

Научная статья  
УДК 621.791:629.02

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.69.3.014>

## Критерий оценки образования начальных макротрещин в корпусных конструкциях с трещиноподобными дефектами или концентраторами напряжений

Молоков К.А.<sup>1,2</sup> [spektrum011277@gmail.com](mailto:spektrum011277@gmail.com), Новиков В.В.<sup>1</sup> [leka230243@gmail.com](mailto:leka230243@gmail.com)

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ),

<sup>2</sup>Владивостокский государственный университет (ВВГУ)

**Аннотация.** Изучается воздействие концентраторов напряжений, аналогичных трещинам, возникшим из-за конструктивных особенностей элементов или - в процессе сварки. На основе билинейной модели деформирования разработан критерий, определяющий предельное состояние и надежность металлоконструкций с учетом вероятности развития повреждений. Особое внимание уделено глубоким концентраторам (дефектам) со сложным, трехмерным напряженным состоянием возле их вершин. Полученные результаты демонстрируют значительное влияние трехмерности напряженного поля на критический коэффициент концентрации напряжений в вершинах подобных концентраторов или дефектов.

Проведены численные исследования, результаты которых сопоставлены с имеющимися данными других авторов о зависимости критического коэффициента концентрации напряжений от механических свойств материала и его геометрических параметров. Выполнены точечные расчеты допустимой нагрузки и теоретического коэффициента концентрации напряжений, которые получены с учетом разработанного критерия предельного состояния для очагов концентраторов. Расчетные данные качественно подтвердили, что при превышении критического состояния вероятность развития макротрещин в очагах концентраторов значительно возрастает.

Результаты исследования имеют практическую значимость для расчетного анализа прочности элементов конструкций и сварных соединений с трещиноподобными дефектами при статических и циклических нагрузках, а также являются актуальными при разработке методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов. Предложенный критерий позволит точнее прогнозировать возникновение начальных несплошностей в трещиноподобных концентраторах напряжений при плоской деформации, что способствует повышению надежности и долговечности судовых конструкций.

**Ключевые слова:** концентратор напряжений, корпус судна, сварное соединение, трещиноподобный дефект, начальная макротрещина, теоретический коэффициент концентрации, билинейная диаграмма деформирования, жесткость напряженного состояния

**Благодарности:** Приносим благодарность департаментам промышленной безопасности, морской техники и транспорта политехнического института ДВФУ за помощь в работе

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках инициативной НИР.

**Для цитирования:** Молоков К.А., Новиков В.В. Критерий оценки образования начальных макротрещин в корпусных конструкциях с трещиноподобными дефектами или концентраторами напряжений. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3 часть 2, С. 113—121. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.014

*Original article*

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.69.3.014>

## Criterion for assessing the formation of initial macrocracks in hull structures with crack-like defects or stress concentrators

Konstantin A. Molokov<sup>1,2</sup> [spektrum011277@gmail.com](mailto:spektrum011277@gmail.com), Valery V. Novikov<sup>1</sup> [leka230243@gmail.com](mailto:leka230243@gmail.com)

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University (FEFU), Russian Federation,

<sup>2</sup>Vladivostok State University, Vladivostok, Russian Federation

**Abstract.** The effect of stress concentrators similar to cracks caused by structural features of elements or during welding is studied. Based on the bilinear deformation model, a criterion has been developed that determines the limit state and reliability of metal structures taking into account the probability of damage development. Particular attention is paid to deep concentrators (defects) with a complex three-dimensional stress state near the vertices. The results obtained demonstrate a significant influence of the three-dimensionality of the stress field on the critical stress concentration factor at the vertices of such concentrators or defects.

Numerical studies have been carried out, the results of which have been compared with the available data of other authors on the dependence of the critical stress concentration factor on the mechanical properties of the material and its geometric parameters. Point calculations of the permissible load and the theoretical stress concentration factor have been performed, which are obtained taking into account the developed criterion of the limit state for concentrator foci. The calculated data have qualitatively confirmed that when the critical state is exceeded, the probability of macrocracks developing in the concentrator foci increases significantly. The results of the study are of practical importance for the calculation analysis of the strength of structural elements and welded joints with crack-like defects under static and cyclic loads, and are also relevant in the development of methods for monitoring and preventing the propagation of

cracks and other defects. The proposed criterion will allow more accurate prediction of the occurrence of initial discontinuities in crack-like stress concentrators under plane deformation, which contributes to increasing the reliability and durability of ship structures.

