Научная статья
УДК 621.791:629.02
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.021

Особенности напряженно-деформированного состояния узлов конструкций с концентрацией напряжений в условиях появления и развития макротрещин

Молоков К.А.[1,2] spektrum011277@gmail.com, **Новиков В.В.**[1] leka230243@gmail.com
[1]Дальневосточный федеральный университет, [2]Владивостокский государственный университет

Аннотация. В статье представлен анализ напряженно-деформированного состояния элементов судовых конструкций при сложной нагрузке и концентрации напряжений. Особое внимание уделено применению зависимости для сдвига в оценке опасного состояния конструкций. В работе предложены новые аналитические модели и зависимости на основе степенной и линейной аппроксимаций диаграмм деформирования, которые позволяют более точно определять истинные напряжения чистого сдвига с учетом пластических деформаций для вершины трещины первого и второго типов.
Полученные аппроксимации по напряжениям сдвига и растяжения для отдельных сталей хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов. Разработан метод преобразования диаграмм одноосного растяжения в диаграммы чистого сдвига, основанный на теории подобия, который показал хорошее согласование с экспериментальными данными. Получены новые аналитические формулы для расчета предела выносливости и коэффициентов интенсивности напряжений для I и II типов трещин. Предложена аналитическая зависимость для построения критических поверхностей при сложной нагрузке, позволяющая выполнить быструю оценку критических касательных и нормальных напряжений от внешней нагрузки при совместном их действии по стандартным механическим характеристикам и коэффициенту степенного упрочнения материала.
Направление исследования представляется важным для развития и совершенствования методов расчета прочности, поскольку дает возможность повысить точность прогнозирования прочностных характеристик элементов корпусных конструкций, находящихся в условиях действия сложной нагрузки.
Ключевые слова: корпус судна, длина трещины, предел выносливости, КИН, метод сечений, сложное нагружение, напряженно-деформированное состояние, касательные напряжения, диаграмма деформирования, чистый сдвиг, теория подобия, формула Гриффитса
Благодарности: Приносим благодарность департаментам промышленной безопасности, морской техники и транспорта политехнического института ДВФУ за помощь в работе
Для цитирования: Молоков К.А., Новиков В.В. Особенности напряженно-деформированного состояния узлов конструкций с концентрацией напряжений в условиях появления и развития макротрещин. Морские интеллектуальные технологии. 2026. № 3 часть 2, С. 183—193. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.021

Original article
DOI: https://doi.org/10.37220/MIT.2026.73.3.021

Features of the stress-strain state of structural nodes with stress concentration under conditions of the appearance and development of macrocracks

Konstantin A. Molokov[1,2] spektrum011277@gmail.com, **Valery V. Novikov**[1] leka230243@gmail.com
[1]Far Eastern Federal University (FEFU), Russian Federation; [2]Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation

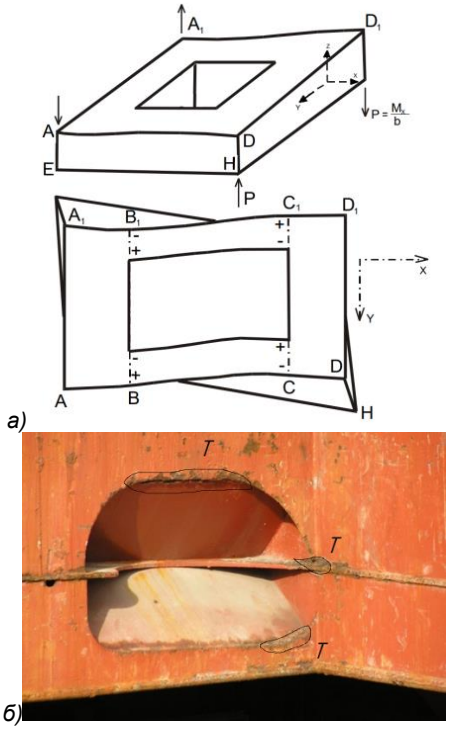
Abstract. This article presents an analysis of the stress-strain state of ship structural elements under complex loading and stress concentration. Particular attention is paid to the application of shear relationships in assessing the hazardous state of structures. New analytical models and relationships based on power-law and linear approximations of stress-strain diagrams are proposed. These allow for a more accurate determination of true pure shear stresses, taking into account plastic deformations at the crack tips of types I and II.
The obtained approximations for shear and tensile stresses for individual steels are in good agreement with experimental data from other authors. A method for converting uniaxial tensile diagrams into pure shear diagrams, based on similarity theory, has been developed and has demonstrated good agreement with experimental data. New analytical formulas are derived for calculating the fatigue limit and stress intensity factors for types I and II cracks. An analytical relationship is proposed for constructing critical surfaces under complex loading, enabling rapid assessment of critical shear and normal stresses from an external load when applied jointly, based on standard mechanical properties and the material's power-hardening coefficient.
This research is important for the development and improvement of strength calculation methods, as it enables more accurate prediction of the strength characteristics of structural elements subjected to complex loading.
Key words: ship hull, crack length, fatigue limit, stress intensity factor, method of sections, complex loading, stress-strain state, shear stresses, stress-strain diagram, pure shear, similarity theory, Griffith’s formula
Acknowledgments: We would like to express our gratitude to the departments of industrial safety, marine engineering and transport of the FEFU Polytechnic Institute for their assistance in the work

© Молоков К.А., Новиков В.В. 2026

Financial Support: The study was carried out as part of the initiative research.
For citation: Konstantin A. Molokov, Valery. V. Novikov Features of the stress-strain state of structural nodes with stress concentration under conditions of the appearance and development of macrocracks. Marine intellectual technologies. 2026. № 3 part 2, P. 183—193. DOI: 10.37220/MIT.2026.73.3.021

Введение

Судовые конструкции часто испытывают сложное напряженно-деформированное состояние из-за наличия зон концентрации напряжений и специфики действующих нагрузок. Резкое изменение кривизны поверхности сварных конструкций и соединений приводит к неравномерному распределению сдвиговых деформаций и напряжений. Ситуация осложняется, когда в составе корпуса судна присутствуют продольные связи с резко изменяющимся поперечным сечением, что вызывает концентрацию жесткости и нормальных напряжений на кромке закругления [1, 2, 3] углов выреза (рис. 1). При этом, чем меньше протяженность закругления, тем больше величина сдвиговых деформаций q_{max}. В составе корпуса судна имеется множество продольных связей, сечение которых по длине резко изменяется. Так, присутствие крутящей нагрузки (рис. 1,а) отсека корпуса с люковым вырезом в палубе провоцировало создание трещины T в принципиально похожей конструкции угла люкового выреза на т/х «Виктория» (рис. 1,,б). Для судов с широким раскрытием палубы это особенно проявляется из-за малой крутильной жесткости корпуса в условиях его скручивания.



