 5). На графике представлены сравнительное изменение $L_{кр}$ для разных марок сталей при разбросах значений m и $\sigma_{0,2}$ в виде поверхностей, отраженных на плоскость $L - \sigma_{0,2}$ (ось m – перпендикулярна этой плоскости). Нетрудно заметить, что снижение

коэффициента упрочнения на 10% $m_{(-)}$ существенно увеличивает длину критической макротрещины, а увеличение его на этот же процент $m_{(+)}$ – уменьшает её.

На рисунке 5 показано, что диапазон изменения $L_{кр}$ больше при уменьшенном коэффициенте упрочнения $m_{(-)}$ при одном и том же разбросе $\sigma_{0,2}$, и такая закономерность наблюдается для всех сталей. При этом характерно, что чем ниже предел текучести, тем выше значение $L_{кр}$.

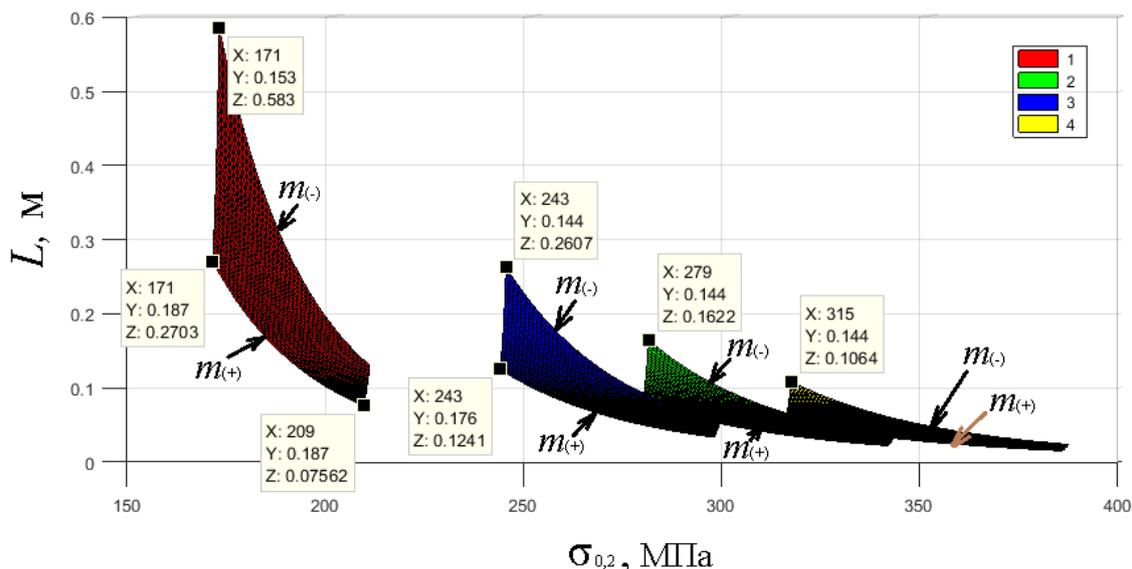


Рис. 5. Поверхности критических длин трещин для сталей 10 (1), Ст22К (2), ВСтЗсп (3), сталь 50 (4) (данные сталей взяты из работы [4]) при разбросах предела текучести и коэффициента упрочнения на $\pm 10\%$ при $d_g = const$

Заключение

Аналитически полученная формула в виде (2) отражает зависимость влияния основных концептуальных характеристик и параметров, участвующих в структурно-механической модели, на размер критической макротрещины. Она интересна тем, что позволяет проанализировать, а в некоторых случаях - и спрогнозировать, наилучшие комбинации значений характеристик m , μ , d_g и $\sigma_{0,2}$ сталей, отличающиеся большими $L_{кр}$, в том числе для прогнозирования остаточного ресурса судна с большими макротрещинами в условиях состарившихся феррито-перлитных сталей судового корпуса. Проведенный анализ аналитических зависимостей показывает, насколько сильно может проявляться неоднородность структурных параметров и механических характеристик сталей и влиять на разрушение корпусных конструкций. Так,

$L_{кр}$ существенно увеличивается при уменьшении коэффициента упрочнения $m_{(-)}$ на 10% при одном и том же разбросе $\sigma_{0,2}$, и такая закономерность наблюдается для всех сталей. Таким образом, нестабильность механических характеристик даже в локальных зонах конструкции с трещинами оказывает значительное влияние на $L_{кр}$. Вполне вероятно, что для крупногабаритных конструкций, где в целом разбросы механических характеристик велики, этот факт является наиболее актуальным и его следует учитывать при оценке остаточной прочности и надежности.

В дальнейшем предполагается развитие исследований, связанных с анализом и оценкой снижения несущей способности судового корпуса с трещинами в зонах термического влияния сварных швов судовых конструкций, и в том числе, с учетом старения стали.