**Key words:** stress concentrator, ship hull, welded joint, crack-like defect, initial macrocrack, theoretical concentration factor, bilinear stress-strain diagram, stress state rigidity

**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

**Financial Support:** The study was carried out as part of the initiative research.

**For citation:** Konstantin A. Molokov, Valery V. Novikov, Criterion for assessing the formation of initial macrocracks in hull structures with crack-like defects or stress concentrators. Marine intellectual technologies. 2025. № 3 part 2, P. 113—121. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.014

## Введение

Дефекты в сварных соединениях, такие как трещины и концентраторы напряжений (подрезы, несплавления, поры и т.д.), могут значительно снижать как статическую, так и усталостную прочность конструкции. Наибольшую опасность (особенно при циклических нагрузках) представляют концентраторы напряжений, способные провоцировать образование трещин в вершине концентратора напряжений или трещиноподобного дефекта. Вероятность возникновения трещины в вершине концентратора напряжений зависит от его формы, размеров, величины внешней нагрузки и напряженного состояния (НС), которое в свою очередь может зависеть от концентрации напряжений и силового воздействия. С другой стороны образование макротрещин в вершинах концентраторов не всегда приводит к их дальнейшему распространению [1]. Несомненный интерес представляют случаи образования повреждений структуры на начальном этапе наработки в конструкции несплошностей или макротрещины в вершине концентратора.

В сварных конструкциях с концентраторами напряжений даже малые трещины, возникающие при эксплуатации, могут представлять серьезную угрозу [2, 3, 4, 5, 1, 6]. Это связано с тем, что они могут быстро распространяться, особенно в продольоватых и узких концентраторах (рис. 1).

Выбор типа того, или иного сварного соединения в крупногабаритных корпусных конструкциях часто обусловлен экономическими факторами. Поэтому приходится считаться с наличием концентраторов напряжений.

В целом даже сварные соединения с малой концентрацией напряжений вызывают снижение несущей способности. Разрушение крестовых сварных швов со значительным межцентровым расстоянием  $2a$  и дефектами несплавления может происходить как при статических нагрузках (из-за хрупкого разрушения зоны сплавления в вершине эллиптического концентратора), так и - под циклическим воздействием, инициирующим образование трещин в вершинах концентратора.

Существующие модели оценки надежности сварных элементов с трещиноподобными дефектами часто не учитывают специфику поведения материала и НС при значительных деформациях. Поэтому актуальной задачей является разработка приемлемого критерия оценки развития повреждений от внешней циклической нагрузки - такого, который бы учитывал нелинейное поведение материала, изменение многоосного напряженного состояния в вершине трещиноподобного

концентратора и позволял бы более точно прогнозировать прочность сварных конструкций с трещиноподобными дефектами. Данная работа посвящена разработке и применению критерия, основанного на билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования материала.

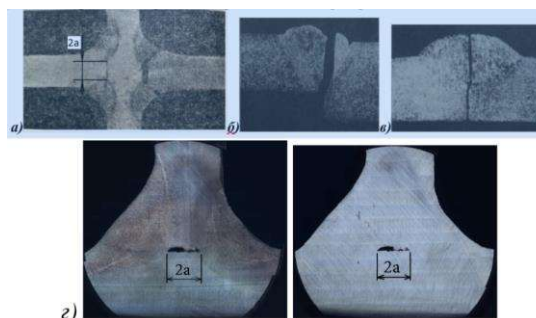


Рис.1. Характерные разрушения крестовых и стыковых соединений от концентраторов напряжений: а - трещиноподобный концентратор от несплавления размером  $2a$  (соединение без разделки кромок); б - от концентратора, образованного ступенчатым переходом в стыке кромок; в - одностороннее стыковое соединение с концентратором от несплавления; г - шлифы таврового соединения с дефектом

## 1. Анализ результатов известных исследований и критериев зарождения и развития трещин в районе концентраторов напряжений

Задачи оценки снижения статической и циклической несущей способности конструкций с концентраторами напряжений не новы: широко известны работы Андреева А.В., Барабанова Н.В., Бойцова Г.В., Грубина А.Н., Васильева В.В., Гуревича С.Е., Турмова Г.П., Подзолова И.В., Нейбера Г., Морозова Н.Ф., Петрова Ю.П., Смирнова В.И. [7, 8, 9, 10, 2] и др. О влиянии концентрации напряжений на выносливость сварных соединений накоплена значительная экспериментальная база [7, 9, 11]. Однако особенно четких границ применимости критериев накопления необратимых повреждений или разрушений с учетом концентраторов напряжений - нет, или же таковые недостаточно проработаны.