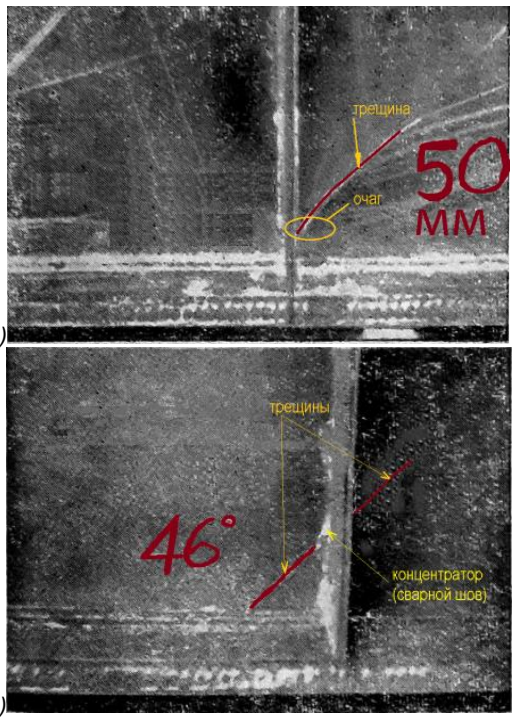
а)

б)

Рис.1. Деформации кручения отсека с люковым вырезом в палубе (а) и трещины T в конструкции угла люкового выреза на т/х «Виктория» (б)

Вопросы усталостной прочности материалов при сложном нагружении рассматривались многими авторами. Среди них выделяются работы, выполненные для нужд машиностроения и кораблестроения [4, 5, 6, 7, 8]. В классическом исследовании [9] были получены зависимости, учитывающие комбинированное воздействие сдвига и отрыва на конструкцию с трещиной. Основной недостаток в большинстве существующих подходов состоит или в их эмпиричном подходе, или в обязательном определении некоторых параметров, которые либо находятся путем сложных экспериментов, или не имеют ясной физической интерпретации в используемых моделях. Указанные особенности не позволяют легко применять данные зависимости в рамках оценочных практических расчетов и инженерной практике для конструкций с трещинами.

Для судовых перекрытий и балочных конструкций, испытывающих действие сложной нагрузки, ситуация осложняется присутствием дополнительной концентрации напряжений в сварных соединениях и швах. При этом зарождение трещин, как правило, происходит в области совместного влияния разных факторов (остаточные сварочные напряжения, геометрический концентратор или область с повышенной жесткостью и др.) и не там, где действуют наибольшие касательные или нормальные напряжения, а – в районе, где их отношение примерно равно единице, (рис. 2, а). Развиваются они обычно в направлении, перпендикулярном первому главному нормальному напряжению, которое, к примеру, для балок с ребром жесткости соответствует углу $45-46°$ (рис. 2, б).



а)

б)

Рис.2. Усталостные трещины в стенке балок у ребер жесткости, приваренных непрерывным швом (а), и прерывистым (б), вызванные концентрацией напряжений и сложной нагрузкой

Таким образом, поперечный изгиб и скручивание прерывистых судовых конструкций создают сложное

напряженно-деформированное состояние с выраженными сдвиговыми деформациями. Это приводит к концентрации как касательных напряжений *(рис.3* ,а) так и нормальных *(рис.3* ,б) и потенциальному образованию трещин. Отмеченное особенно характерно для машиностроительных деталей и сварных соединений с отверстиями, галтелями и выступами, часто подверженных преждевременному разрушению при наличии дефектов и циклическом нагружении. У концов прерывной части на участке ее закругления возникшая неравномерность в распределении касательных усилий q_x образует некоторую концентрацию жесткости *рис.3,* а и в конечном итоге – концентрацию нормальных напряжений на кромке закругления [2]

Всё это подводит к тому, что для задач определения нормативных разрушающих напряжений [10] существенную роль играет учет сложного нагружения, наличия трещин, механических характеристик материала сварных соединений, и ввод двухпараметрических критериев [11, 12].

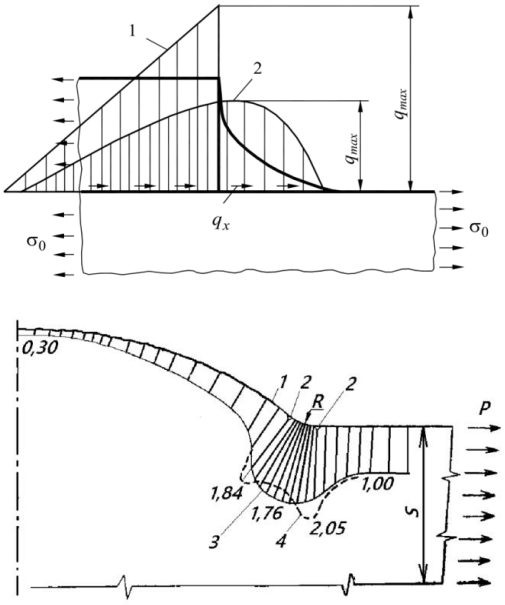


Рис.3. Распределение касательных усилий в районе примыкания конца прерывной части к непрерывной: 1- касательные усилия для прерывной части без закругления ее притыканий к непрерывной; 2- касательные усилия в случае, когда прерывная часть имеет по концам закругление, и распределение напряжений по контуру сварного стыкового соединения с радиусом перехода R от основного металла: 1 - контур сварного шва; 2 - контур дефектного участка; 3 - распределение напряжений для соединения без дефектов; 4 - распределение напряжений для шва с дефектом

Для оценки трещиностойкости и разрушения материала необходимо учитывать гетерогенность сварных соединений [13], численный расчет при которой возможен, если использованы численные фактические механические характеристики в локальной области [14]. Поэтому разрабатывать расчетные модели необходимо с тем условием, чтобы они базировались на известных характеристиках материала для области концентрации.

В зоне концентратора возникают пластические деформации. При сложном нагружении касательные напряжения могут придавать им значительную величину, влияющую на надежность элемента. Эти деформации изменяют остаточную пластичность материала в окрестности вершины трещины. Как следствие, снижается уровень напряжений, необходимый для дальнейшего распространения трещины [15]. Для околокритических трещин нормального отрыва было показано, что определяющее влияние на этот процесс начинает оказывать коэффициент упрочнения [16]. Все перечисленные факторы обусловливают необходимость применения моделей деформирования, учитывающих упрочнение материала. Использование диаграмм растяжения или чистого сдвига позволяет достоверно определять истинные напряжения и деформации в условиях сложного напряженного состояния.

Таким образом, как качественный, так и количественный анализ и разработка моделей для оценки напряженно-деформированного состояния, остаточного ресурса и прочности подобных конструкций остаются актуальными и важными задачами для обеспечения прочности и долговечности в условиях появления и развития макротрещин.

1. Аналитические исследования и результаты получения диаграмм чистого сдвига

В зоне концентрации происходит уменьшение напряжений по мере удаления от концентратора в соответствии с некоторым законом затухания. Установлено, что чем выше максимальные напряжения у вершины концентратора, тем быстрее происходит их затухание. Однако в зоне концентратора могут возникать пластические деформации, что требует (для определения истинных напряжений или деформаций) использование соответствующих диаграмм растяжения или чистого сдвига [17].