Литература

1. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
2. Турмов Г.П. Расчет прерывистых связей на прочность с учетом концентрации напряжений. - Владивосток: ДВГУ, 1984. - 152 с.
3. Молоков К.А., Новиков В.В., Антоненко С.В. Повреждаемость судовых конструкций и основы построения математической модели оценки трещиностойкости конструкционных сталей. Труды Крыловского государственного научного центра, 2022; Специальный выпуск 1: 46–54.
4. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. Монография. - Владивосток: Дальнаука, 2010 - 281 с.
5. Сосновский Л.А., Богданович А.В. Трещиностойкость. Монография. Гомель: БелГУТ, 2011. 366 с.
6. Туманов Н. В. Стадийность кинетики усталостных трещин: закономерности и особенности / Н. В. Туманов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2024. – Т. 90, № 1. – С. 58-71. – DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71. – EDN JBIGIO.
7. Молоков К.А. и др. Аналитический метод определения критической длины трещин в судовых конструкциях на основе структурно-деформационного анализа / К.А. Молоков, А.И. Мамонтов, В.В. Новиков, А.П. Герман // Морские интеллектуальные технологии., – 2020. – № 2-1(48). – С. 56-63. – DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.058. – EDN AAXCGQ.
8. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов. - Уфа: АН РБ,

- Гилем, 2011. - 144 с.
9. Регель В.Р., Слущкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
 10. Кургузов В.Д. Переход от квазивязкого к квазихрупкому разрушению в сварных соединениях в условиях низких температур // Третья международная научная конференция "Полярная механика". - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С.695-706.
 11. Корнев В.М. Распространение усталостных трещин и разрушение стальных конструкций при температурах ниже порога хладноломкости // Третья международная научная конференция "Полярная механика". - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С.707-716.
 12. Молоков К.А., Домашевская Я.Р. Оценка ресурса сварных соединений из феррито-перлитных материалов в условиях низких температур. // Материалы третьей международной научной конференции Полярная механика - 2016. С.618-628

References

1. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Stress Concentration and Other Peculiarities of Stressed State of Ship Hull Structures. - Vladivostok: FEFU, 2014. - 178 с.
2. Turmov G.P. Calculation of discontinuous connections on strength with account of stress concentration. - Vladivostok: FEFU, 1984. - 152 с.
3. Molokov K.A., Novikov V.V., Antonenko S.V. Damageability of Ship Structures and Basis of Mathematical Model Construction for Crack Resistance Assessment of Structural Steels. Proceedings of the Krylov State Scientific Centre, 2022; Special Issue 1: 46-54.
4. Matokhin G.V., Gorbachev K.P. To engineer about resistance of materials to fracture. Monograph. - Vladivostok: Dalnauka, 2010 - 281 p.
5. Sosnovskiy L.A., Bogdanovich A.V. Crack Resistance. Monograph. Gomel: BelGUT, 2011. 366 с.
6. Tumanov N. Tumanov, N.V. Staging of fatigue crack kinetics: regularities and peculiarities (in Russian) / N.V. Tumanov // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostics of materials. - 2024. - Т. 90, № 1. - С. 58-71. - DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71. - EDN JBIGIO.
7. Molokov, K.A. et al. Analytical method of critical crack length determination in ship structures on the basis of structural and deformation analysis / K.A. Molokov, A.I. Mamontov, V.V. Novikov, A.P. German // Marine Intelligent Technologies. Novikov, A.P. German // Marine Intelligent Technologies, - 2020. - № 2-1(48). - С. 56-63. - DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.058. - EDN AAXCGQ.
8. Yamaleev, K.M.; Gumerova, L.R. Structural Aspects of Fracture of Oil Pipeline Metal. - Ufa: Academy of Sciences of RB, Gilem, 2011. - 144 с.
9. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.E. Kinetic nature of strength of solid bodies. - Moscow: Nauka, 1974. - 560 с.
10. Kurguzov V.D. Transition from quasi-viscous to quasi-brittle fracture in welded joints at low temperatures // Third International Scientific Conference "Polar Mechanics". - Vladivostok: FEFU, 2016. - С.695-706.
11. Kornev, V.M. Fatigue Crack Propagation and Failure of Steel Structures at Temperatures Below the Cold Fracture Threshold (in Russian) // Third International Scientific Conference "Polar Mechanics". - Vladivostok: FEFU, 2016. - С.707-716.
12. Molokov, K.A.; Domashevskaya, Y.R. Estimation of a resource of welded joints from ferrite-perlite materials in conditions of low temperatures. // Proceedings of the Third International Scientific Conference Polar Mechanics - 2016. С.618-628.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Молоков Константин Александрович, к.т.н., доцент, Департамент промышленной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, г.Владивосток, Россия; доцент, кафедра информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, г.Владивосток, Россия, AuthorID: 743048, SPIN: 4021-7431, ScopusID: 57197836777, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Konstantin A. Molokov, Ph.D. (Eng)., assistant professor of the Industrial Safety Department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8; Associate professor of the Department of Information Technologies and Systems, Vladivostok State University, 690014, Vladivostok, Gogolya st., 41, ORCID: 0000-0002-9764-9329, e-mail: spektrum011277@gmail.com

Новиков Валерий Васильевич, к.т.н., доцент,
Департамент морской техники и транспорта
Политехнического института, Дальневосточный
федеральный университет, г.Владивосток, Россия,
SPIN: 7257-7822; ScopusID: 5641710410,
e-mail: leka1551@rambler.ru

Valery V. Novikov, Ph.D. (Eng)., assistant professor,
Department of Marine Engineering and Transport,
Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russia, SPIN: 7257-7822; ScopusID:
5641710410, e-mail: leka1551@rambler.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.03.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.05.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 12.06.2024.