Концентрация напряжений, возникающая в сварных соединениях, является одним из ключевых факторов, определяющих их прочность и долговечность. Многочисленные исследования, проведенные как отечественными, так и зарубежными учеными, подтверждают, что концентраторы напряжений являются причиной множества разрушений сварных конструкций, особенно в таких отраслях, как кораблестроение,

машиностроение и строительство [2]. Концентраторы возникают в местах резкого изменения геометрии сварных соединений, например, в зонах подрезов, несплавлений, сварочных кратеров, а остаточные сварочные напряжения способствуют повышению жесткости напряженного состояния и хрупкому локальному разрушению [6].

В наиболее распространенных типах сварных соединений, стыковых и крестовых (см. рис. 1), наиболее уязвимой является область основного металла, непосредственно примыкающая к сварному шву. Швы, как правило, имеют значительную длину по сравнению с толщиной металла и концентратором напряжения, например, подрезом в стыковом соединении, или с протяженным непроплавлением в сварном соединении и др. Подобная геометрия препятствует равномерному распределению напряжений, а совместно с неоднородностью зон соединения – приводит к возникновению двухосного, а чаще – трехосного напряженного состояния [6, 5].

В монографии [12] дается оценка допустимых коэффициентов концентрации напряжений для трещиноподобных дефектов. Для плоского напряженного состояния в вершине концентратора и внешней нагрузки  $\sigma_n$  ниже предела текучести материала при одноосном растяжении  $\sigma_{0,2}$  для упругого решения выполняются соотношения  $\sigma_{max} = \alpha_T \sigma_n \gg \sigma_{0,2}$ , а  $\sigma_n \approx \sigma_{0,2}$  и  $\sigma_n < \sigma_{0,2}$ . В этом случае значение теоретического коэффициента концентрации напряжений соответствует  $\alpha_T > 7,3$ , при котором концентратор можно считать трещиноподобным. При этом различия между трещиноподобным концентратором и трещиной должны нивелироваться, если  $\alpha_T > 7,3$  [12]. Необходимо также иметь в виду, что жесткость напряженного состояния в его вершине при определенных радиусе и длине, а также величине внешней нагрузки, может быть сопоставима с жесткостью НС в вершине трещины.

Оценивать величину теоретического коэффициента концентрации напряжений в зоне сплавления для различных сварных соединений и форм поверхностей предлагается по зависимостям, в [5, 7, 2] и др., которые в основном учитывают эффект концентрации от неплавного перехода и других геометрических параметров соединений.

В случае поверхностных или объемных концентраторов напряжений в массивных телах при плоском напряженном состоянии ( $\sigma_n$  – напряжение на бесконечности), для эллиптических концентраторов целесообразно применять решение Колосова-Инглиса:

$$\alpha_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = 1 + 2\sqrt{a/\rho}, \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  и  $\sigma_{max}$  представляют радиус кривизны и максимальное касательное напряжение на поверхности в вершине концентратора, а параметр  $a$  соответствует большой полуоси эллипса, или половине максимальной длины зоны концентрации, перпендикулярной направлению внешней нагрузки. Данная полуэмпирическая зависимость демонстрирует высокую степень соответствия экспериментальным данным.

Согласно принятой модели, теоретический коэффициент концентрации напряжений для выреза определяется геометрическими параметрами: глубиной и радиусом кривизны в вершине;

независимостью от общей формы контура [5].

Применение современных методов численного моделирования, таких как метод конечных элементов (МКЭ), существенно упростило оценку теоретического коэффициента концентрации напряжений, позволяя проводить анализ напряженно-деформированного состояния в рамках как линейно-упругой, так и упругопластической моделей.

Экспериментальные исследования подтверждают, что при достижении определенной концентрации напряжений и воздействия внешней статической нагрузки, в условиях упругопластической деформации материала, в вершине концентратора возникает начальная трещина разрушения. Она обычно распространяется в направлении, перпендикулярном оси растяжения, как это видно на рис. 2, а-б. На данных снимках [8], увеличение размеров повреждения под поверхностью показано слева направо.

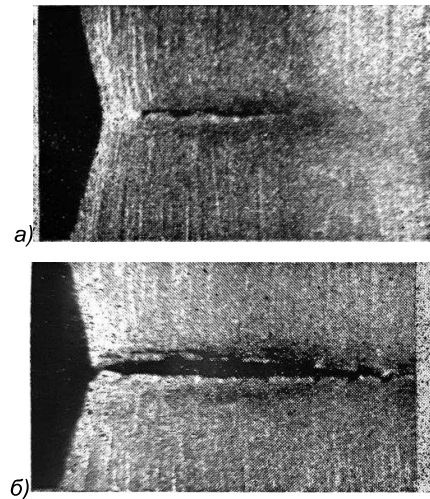


Рис.2. Образование несплошности под поверхностью в области вершины концентратора при статическом растяжении (а - начало, б - развитие)

При воздействии статической растягивающей нагрузки на деталь с острым концентратором напряжений возникает зона многоосного напряженного состояния. В этой зоне наблюдается повышенная вероятность нарушения сплошности материала, что может привести к образованию подповерхностных дефектов. Известно [5], что возникновение несплошности на мезо- и микро-уровне связано с превышением первого главного напряжения (приведенного напряжения по Мизесу) при условии трехосного напряженного состояния.