Теоретический коэффициент концентрации напряжений α_τ зависит от размеров рабочего сечения, а также от геометрической формы и размера концентратора. Он может быть определен с высокой степенью точности методами конечно-элементного анализа для сварного соединения или детали с концентратором, при условии известных формы и геометрических размеров. При приложении сдвиговой нагрузки возникающие касательные напряжения от действия остаточных сварочных напряжений (ОСН) могут достигать значительных величин в условиях усталости в зоне действия ОСН и концентратора напряжений [18, 19]. Это приводит к образованию локальной зоны пластической деформации в окрестности концентратора, в то время, как остальная часть детали может оставаться в упругой стадии ($\sigma_H < \sigma_{0,2}$).

Таким образом, для правильной оценки влияния напряжений сдвига в вершинах концентратора необходимо найти достаточно простое преобразование истинных диаграмм растяжения к диаграммам чистого сдвига. Это решение представляется более рациональным, так как проведение экспериментов обычно трудоемко и

затратно по времени даже для получения дополнительных механических характеристик материала.

Аналитический подход, основанный на зависимости Рамберга-Осгуда, позволяет аппроксимировать полную диаграмму растяжения и преобразовывать её в диаграмму чистого сдвига. В работе [17] рассматривается следующая зависимость для полной диаграммы растяжения:

$$e_i = \left(\frac{\sigma_i}{E}\right) + \varepsilon_T \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2}}\right)^{\frac{1}{m}+1}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, МПа; m – коэффициент степенного упрочнения стали; σ_i – истинные напряжения, МПа; $\sigma_{0,2}$ – стандартное значение предела текучести, МПа; ε_T – деформация стандартного предела текучести на базе 0,2% остаточной деформации, $\varepsilon_T = 0{,}002$; e_i – истинная деформация образца при растяжении, доли.

На основе четвертой энергетической теории прочности была получена следующая связь ($\gamma_i - \tau_i$) при чистом сдвиге с сопоставлением её с экспериментальной кривой:

$$\gamma_i = \left(\frac{\tau_i}{G}\right) + \cdot\sqrt{3}\varepsilon_T \cdot \left(\frac{\sqrt{3}\cdot\tau_i}{\sigma_{0,2}}\right)^{\frac{1}{m}+1}, \quad (2)$$

где τ_i – истинные напряжения чистого сдвига, МПа; γ_i – истинная деформация сдвига, доли; G – модуль сдвига, МПа. Результаты согласования этой зависимости на стали 15Х2ГМФ показали хорошее совпадение (до 7%) на участке деформаций от 0 до 0,04.

2. О подобии диаграмм одноосного растяжения и чистого сдвига

Критерии подобия в технике известны и применяются для прогнозирования поведения материала в изделии по данным испытаний лабораторных образцов с использованием теории подобия [20, 21]. Анализируя уравнение (2), можно заметить, что деформации относительно зависимости (1) проходят через новую точку γ_i^*, смещенную примерно на $\sqrt{3}$ вправо. При этом напряжения соответствующей точки уменьшаются в $\sqrt{3}$ раза и составляют ~ τ_i^* (рис. 4). Численный эксперимент показывает, что для всех остальных точек диаграммы соблюдаются аналогичные соотношения подобия.

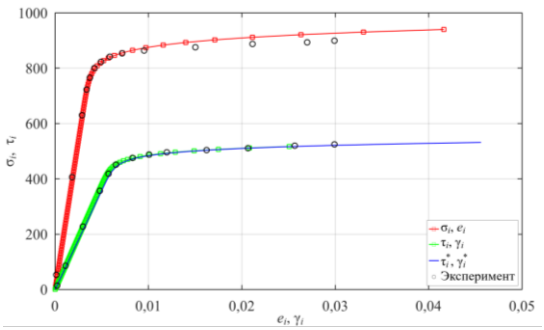


Рис.4. Истинные диаграммы одноосного растяжения и чистого сдвига полученные по (1) и (2) соответственно, и диаграмма ($\tau_i^* - \gamma_i^*$) чистого сдвига полученная подобием. Маркер ○ – экспериментальные данные [17]

Таким образом, для диаграммы чистого сдвига наблюдается графическое подобие диаграмме одноосного растяжения. Подобие по напряжениям выполняется более строго, чем по деформациям, так как диаграмма по оси деформаций получается вытянутой, и последнее значение деформаций оказывается в $\sqrt{3}$ раза больше. Однако в принятых осях координат это не вызывает значительной погрешности преобразования диаграммы одноосного растяжения к диаграмме чистого сдвига методами подобия (см. рис. 4). На рис. 4 для сравнения приведены экспериментальные точки, снятые с аппроксимированных диаграмм растяжения и чистого сдвига стали 15Х2ГМФ по данным работы [17].

Визуально заметно, что кривые, полученные по формуле (2) и методом подобия, имеют отличия, которые более заметны в области перехода в пластическую стадию деформирования и менее заметны для больших пластических деформаций. Это вызвано различиями в модулях сдвига и упругости при чистом сдвиге и одноосном

растяжении, что вносит рассогласование в простое подобие в $\sqrt{3}$ по напряжениям и деформациям.

Численные расчеты для стали 15Х2ГМФ показывают, что относительная погрешность построения диаграммы методом подобия для чистого сдвига не превышает $5-7\%$ от экспериментальных и полученных по формуле (2) значений, соответственно.

3. Анализ концентрации напряжений чистого сдвига

Сварные соединения и конструкции с геометрическими неоднородностями, такими как трещины, подвержены неравномерному распределению касательных напряжений, особенно при нагружении чистым сдвигом. Это приводит к концентрации напряжений, что может вызвать раннее разрушение материалов. В современной механике разрушения и материаловедении актуальность исследования истинных напряжений чистого сдвига трудно переоценить. Учет этих напряжений позволяет более точно определять эффективный коэффициент интенсивности напряжений, который зависит от коэффициентов K_I и K_{II}, характеризующих механизмы отрыва и сдвига, соответственно, для вершины трещины.

Истинные напряжения чистого сдвига являются фундаментальными для анализа концентраторов напряжений, где локальные напряжения могут значительно превышать средние значения, приводя к раннему разрушению. В таких зонах концентрации напряжений, например, вблизи отверстий, вырезов или трещин, напряжения сдвига могут стать критическими. Их точное определение позволяет оптимизировать конструкции, увеличивая их долговечность и надежность.

Одним из основных подходов к определению истинных напряжений является использование решений упругих задач. В упругой задаче напряжения определяются через теоретический коэффициент концентрации напряжений K_I, который зависит от геометрии и материала конструкции. Этот коэффициент может быть определен как для нормальных, так и для касательных напряжений. Для

нормальных напряжений теоретический коэффициент концентрации можно записать как:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H}, \quad (3)$$

где σ_{max} максимальное нормальное напряжение в зоне концентрации, а σ_H – номинальное нормальное напряжение внешней нагрузки.

Для касательных напряжений теоретический коэффициент концентрации $\alpha\tau$ определяется аналогично:

$$\alpha_\tau = \frac{\tau_{max}}{\tau_H}, \quad (4)$$

где τ_{max}максимальное касательное напряжение в зоне концентрации, а τ_H – номинальное касательное напряжение внешней нагрузки.

Однако для более точного анализа необходимо учитывать не только максимальные напряжения, но и их распределение в зоне концентрации. Это требует введения функциональной зависимости, которая позволяет вычислять истинные напряжения чистого сдвига τ_i по известным напряжениям, полученным из решения упругой задачи. Такая зависимость может быть представлена в виде:

$$\tau_i = f(\tau^y, \alpha_\tau), \quad (5)$$

где τ^y – напряжения, полученные из упругого решения $\tau^y = \alpha_\tau \cdot \tau_H$, а f – некоторая функция, учитывающая особенности материала и геометрии конструкции.

В механике разрушения эффективный коэффициент интенсивности напряжений K_e является важным параметром, характеризующим интенсивность напряженного состояния вблизи концентраторов напряжений, таких как трещины. При смешанном нагружении, когда действуют как нормальные, так и касательные напряжения, K_e зависит от коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{II}, соответствующих механизмам отрыва и сдвига.

Эффективный коэффициент интенсивности напряжений K_e можно определить с использованием следующей формулы:

$$K_e = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}. \quad (6)$$

Эта формула учитывает вклад обоих механизмов разрушения и позволяет оценить общую интенсивность напряженного состояния вблизи концентратора.

Коэффициент интенсивности напряжений K_I, характеризующий механизм отрыва, определяется как:

$$K_I = \sigma_H \sqrt{\pi l} \cdot Y_I, \quad (7)$$

где σ_H – приложенное нормальное напряжение, l – характерный размер трещины (например, её длина), а Y_I – безразмерный параметр, зависящий от геометрии конструкции и типа нагружения. В этом режиме напряжения действуют перпендикулярно плоскости трещины, стремясь её раскрыть.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{II}, характеризующий механизм плоского сдвига, определяется аналогично. Однако из-за больших деформаций сдвига требуется определять напряжения сдвига с учетом пластических деформаций сдвига и напряженно-деформированного состояния в вершине трещины. Это связано с тем, что в реальных условиях при острых концентраторах материалы могут испытывать значительные пластические деформации сдвига, которые необходимо учитывать для точного анализа.

4. Получение упругопластического решения для чистого сдвига

В данном случае будем говорить о плоском сдвиге для трещины или трещиноподобного концентратора, где напряжения сдвига действуют в плоскости берегов трещины, вызывая их скольжение в направлении поперек фронта трещины. Практическое исследование разрушения, связанное с поперечным сдвигом (тип II для трещины), развито пока недостаточно. Отсутствие интереса, по-видимому, связано с мнением, что параметр трещиностойкости K_{IIc} настолько больше величины K_{Ic} для данного материала, что изотропные материалы не будут разрушаться по типу II. Однако исследователи Джонс и Чисхолм показали [22], что это неверно для пластин из алюминия, а также для ряда других конструкционных материалов, в частности, аустенитных сталей. Данное исследование вызвано в основном интересом к изучению разрушения по типу II:

$$K_{II} = \tau_H \cdot \sqrt{\pi l} \cdot Y_{II}, \quad (8)$$

где τ_H – приложенное касательное напряжение внешней нагрузки; Y_{II} – безразмерный параметр, аналогичный Y_I, но для механизма сдвига для вершины трещины.

Таким образом, знание и учет истинных напряжений чистого сдвига позволяет более точно определять параметры K_I и K_{II}, что, в свою очередь, необходимо для вычисления эффективного коэффициента интенсивности напряжений K_e. Это особенно важно для прогнозирования поведения материалов и конструкций при сложных нагрузочных состояниях, что позволяет оптимизировать их прочность и долговечность.

Для нахождения истинных напряжений чистого сдвига τ_i будем учитывать пластические деформации, которые возникают в реальных условиях. В данном случае напряжения сдвига действуют в плоскости берегов трещины, вызывая их скольжение в направлении поперек фронта трещины.

На основе деформационной теории пластичности, для которой справедливы соотношения $\tau_i = \tau_i^y (G_s/G)^{1/2}$ и $\gamma_i = \gamma_i^y (G/G_s)^{1/2}$, а также аппроксимирующая зависимость в форме (2), получаем упругопластическое решение задачи для касательных напряжений при чистом сдвиге:

$$\tau_i = \left(\frac{\sigma_{0,2}^{\left(1+\frac{1}{m}\right)} (\tau^y)^2}{G\varepsilon_{0,2} \cdot 3^{\left(1+\frac{1}{2m}\right)}} \right)^{\frac{m}{2m+1}}, \quad (9)$$

где τ^y – касательные напряжения из решения упругой задачи; m – показатель степенного упрочнения по истинной диаграмме растяжения; $\varepsilon_{0,2}$ – условная деформация предела текучести, равная константе $0{,}002$; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести стали; G – модуль сдвига. Тогда выражение для деформации сдвига после подстановки (9) в (2) приобретает вид:

$$\gamma_i = \left(\frac{1}{G}\right)\left[\tau^y + \left(\frac{\sigma_{0,2}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)}(\tau^y)^2}{G\varepsilon_{0,2}\,3^{\left(\frac{1}{2m}+1\right)}}\right)^{\frac{m}{2m+1}}\right]. \quad (10)$$

Согласно уравнению (2), напряжения из упругого решения легко выражаются через теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений. Уравнения (9) и (10) можно записать относительно внешних напряжений нагрузки τ_i и деформаций сдвига соответственно, следующим образом:

$$\tau_i = \left(\frac{\sigma_{0,2}^{\left(1+\frac{1}{m}\right)}(\alpha_\tau \tau_H)^2}{G\cdot\varepsilon_{0,2}\cdot 3^{\left(1+\frac{1}{2m}\right)}}\right)^{\frac{m}{2m+1}} \quad (11)$$

и

$$\gamma_i = \left(\frac{1}{G}\right)\left[\alpha_\tau \tau^y + \left(\frac{\sigma_{0,2}^{\left(1+\frac{1}{m}\right)}(\alpha_\tau \tau^y)^2}{\varepsilon_{0,2}\cdot G\cdot 3^{1+\frac{1}{2m}}}\right)^{\frac{m}{2m+1}}\right]. \quad (12)$$

Согласно (12)зависимость между деформациями чистого сдвига и истинными напряжениями τ_i сдвига через известные коэффициенты G, m и предел текучести образца на разрыв будет выражаться формулой:

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G} + \tau_i \cdot \sqrt{\frac{3\varepsilon_{0,2}\left(\tau_i\cdot\sqrt{3}\right)^{\frac{1}{m}}}{G\cdot\sigma_{0,2}^{1+\frac{1}{m}}}}. \quad (13)$$

Таким образом, для решения задачи по определению истинных напряжений чистого сдвига по известному упругому решению, следует использовать первую зависимость (11), а для нахождения деформаций – зависимость (12). Отметим также, что подобные зависимости (11)-(13) позволяют по минимальным экспериментальным данным, снимаемым с закручиваемого образца (τ_i, γ_i), вычислять коэффициент степенного упрочнения m диаграммы $S-e$, так как при чистом сдвиге закручиваемого образца сечение практически не изменяется.

Определенный таким образом коэффициент m должен соответствовать достаточной для инженерных расчетов степени точности, так как уравнение (13) обладает необходимой чувствительностью к этому коэффициенту. Для получения хорошего приближения по численным оценкам будет достаточно решить систему из трех уравнений (13) со значениями трех экспериментальных узловых точек $\tau_{1,2,3}; \gamma_{1,2,3}$ в области деформаций сдвига $\sim 0{,}002 - 0{,}04$.