В зоне концентрации напряжений растет уровень пластической деформации, а предел прочности материала в ослабленном месте может повышаться до 160%, в зависимости от типа материала [8].

Для сравнительной оценки чувствительности материала к концентрации напряжений автор [13] рекомендует использовать зависимость:

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{E \cdot \varepsilon_{разр} \cdot \sigma_{разр}}}{\sigma_n}, \quad (2)$$

Здесь величины  $\varepsilon_{разр}$  и  $\sigma_{разр}$  можно определять по общепринятым в расчетах формулам  $\varepsilon_{разр} \cong \varepsilon_{кр} = \ln [1/(1 - \varphi_K)]$  и  $\sigma_{разр} \cong S_{отр} = \sigma_B (1 + 1,4\varphi_K)$ , соответственно, где  $S_{отр}$  – истинные напряжения

разрушения при одноосном напряженном состоянии.

Эта формула была преобразована авторами [14] в несколько другой вид:

$$\sigma_n^{bc} / \sigma_{0,2} = \frac{\sqrt{E \cdot \varepsilon_{разр} \cdot \sigma_{разр}}}{\alpha_T^{bc} (0,9 + 0,1 \alpha_T^{bc}) \sigma_{0,2}} \quad (3)$$

При этом предлагаемый автором [13] коэффициент, характеризующий условие возникновения трещины при конкретной нагрузке  $\sigma_n$ , на графиках будем обозначать как  $\alpha_T$ . Подобное состояние предложено называть как «наиболее вероятное для зарождения макротрещины в концентраторе» – «Born Crack». Предлагаемая зависимость учитывает повышение напряжений течения в области вершины концентратора, однако расчеты по ней не учитывают жесткость напряженного состояния в зависимости от внешнего нагружения и концентрации напряжений.

Авторы [15] предлагают аналитическую модель оценки риска, связанного с концентраторами напряжений в трубопроводных системах, основанную на концепции локального коэффициента концентрации напряжений. В работе выведено аналитическое соотношение, устанавливающее связь между обобщенным коэффициентом концентрации напряжений и коэффициентами концентрации интенсивности напряжений и деформаций в упругой области. Данное соотношение, полученное с использованием известной формулы Г. Нейбера и степенной аппроксимации кривой деформирования материала, позволяет определить критическое значение пластической деформации в зоне концентратора как:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_b \alpha_c^{2/(1+m)}}{E} \quad (4)$$

где  $\alpha_c$  – критическое значение теоретического коэффициента концентрации напряжений, на графиках будем его обозначать  $\alpha_T$ ;  $\sigma_b$  – условный предел прочности (по условной диаграмме);  $E$  – модуль упругости стали;  $m$  – показатель степенного упрочнения для основного металла сварного соединения.

В рамках деформационной теории пластичности, используя степенную аппроксимацию диаграммы деформирования, получена формула для численного расчета критического состояния в вершине концентратора в таком виде [14, 16]:

$$\sigma_n^{bc} = 2 \cdot (\alpha_T^{bc})^{\frac{-2m}{m+1}} \cdot \sigma_b \cdot (7\varphi_k + 5) / (\alpha_T^{bc} + 9) \quad (5)$$

Последнее соотношение позволяет при заданной нагрузке численно определить напряжения  $\sigma_n^{bc}$  или построить диаграмму вероятности образования макротрещин в зоне концентратора. Однако предложенный подход не учитывает влияние жесткости сложного напряженного состояния (СНС) в вершине концентратора на зарождение дефекта при достижении критического состояния.

## 2. Оценка влияния циклической нагрузки, концентрации и СНС на трещинообразование

В упрочняемых материалах циклическое нагружение значительно повышает вероятность хрупкого разрушения в зонах острых концентраторов напряжений, особенно при низких температурах. В этом контексте критерием опасности служит теоретический коэффициент концентрации

напряжений ( $\alpha_T$ ), который соответствует пределу хрупкого разрушения при статическом нагружении.

Зависимость максимальных напряжений от числа циклов нагружения ( $N$ ) может быть описана следующей аппроксимационной формулой:

$$\sigma_{max} = \sigma'_{max} + A \cdot \lg(N), \quad (6)$$

где  $\sigma'_{max}$  – максимальное напряжение в концентраторе в первом полупериоде нагружения;  $A$  – коэффициент, зависящий от уровня исходной деформации и коэффициента асимметрии цикла в вершине концентратора. Известно, что разупрочнение связано с появлением разрыхлений материала и микронесплошностей. Для упрочняющихся материалов напряжения  $\sigma_{max}$  с увеличением числа циклов на первой стадии будут возрастать.

Хрупкое разрушение вблизи острых концентраторов напряжений может быть вызвано следующими факторами:

1. Повышенной интенсивностью трехмерного растяжения, когда напряжения вблизи вершины концентратора имеют сложную пространственную структуру. Это усиливает растягивающие напряжения и способствует хрупкому разрушению.

2. Увеличением сопротивления пластической деформации, когда вблизи вершины концентратора возрастает сопротивление сдвигу. Это затрудняет пластическую деформацию и повышает вероятность хрупкого разрушения, особенно при высоких скоростях нагружения и острых концентраторах.

Вблизи вершины концентратора на поверхности материала преобладает плоское СНС, тогда как под поверхностью наблюдается трехосное, для которого характерна более высокая жесткость. Вследствие этого хрупкое разрушение обычно возникает на некотором расстоянии от поверхности концентратора (см. рис. 2). Экспериментально установлено, что локальный предел текучести в зоне концентратора напряжения не совпадает с теоретическими значениями, рассчитанными по критерию Мизеса-Губера-Генки. Разница между экспериментальным значением  $\sigma_{0,2}^*$  и теоретическим  $\sigma_{0,2}$  увеличивается с ростом концентрации напряжений, что свидетельствует об изменении жесткости напряженного состояния.

В условиях трехосного напряженного состояния зависимости между главными напряжениями при плоской деформации (ПД) принимают следующий вид:

$$\sigma_1 = \sigma_i / D; \quad \sigma_2 = q \sigma_1; \quad \sigma_3 = \mu_T (1 + q) \sigma_1. \quad (7)$$

Здесь  $\mu_T = 0,5$  – коэффициент Пуассона в пластической области, а  $D$  – коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение первого главного напряжения относительно интенсивности напряжений в случае СНС.

С учетом принятия допущения о линейной зависимости повышения напряжений текучести в области вершины концентратора решим данное уравнение относительно  $q$ . Оно будет иметь два решения: первое – для случая возникновения растягивающей компоненты  $\sigma_2$ ; второе – сжимающей. В условиях действия растягивающей компоненты  $\sigma_2$ , которая увеличивает жесткость напряженного состояния в случае СНС, после

преобразований и сокращений получим следующее выражение [14]:

$$\sigma_2/\sigma_1 = q = 1 - \sqrt{3}\sigma_{0,2}(1 + 9/\alpha_T)/(15\sigma_H). \quad (8)$$

Данная зависимость получена для вершины трещины из условия равновесия в упругопластической области, для которой D в (7) является лишь зависимым от констант материала  $m$  и  $\mu$  [5]:

$$D = (1 + m)(1 - 2\mu)/2. \quad (9)$$

Для предельного случая, когда  $\sigma_H = \sigma_{0,2}$ , и  $\alpha_T = 7,3$ , имеет место достаточно близкое соотношение между нормальными компонентами к соотношениям их для трещины. Таким образом, в этом случае концентратор можно считать трещиноподобным и, как легко видеть из (8)(9), пропорциональность  $q$  будет изменяться в зависимости от  $\alpha_T$  и  $\sigma_H$ .

### 3. Условия критического состояния для вершины трещиноподобного концентратора напряжений

Истинные напряжения для вершины концентратора напряжений при решении упругой задачи можно найти по билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования (рис. 3):

$$\sigma_i^{бил} = \sigma_{0,2} + (S_{отр} - \sigma_{0,2}) \times (\alpha_T \sigma_H - \sigma_{0,2}) / (E e_{кр} - \sigma_{0,2}), \quad (10)$$

или по степенной

$$\sigma_i^{ст} = \sigma_{0,2}^{1-m} \cdot (\alpha_T \sigma_H)^{2m/(m+1)}. \quad (11)$$

Здесь  $S_{отр}$  – истинные напряжения отрыва при одноосном растяжении образца, вычисляемые через критическое относительное сужение  $\varphi_{кр}$  и временный предел прочности, как  $S_{отр} = \sigma_B(1 + 1,4\varphi_{кр})$ ;  $e_{кр}$  – критическая пластическая деформация до разрушения образца;  $m$  – коэффициент степенного упрочнения;  $\sigma_H$  – напряжение, создаваемое внешней нагрузкой вне области влияния концентратора.