5. Решения для коэффициентов интенсивности напряжений отрыва и чистого поперечного сдвига методом сечений для материалов с упрочнением

Применим метод сечений для сквозной трещины длиной $2l$ в пластине единичной толщины и находящейся в центре ее. Сначала рассмотрим трещину нормального отрыва и поле напряжений интенсивностью $\sigma < \sigma_{0,2}$ на значительном удалении от трещины (рис. 5, а).

Задача по определению коэффициента интенсивности напряжений K_I решается в псевдоплоской постановке методом сечений. Принимается, что толщина пластины (единичная) достаточна для реализации условий плоской деформации, при которой инициируется наиболее опасное состояние для хрупкого разрушения. Материал пластины считается физически однородным, изотропным и идеальным (без пустот). Упрочнение материала при пластическом течении описывается степенным законом.

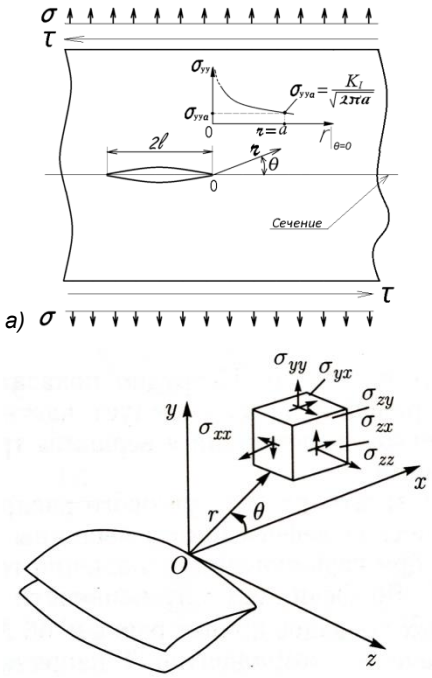


Рис.5. Схема нагружения пластины с трещиной (а), окрестность вершины трещины с проходящим сечением вдоль трещины и система координат с обозначениями компонент (б): r – радиус вектор, a – зона пластичности в сечении

Проведем сечение в плоскости трещины таким образом, чтобы фронты трещины лежали на этой плоскости. Дополнительно условимся, что они прямолинейны и перпендикулярны плоскости поверхности пластины. Тогда внутренняя поверхность трещины должна представлять прямоугольник, одна сторона которого равна единице, а вторая равна $2l$ (см. рис. 5, а, б). Через нее не передается внешнее усилие, которое должно компенсироваться повышением напряжений на фронтах трещины. Оно стремится привести систему к наиболее энергетически выгодному состоянию равновесия – увеличению внутренних сил на фронтах трещины. В таком случае можно составить условие равновесия внутренних и внешних сил, действующих в сечении. Составим условие равновесия непередаваемых сил через сечение трещины и возмущенных усилий в окрестности вершины трещины (рис. 5, б). При этом учтем асимптотическое выражение для напряжений в полярной системе координат [12, 9] и положим, что $K_{II} = K_{III} = 0$; тогда искомая компонента σ_{yy} (рис. 5, б) выразится зависимостью:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right), \quad (14)$$

где K_I, K_{II}, K_{III} – коэффициент интенсивности

напряжений нормального отрыва, поперечного и продольного сдвига, соответственно; θ – угол радиус вектора в полярной системе координат. Ввиду объемности напряженного состояния в вершине трещины вклад несингулярных «Т» составляющих напряжений будем учитывать через коэффициент перенапряжения D, равный отношению интенсивности напряжений для вершины трещины к первому главному напряжению σ_i/σ_1. В принятой схеме расчета сечение, проходящее через трещину, образует угол $\theta = 0$ с плоскостью XOZ; в этом случае зависимость (14) преобразуется к виду $\sigma_{yy} = K_1/\sqrt{2\pi r}$, а дополнительные усилия, возникающие в сечении окрестности вершины трещины, могут быть представлены интегральным выражением:

$$\int_0^a \sigma_{yy} dr,$$

где граница a должна определяться из условия равенства $\sigma_{yy} = \sigma_н$. Здесь $\sigma_н \approx \sigma$ – интенсивность внешнего поля напряжений, которая при размерах пластины, много превышающей l_c и при $\sigma \le \sigma_{0,2}$ практически равна номинальным напряжениям. Асимптотическая зависимость для выражения границы a в виде $a = K_I^2/(2\sigma_н^2\pi)$, позволяет найти границу при равенстве $\sigma_н = \sigma$. Номинальные напряжения при этом примем $\sigma_н = \sigma_{0,2}$.

Для решения задачи в упругопластической постановке с упрочнением материала необходимо использовать известную взаимосвязь интенсивности истинных напряжений σ_i и напряжений, полученных при решении упругой задачи для трещины нормального отрыва:

$$\sigma_i = \sigma_{0,2}^{\left(\frac{1-m'}{1-m'}\right)} \cdot \sigma_{yy}^{[2m'/(m'+1)]}, \quad (15)$$

где $m' = m/2$; m – коэффициент степенного упрочнения по истинной диаграмме упрочнения при одноосном растяжении. Для трещин II типа следует использовать полученное выражение (9).

По своей сути, если $\sigma_н = \sigma_{0,2}$, σ_i будут представлять упругие значения напряжений около вершины трещины в сечении для материала, находящегося далеко за упругим состоянием. С некоторой погрешностью размер пластической зоны a в сечении определяется значениями интенсивности напряжений $\sigma_i = \sigma_{0,2}$. Тогда условие равновесия усилий можно записать следующим образом:

$$1 \times 2l \cdot \sigma_H = 1 \times 2 \cdot \frac{1}{D} \int_0^a \sigma_i dr,$$

где для плоской деформации $D = (1+m)(1-2\mu)/2$ при неизменных коэффициентах Пуассона и степенного упрочнения, постоянных для стали; r – радиус вектор от вершины трещины до рассматриваемой точки при $\theta = 0$.

Если считать, что сложное напряжённое состояния (СНС) при плоской деформации в вершине трещины не изменяет интегрального усилия в рассчитываемом направлении, то можно получить взаимосвязь K_I со всеми механическими характеристиками, от которых зависит m:

$$K_I' = p^* \frac{\sqrt{2\pi l}\,(2\mu - 1 - \sqrt{D})}{2(2\mu-1)\sqrt{m+1}} \sigma_H^{\frac{m+3}{2m+2}} \sigma_{0,2}^{\frac{m^2-1}{2}}, \quad (16)$$

где p^* – некоторая поправка, вызванная всякого рода указанными выше допущениями. Данная поправка для феррито-перлитных сталей, пределенная по ряду экспериментальных данных, незначительно варьируется от стали к стали, т.е. достаточно стабильна, а D зависит только он m и μ. Если исключить l, используя основную зависимость Гриффитса (7), а также положив $\sigma_H = \sigma_{0,2}$, сделав подстановки m в степенях и округляя, то можно записать максимально простую формулу для расчета предела выносливости симметричного цикла нагружения:

$$\sigma'_{-1} = p^* \frac{\sqrt{2}\,(2\mu - 1 - \sqrt{D})}{2(2\mu-1)\sqrt{m+1}} \sigma_H^{\frac{m+3}{2m+2}} \sigma_{0,2}^{\frac{m^2-1}{2}}; \quad \sigma'_{-1} = p^* \frac{\sigma_{0,2}}{\sqrt{m+1}}, \quad (17)$$

где p^* – подобранная поправка по известным данным пределов выносливости для группы малоуглеродистых феррито-перлитных сталей. Она составляет значение – $0{,}769$ ближе к нижней границе (с запасом прочности).