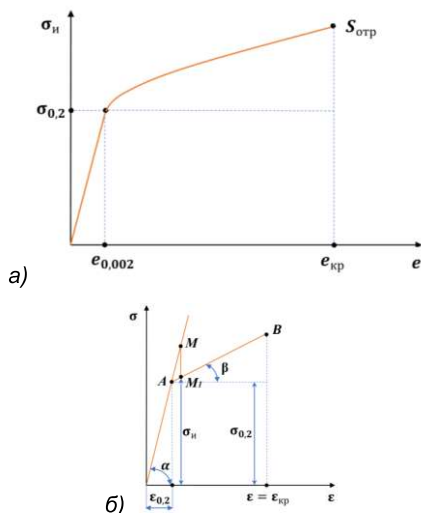


Рис. 3. К аппроксимации истинной диаграммы деформирования сталей: а) истинная диаграмма  $\sigma$ - $\epsilon$ ; б) схематизация для вывода формулы (10)

Допуская, что интенсивность истинных одноосных напряжений энергетически эквивалентна приведенным напряжениям при многоосном

напряженном состоянии в вершине концентратора, по формуле Губера-Мизеса имеем для билинейной и степенной аппроксимации диаграмм соответственно,  $\sigma_i^{бил} = \sigma_i$  и  $\sigma_i^{ст} = \sigma_i$ .

Однако при многоосном напряженном состоянии по сравнению с плоским первая главная компонента нормальных напряжений  $\sigma_1$  увеличивается. Для вершины трещиноподобного концентратора напряжений формулу можно записать в свернутом виде через отношение компонент (7) следующим образом:

-для билинейной аппроксимации:

$$\sigma_i^{бил} = \sqrt{[(A)^2 + (B)^2 + (C)^2]/2}, \quad (12)$$

-для степенной аппроксимации:

$$\sigma_i^{ст} = \sqrt{[(A)^2 + (B)^2 + (C)^2]/2}, \text{ где:}$$

$$A = \sigma_1 - q\sigma_1, \quad (13)$$

$$B = q\sigma_1 - \mu_T(1 + q)\sigma_1,$$

$$C = \sigma_1 - \mu_T(1 + q)\sigma_1.$$

Здесь  $q$  – вычисляется по формуле (8) для трещиноподобного концентратора;  $\mu_T$  – функция секущего модуля по истинной диаграмме аппроксимации. Положим, что критическое состояние, при котором неизбежно будет развиваться поврежденность для вершины концентратора, будет соответствовать условию достижения

$$\sigma_1 = S_{отр}. \quad (14)$$

Тогда, заменив в (14)  $\sigma_1$  на  $S_{отр}$  и приравняв (14) к (10) или (11), можно численно найти все пары соответствующих искомым величин  $\alpha_T$  и  $\sigma_H$ , удовлетворяющих неизбежному развитию поврежденности у вершины трещиноподобного концентратора напряжений. К сожалению, прямую запись формулы относительно  $\alpha_T$  или  $\sigma_H$  здесь привести невозможно из-за ее громоздкости, однако нами она была получена аналитически в конечных функциях.

### 4. Анализ результатов

Для верификации адекватности модели, определяющей критическое состояние, построены графики зависимости  $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$  от  $\alpha_T$  при использовании билинейной диаграммы (рис. 4,а). Здесь следует отметить, что аппроксимация (10) выполнена спрямлением упрочняющегося участка от  $\sigma_{0,2}$ , что приводит к большим погрешностям в области весьма малых деформаций. Вероятно, спрямление по касательной для точки  $\sigma_B$ , имело бы меньшее расхождение со степенной аппроксимацией. Но в этом случае функция аппроксимации усложнится.

Результаты исследования по предлагаемой модели представлены в двух вариантах: - на основе использования билинейной (рис. 4,а) и степенной диаграмм аппроксимации (рис. 4,б). Расчеты выполнены для распространённых в судостроении конструкционных сталей феррито-перлитного класса в состоянии поставки (сталь 10, 22К, сталь 50, СтЗсп, 37ХНЗА, 30ХГСА и др.). Механические характеристики этих сталей известны (табл. 1),. Некоторые результаты расчетов, полученные для этих сталей, представлены в [13,14] и других публикациях.

Таблица 1

Характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_{bc}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	m	$\varphi_k$
10	320	190	0,17	0,73
СтЗсп	450	270	0,16	0,71
22К	540	310	0,16	0,69
50	680	350	0,16	0,62
37ХНЗА	1014	743	0,12	0,6
30ХГСА	1750	1360	0,09	0,44

Предложенный критерий может быть применен для оценки потенциальной опасности дефектов в сварных соединениях, локализованных в зоне сплавления (см. рис. 4). В этой зоне формируются закалочные структуры с механическими свойствами, существенно отличающимися от свойств исходного металла и зависящими от параметров сварки, марки стали и других факторов.

Результаты, полученные с учетом трехосного НС и использования билинейной диаграммы деформирования, дают критические напряжения, несколько отличающиеся от напряжений, рассчитанных по другим критериям (см. рис. 4, а). В целом при высокой концентрации напряжений (порядка  $\alpha_T > 35$ ) напряжения  $\sigma_{bc}^{bc}$ , рассчитанные по предлагаемому критерию, приближаются к значениям, получаемым по модели (3), однако для области значений  $7,3 < \alpha_T < 25$  они становятся сравнительно ниже. Следует отметить, что для областей, где  $\alpha_T > 35$  и  $7,3 < \alpha_T < 25$ , схождение и расхождение результатов, соответственно сильно зависят от марки стали, а точнее – от её механических характеристик. Точки пересечения зависимостей с моделью (3) не наблюдаются при одних и тех же значениях  $\alpha_T$  и  $\sigma_{bc}^{bc}$ , и их положение зависит от марки стали.

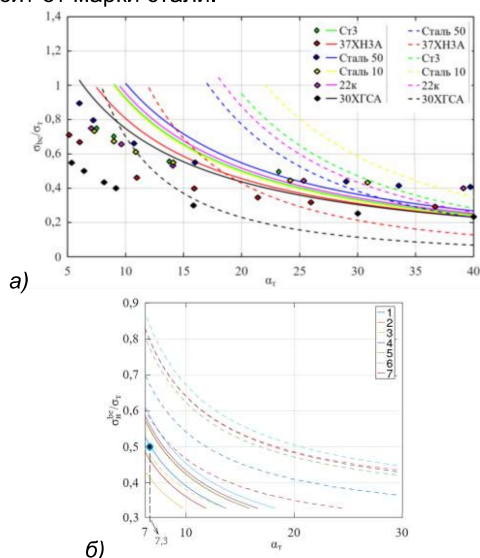


Рис. 4,а. Изменение относительного уровня безопасных напряжений внешней нагрузки  $\sigma_{bc}^{bc} / \sigma_{0,2}$  от  $\alpha_T$  для трещиноподобных концентраторов по различным моделям: сплошные кривые – формула (5) [14]; пунктирные – формула на основе С.А. Куркина (3) [13]; маркеры – формулы (7)-(14)

Рис. 4,б. Сплошные линии - степенная, пунктир - билинейная аппроксимация, соответственно стали: 1 - 09Г2С; 2 - 10; 3 - 30ХГСА; 4 - 22К; 5 - СтЗсп; 6 - 50; 7 - 37ХНЗА

Учет объемного напряженного состояния в трещиноподобных дефектах существенно влияет на снижение допустимых напряжений, зарождение и развитие повреждений. Особенно это проявляется в диапазоне значений  $\alpha_T$  от границы перехода, когда дефект можно считать трещиноподобным, до  $\alpha_T$  порядка 17. Отмеченное наиболее актуально для сталей средней и низкой прочности. Для нетрещиноподобных дефектов (обычных концентраторов), когда  $\alpha_T \ll 7,3$ , критерий учета объемного состояния и начального разрушения по условию (14) может давать заниженные опасные напряжения, обеспечивая большой запас прочности и отсутствие процесса образования и развития повреждений от концентратора. В таких случаях необходимо использовать другие критерии, например, описанные в [15, 1].

На рис. 4, б сопоставлены результаты расчета при использовании степенной диаграммы. По достижении некоторого значения  $\alpha_T$ , характерного для конкретной марки стали, концентратор следует рассматривать как трещиноподобный. Известно, что для стали 09Г2С и при коэффициенте запаса 2 по пределу текучести трещиноподобным будет являться концентратор, если значение  $\alpha_T = 7,3$  [12]. Оно практически совпадает с расчетом (см. рис. 4,б). Для стали 30ХГСА при тех же условиях, по расчетам получаем  $\alpha_T \approx 4,5$ , что тоже является логически адекватным значением. Здесь улучшение расчетной оценки может быть выполнено введением в расчет уточненного значения  $\mu_T$ , как функции секущего модуля по истинной диаграмме аппроксимации.