Результаты численной проверки показывают, что погрешность расчета K_{Ic} по (16) при известной длине трещины находится в пределах 3-5% для корпусных сталей обычной и средней прочности. Длину критической трещины l_c на основе зависимостей (16) и (17), можнолегко найти из основного уравнения Гриффитса, если подставить вычисленную «константу» материала σ'_{-1} и решить уравнение

$$K'_{1c}(l_c) = \sigma'_{-1}\sqrt{\pi l_c}. \quad (18)$$

Однако последнее для оценки l_c неприемлемо, так как сильно чувствительно к значению σ'_{-1} в функции $K'_{1c}(l_c)$, которое не является в прямом смысле константой. Длина l_c существенно зависит от σ'_{-1} в (18).

Аналогично рассмотрим метод сечений для пластины с трещиной типа II, находящейся под одной чистой внешней нагрузкой τ_H (см. рис. 5, а). Касательные упругие напряжения, непередаваемые через половину трещины, составят $1 \times l \cdot \tau_H$, а решение упругой задачи о касательных напряжениях вдоль тещины дает равенство $\tau^y_{\theta=0} = K_{II}/\sqrt{2\pi r}$. Подставляя последнее в зависимость в (9) и составляя баланс сил для половины длины трещины, получим уравнение:

$$1 \times l \cdot \tau_H = \int_0^a \tau_i dr, \quad (19)$$

где $a = K_{II}^2/(2\pi\tau_{0,2}^2)$ – зона пластичности (условно на продолжении развития трещины); τ_i – интенсивность истинных касательных напряжений по сечению (см. рис., а).

Далее, решая аналитически уравнение (19) относительно K_{II}, получим:

$$K_{II} = \sqrt{2\pi l\sqrt{3}\tau_H \tau_{0,2}^{\frac{2m+2}{2m+1}} \cdot (Ge_{0,2})^{\frac{m}{2m+1}}} \times \sqrt{\sigma_{0,2}^{-\frac{m+1}{2m+1}} \cdot \frac{m+1}{2m+1}}, \quad (20)$$

где G – модуль сдвига, который можно найти по формуле $G = E/2/(1+\mu)$; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести при одноосном растяжении; $\tau_{0,2}$ – условный предел текучести при чистом сдвиге; $e_{0,2}$ – остаточная деформация равная пределу текучести

при одноосном растяжении 0,002. Рассчитать K_{II} в зависимости от l для напряжений нагрузки $\tau_H = \tau_{-1} \approx 0{,}58\sigma'_{-1}$ легко подстановкой $\tau_{0,2} = 0{,}58\sigma_{0,2}$ при пластичности Мизеса, при этом должно выполняться следующее равенство [8]

$$\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{0,2}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_H}{\tau_{0,2}}\right)^2 = 1, \qquad (21)$$

которое для линии продолжения трещины будет справедливо как для K_{II}, так и при совместном действии с K_I. В нотациях коэффициентов интенсивности напряжений и пределов выносливости при коэффициенте запаса 1, можно записать

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^2 = 1;\ \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_H}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1, \qquad (22)$$

или

$$\left(\frac{\sigma_H}{\sigma'_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_H}{0{,}58\sigma'_{-1}}\right)^2 = 1, \qquad (23)$$

где K_{Ic} и K_{IIc} – значения для одной длины трещины. Они связаны с развившейся критической трещиной, которая не может иметь две длины в конкретный момент времени. Подставив предел выносливости из (17) в (22) можно, найти нормальные и касательные нагрузки при совместном их действии. В качестве расчетной схемы принято допущение о том, что критическая длина трещины L_c соответствует условиям нормального отрыва, и она меньше, чем при совместном действии σ_H и τ_H. Это обосновано тем, что касательные напряжения не вызывают хрупкого разрушения, а исходная глубина трещины определена инструментально (при визуальном и измерительном контроле (ВИК) или ультразвуковом). Принятое допущение идет в запас прочности при последующей оценке совместного действия нормальных и касательных напряжений, а условие разрушения запишется в виде:

$$\left(\frac{\sigma_H\sqrt{\pi l_c}}{\sigma'_{-1}\sqrt{\pi L_c}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_H\sqrt{\pi l_c}}{0{,}58\sigma'_{-1}\sqrt{\pi L_c}}\right)^2 = 1. \qquad (24)$$

В действительности, если положить $K_{IIc} = K_{Ic}$, то можно показать, что длина критической трещины примерно в 3 раза больше, чем ее длина при нормальном отрыве для условий плоской деформации. Таким образом, для каждой пары совместно действующих внешних напряжений τ_H и σ_H, могут быть построены критические поверхности разрушения, соответствующие уравнению (24). Для более точного построения лучше использовать зависимость (17). Предложенный подход базируется на новых аналитических зависимостях, включающих стандартные справочные механические характеристики материалов. Дополнительным параметром является коэффициент m, для вычисления которого используются известные полуэмпирические зависимости, приведенные в цитируемых работах [23, 24] и др. Длину L_c можно найти, если составить уравнение баланса сил в методе сечений для трещины и найти выражение K_{Ic}^{lh} для материала с линейным упрочнением; тогда длину критической трещины нормального отрыва можно получить из (7):

$$L_c = \left(K_{Ic}^{lh}/\sigma'_{-1}\right)^2/\pi \cong \frac{\left(k^{lh}/p^*\right)^2}{(m+1)\pi}\left(\frac{e_{кр}^{m+1}}{\sigma_{0,2}}\right)^2, \qquad (25)$$

где k^{lh} – коэффициент постоянный для группы сталей (термообработки), подобранный для наилучшего схождения с экспериментальными значениями K_{Ic}, для судостроительных малоуглеродистых сталей $k^{lh} = 92{,}4$; p^* – определен в формуле (17); $e_{кр}$ – критическая пластическая деформация материала при разрушении, остальные обозначения те же.

Полученные аналитические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов для судостроительных сталей, что подтверждает их достоверность и надежность для малоуглеродистых феррито-перлитных сталей.

Предложенные аналитические зависимости и метод подобия создают основу для перехода от качественного анализа концентрации напряжений к количественным инженерным расчетам. Эти расчеты базируются исключительно на известных стандартных механических характеристиках стали, что делает их доступными для широкого применения. В результате появляется возможность достоверно оценивать прочность и долговечность элементов корпуса судна, что в конечном итоге способствует повышению надежности конструкций в целом.

Заключение

Представленный анализ напряженно-деформированного состояния элементов судовых конструкций при сложной нагрузке и концентрации напряжений показал практическую значимость полученных зависимостей. В работе предложены новые аналитические модели и зависимости на основе степенной и линейной аппроксимаций диаграмм деформирования, которые позволяют более точно определять истинные напряжения чистого сдвига с учетом пластических деформаций для вершины трещины первого и второго типов.

Результатом исследования является развитие аналитического подхода к оценке трещиностойкости и прочности конструкций, который базируется на фундаментальных механических характеристиках материала и учитывает пластические деформации. Ключевое внимание уделено параметрам чистого сдвига, поскольку именно сдвиговые деформации играют определяющую роль в процессе разрушения при сложном напряженном состоянии. В ходе исследования обоснован метод преобразования стандартных диаграмм одноосного растяжения в диаграммы чистого сдвига, основанный на теории подобия и степенной аппроксимации. Установлено, что диаграмма сдвига может быть получена путем масштабирования диаграммы растяжения с коэффициентом ~$\sqrt{3}$. Это позволяет инженеру, располагая только результатами стандартных испытаний на растяжение (предел текучести, модуль упругости, коэффициент упрочнения), с достаточной точностью прогнозировать поведение материала при чистом сдвиге, избегая трудоемких экспериментов.

Опираясь на установленное подобие, предложены упругопластические решения для определения истинных касательных напряжений и деформаций сдвига в вершине трещины или концентратора. Полученные аналитические зависимости учитывают пластические деформации и степенное упрочнение материала, что представляется особенно важным для корректной оценки реальной несущей способности конструкции. Они связывают локальные напряжения

непосредственно у дефекта с внешними нагрузками и геометрией концентратора, позволяя перейти от упрощенных упругих оценок к более точным, отражающим реальную картину деформирования материала в опасной зоне. С инженерной точки зрения, представляется важным создание простого и эффективного инструментария: расчетчик, оперируя ограниченным набором справочных данных (стандартные механические характеристики стали и геометрические параметры дефекта), может оценивать не только номинальную прочность, но и локальное напряженно-деформированное состояние в опасной зоне с учетом пластических деформаций.

Дальнейшее развитие методологии нашло отражение в получении новых аналитических выражений для коэффициентов интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва и поперечного сдвига. С использованием метода сечений выведены формулы, которые в отличие от классических упругих решений, учитывают упрочнение материала и стандартные механические характеристики. Это повышает точность прогнозирования роста трещины и позволяет более обоснованно подходить к оценке долговечности конструкции. На основе полученных выражений предложена формула для построения критических поверхностей разрушения при совместном действии нормальных и касательных напряжений. Данная зависимость адаптирована для инженерного использования: она позволяет по известным значениям предела выносливости при отрыве и критической длины трещины выполнить быструю и достоверную оценку опасных комбинаций внешних нагрузок τ_H и σ_H. Это особенно востребовано при экспертизе поврежденных конструкций и назначении безопасных режимов эксплуатации или прогнозирования остаточного ресурса.

Литература

1. Шиманский Ю.А. Проектирование прерывистых связей судового корпуса. - Л.: Судпромгиз, 1949. - 160 с.
2. Бойцов Г.В. Практическая методика определения коэффициентов концентрации напряжений в прерывистых связях. - Л.: Судостроение, 1967. №10.
3. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
4. Мюнзе В.Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций. - М.: Машиностроение, 1968. - 312 с.
5. Павлов ПА. Основы инженерных расчетов машин на усталость и длительную прочность. - Л.: Машиностроение, 1988. - 252 с.
6. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин. / отв. ред. Н.А. Махутов. - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2008. - 576 с.
7. Хажинский Г.М. Деформирование. Разрушение. Надежность: Задачи деформирования и разрушения стали. Методы оценки прочности энергетического оборудования и трубопроводов. -М.: ЛЕНАНД, 2014. - 544 с.
8. Олейник Н.В. Несущая способность элементов конструкций при циклическом нагружении. — Киев : Наукова думка, 1985. — 238 с.
9. Черепанов Г.П. Механика разрушения. Регулярная и хаотическая динамика. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 872 с.
10. Крыжевич Г.Б. Методический подход к назначению нормативных разрушающих напряжений для численных расчетов прочности узлов конструкций / Г.Б. Крыжевич // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 3-2(65). – С. 19-24.
11. Ключанцев В.С. Уточненная инженерная теория трещин с применением двухпараметрического критерия прочности / В.С. Ключанцев, В.Д. Кургузов, А.В. Шутов // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 72-88. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_3_72. – EDN UTTKVR.
12. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения / Ю.Г. Матвиенко. – Москва: Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2021. – 210 с. – ISBN 978-5-9221-1899-6. – EDN LTCQCJ.
13. Матохин Г.В. Прочность и надежность сварных соединений: Учебное электронное издание / Г.В. Матохин, К.А. Молоков. – Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2019. – 143 с. – ISBN 978-5-7444-4465-5. – EDN KIYCPQ.
14. [14] Молоков, К. А. Оценка трещиностойкости сварных соединений с мягкими прослойками / К. А. Молоков, В. В. Новиков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 308–318. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-308-318.
15. Молоков К.А. Повреждаемость судовых конструкций и основы построения математической модели оценки трещиностойкости конструкционных сталей/ К.А. Молоков, В.В. Новиков, С.В. Антоненко// Труды Крыловского государственного научного центра. – 2022. – № S1. – С.46-54. – DOI 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-46-54. – EDN ABWRWT.
16. Молоков К.А. Оценка остаточной надежности судокорпусных конструкций из феррито-перлитных сталей с макротрещинами по структурным и механическим характеристикам/ К.А. Молоков, В.В. Новиков// Морские интеллектуальные технологии. –2024. –№3-2(65). – С.102-109.
17. Крюков А.А. Описание диаграмм деформирования при одноосном растяжении и чистом сдвиге с единых позиций /А.А. Крюков // Всероссийская научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвящённая памяти профессора П.Ф. Папковича: Тезисы докл, Санкт-Петербург, 20–21 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2024. – С. 53-54.
18. Негода Е.Н. Усталость сварных соединений труб большого диаметра // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2015. – № 4(25). – С.62-74.
19. Молоков К.А., Новиков В.В., Васильченко Н.П. Оценка выносливости элементов конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2018. № 3(36). С.22-36.

20. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 454 с.
21. Джураев А.Х. Расчет КИН для поверхностных трещин методом сечений / А.Х. Джураев, Т.В. Чинь // Естественные и технические науки. – 2007. – № 4(30). – С. 292-293. – EDN JVZJZZ.
22. Либовиц Г., Эфтис Дж., Джонс Д. Некоторые недавние теоритические и экспериментальные исследования по механике разрушения. В кн. «Механика разрушения. Разрушение конструкций». - М.: Мир, 1980. - С.168-178.
23. Молоков К.А., Новиков В.В. К расчёту коэффициента упрочнения для степенной аппроксимации диаграмм деформирования сталей в рамках деформационной теории пластичности // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2025. № 3(64). С. 27–38.
24. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. -М.: Наука, 1985. - 504 с.

References

1. Shimanskiy, Yu.A. Proyektirovaniye preryvistyh svyazey sudovogo korpusa [Design of discontinuous connections of the ship hull]. Leningrad: Sudpromgiz, 1949. 160 p.
2. Boytsov, G.V. Prakticheskaya metodika opredeleniya koeffitsiyentov kontsentratsii napryazheniy v preryvistyh svyazyah [Practical method for determining stress concentration factors in discontinuous connections]. Sudostroyeniye, 1967, no. 10.
3. Kazanov, G.T., Novikov, V.V., & Turmov, G.P. Kontsentratsiya napryazheniy i drugiye osobennosti napryazhennogo sostoyaniya sudovyh korpusnyh konstruktsiy [Stress concentration and other features of the stressed state of ship hull structures]. Vladivostok: DVFu, 2014. 178 p.
4. Myunze, V.H. Ustalostnaya prochost' svarnyh stal'nyh konstruktsiy [Fatigue strength of welded steel structures]. Moscow: Mashinostroeniye, 1968. 312 p.
5. Pavlov, P.A. Osnovy inzhenernyh raschetov mashin na ustalost' i dlitel'nuyu prochost' [Fundamentals of engineering calculations of machines for fatigue and long-term strength]. Leningrad: Mashinostroeniye, 1988. 252 p.
6. Prochnost', resurs, zhivuchest' i bezopasnost' mashin [Strength, resource, survivability and safety of machines]. Ed. by N.A. Makhutov. Moscow: Knizhnyi dom "LIBROKOM", 2008. 576 p.
7. Hazhinskiy, G.M. Deformirovaniye. Razrusheniye. Nadezhnost': Zadachi deformirovaniya i razrusheniya stali. Metody otsenki prochnosti energeticheskogo oborudovaniya i truboprovodov [Deformation. Destruction. Reliability: Problems of deformation and destruction of steel. Methods for assessing the strength of power equipment and pipelines]. Moscow: LENAND, 2014. 544 p.
8. Oleynik, N.V. Nesushchaya sposobnost' elementov konstruktsiy pri tsiklicheskom nagruzhenii [Bearing capacity of structural elements under cyclic loading]. Kiev: Naukova dumka, 1985. 238 p.
9. Cherepanov, G.P. Mekhanika razrusheniya. Regularnaya i khaoticheskaya dinamika [Fracture mechanics. Regular and chaotic dynamics]. Moscow, Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2012. 872 p.
10. Kryzhevich, G.B. Metodicheskiy podkhod k naznacheniyu normativnyh razrushayushchih napryazheniy dlya chislennyh raschetov prochnosti uzlov konstruktsiy [Methodological approach to the appointment of normative destructive stresses for numerical strength calculations of structural nodes]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2024, no. 3-2(65), pp. 19-24.
11. Klyuchantsev, V.S., Kurguzov, V.D., & Shutov, A.V. Utochnennaya inzhenernaya teoriya treshchin s primeneniyem dvuhparametricheskogo kriteriya prochnosti [Refined engineering theory of cracks using a two-parameter strength criterion]. Fizicheskaya mezomekhanika, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 72-88. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_72. EDN UTTKVR.
12. Matvienko, Yu.G. Dvuhparametricheskaya mekhanika razrusheniya [Two-parameter fracture mechanics]. Moscow: Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2021. 210 p. ISBN 978-5-9221-1899-6. EDN LTCQCJ.
13. Matokhin, G.V., & Molokov, K.A. Prochnost' i nadezhnost' svarnyh soedineniy: Uchebnoye elektronnoye izdaniye [Strength and reliability of welded joints]. Vladivostok: Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, 2019. 143 p. ISBN 978-5-7444-4465-5. EDN KIYCPQ.
14. Molokov, K.A., & Novikov, V.V. Otsenka treshchinostoykosti svarnyh soedineniy s myagkimi prosloykami [Evaluation of crack resistance of welded joints with soft interlayers]. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 308-318. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-308-318.
15. Molokov, K.A., Novikov, V.V., & Antonenko, S.V. Povrezhdaemost' sudovyh konstruktsiy i osnovy postroyeniya matematicheskoy modeli otsenki treshchinostoykosti konstruktsionnyh staley [Damageability of ship structures and fundamentals of mathematical model for crack resistance assessment of structural steels]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2022, no. S1, pp. 46-54. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-46-54. EDN ABWRWT.
16. Molokov, K.A., & Novikov, V.V. Otsenka ostatochnoy nadezhnosti sudokorpusnyh konstruktsiy iz ferrito-perlitnyh staley s makrotreshchinami po strukturnym i mekhanicheskim kharakteristikam [Assessment of residual reliability of ship hull structures made of ferrite-pearlite steels with macrocracks based on structural and mechanical characteristics]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2024, no. 3-2(65), pp. 102-109.
17. Kryukov, A.A. Opisaniye diagram deformirovaniya pri odnoosnom rastyazhenii i chistom sdvige s yedinyh pozitsiy [Description of deformation diagrams in uniaxial tension and pure shear from a unified position]. Proc. All-Russian Scientific and Technical Conference on Structural Mechanics of Ships, dedicated to the memory of Professor P.F. Papkovich: Abstracts. St. Petersburg, 20-21 December 2024. St. Petersburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2024, pp. 53-54.
18. Negoda, E.N. Ustalost' svarnyh soedineniy trub bol'shogo diametra [Fatigue of welded joints of large diameter pipes]. Vestnik inzhenernoy shkoly DVFu, 2015, no. 4(25), pp. 62-74.

19. Molokov, K.A., Novikov, V.V., & Vasil'chenko, N.P. Otsenka vynoslivosti elementov konstruktsiy s mikrotreshchinami i ostatochnymi svarochnymi napryazheniyami [Assessment of endurance of structural elements with microcracks and residual welding stresses]. Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2018, no. 3(36), pp. 22-36.
20. Ivanova, V.S., & Terent'ev, V.F. Priroda ustalosti metallov [Nature of metal fatigue]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 454 p.
21. Djuraev, A.H., & Chin', T.V. Raschet KIN dlya poverhnostnyh treshchin metodom secheniy [Calculation of SIF for surface cracks by the section method]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 2007, no. 4(30), pp. 292-293. EDN JVZJZZ.
22. Libovits, G., Eftis, D., & Dzhons, D. Nekotorye nedavniye teoreticheskiye i eksperimental'nye issledovaniya po mekhanike razrusheniya [Some recent theoretical and experimental studies on fracture mechanics]. In Mekhanika razrusheniya. Razrusheniye konstruktsiy. Moscow: Mir, 1980, pp. 168-178.
23. Molokov, K.A., & Novikov, V.V. K raschetu koeffitsiyenta uprochneniya dlya stepennoy approksimatsii diagram deformirovaniya staley v ramkah deformatsionnoy teorii plastichnosti [On the calculation of the hardening coefficient for power approximation of steel deformation diagrams within the framework of the deformation theory of plasticity]. Vestnik Inzhenernoy shkoly DVFu, 2025, no. 3(64), pp. 27-38.
24. Parton, V.Z., & Morozov, E.M. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya [Mechanics of elastoplastic fracture]. Moscow: Nauka, 1985. 504 p.

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), Associate 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), Associate 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 11.04.2026.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.05.2026.
Принята к публикации/accepted for publication 20.06.2026.