Учет трехмерного НС в моделях приводит к снижению критической пластической деформации до разрушения при статическом растяжении образцов, что свидетельствует о выполнении условия (14) до полного исчерпания пластичности материала. Аналогичные исследования показывают, что более глубокие концентраторы вызывают значительное локальное повышение предела текучести в их вершине. Экспериментальные данные подтверждают отсутствие пластического течения при чисто гидростатическом нагружении, при этом разрушение происходит хрупко. Однако в зоне концентратора объемное напряженное состояние не является стабильным при упрочнении, что приводит к бифуркации – образованию трещины или перераспределению пластических деформаций. При этом первая компонента нормальных напряжений может оставаться неизменной величиной, и условие (14) не нарушается. Критическое состояние в зоне концентратора, предположительно соответствует напряженному состоянию в момент бифуркации, параметры которого существенно зависят от глубины и геометрии концентратора (отношение глубины к толщине детали), механических характеристик материала и размеров зоны концентрации напряжений.

Предложенный подход позволяет выявить корреляцию между уровнем внешней нагрузки и вероятностью возникновения бифуркации, что открывает новые возможности для прогнозирования долговечности конструкций с концентраторами напряжений. Дальнейшие исследования могут касаться получения дополнительных результатов методом конечных элементов с учетом микроструктурных особенностей материала в очаге

концентратора, что позволит уточнить влияющие параметры на критическое состояние и повысить точность предсказания образования в очаге макротрещины. Анализ эволюции напряженно-деформированного состояния вблизи точки бифуркации с использованием фрактальной геометрии может обеспечить более глубокое понимание механизмов хрупкого разрушения.

### Заключение

На основе разработанного критерия предельного состояния для вершины концентратора представлены точечные расчеты допустимого уровня внешней нагрузки и коэффициента концентрации напряжений. Результаты исследования показали, что критический коэффициент концентрации напряжений для трещиноподобных концентраторов зависит от механических свойств материала, геометрии, а также его расположения относительно внешнего поля напряжений. Предлагаемый критерий для трещиноподобных дефектов корректнее описывает изменение предельных напряжений образования несплошностей, но не для всех степеней концентрации напряжений. Результаты, полученные по данному критерию, являются более жесткими, особенно для области, где концентратор можно отнести к трещиноподобным дефектам.

В области концентрации напряжений, при возрастании внешней нагрузки, стабильность трехмерного напряженного поля нарушается с количеством циклов, что приводит к точке бифуркации, проявляющейся в образовании микродефекта или перераспределении пластических деформаций. При циклических нагрузках вероятность нарушения этого поля тем больше, чем больше становится циклическая наработка.

При рассмотрении плоской деформации, степень ее реализации зависит от формы детали, распространения концентратора по глубине, теоретического коэффициента концентрации и уровня внешней нагрузки. Выявлено существенное влияние коэффициента  $\mu_T$  на результаты

критического состояния, особенно на границах (трещиноподобного/нетрещиноподобного) концентратора.

При выводе зависимостей учтены как изменение предельного состояния в очаге концентрации напряжений в функции от  $\alpha_T$  и  $\sigma_{H1}$ , так и степень объемности напряженного состояния (жесткость НС). Результаты расчетов предельных состояний отличаются в зависимости от выбранной аппроксимации диаграмм деформирования. В упрощенном виде, в котором было сделано описание диаграммы деформирования билинейным представлением, при малых деформациях оно не соответствует удовлетворительной точности. По предложенному критерию для плоской деформации в очаге концентратора кривые предельных состояний сталей собраны более кучно, чем при отсутствии её. Более острые и длинные по глубине концентраторы вызывают большее повышение локального предела текучести в его вершине.

Полученные результаты по предложенному критерию для соответствующего предельного состояния качественно подтверждаются результатами детерминированного расчета Ю.Г. Матвиенко по значению  $\alpha_T$  начала перехода к трещиноподобному дефекту при плоской деформации. Значения  $\alpha_T$  попадают в область не критических – переходных состояний между критической трещиной и допустимой трещиностойкостью. В этом случае при известном коэффициенте запаса  $k_3 = \sigma_{0,2}/\sigma_{-1}$  можно вычислить  $\alpha_T$ , отвечающее границе перехода к трещиноподобному дефекту для конкретной марки стали, используя известные стандартные механические характеристики. Значение  $\alpha_T$  при ненулевом радиусе в вершине концентратора легко определяется МКЭ в упругой задаче.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетном анализе прочности элементов конструкций и сварных соединений с трещиноподобными дефектами, а также для разработки методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов.

### Литература

1. Molokov K., Domashevskaja Ya. Estimation of Endurance Limits of Welded Joints by the Criterion of Non-propagating Cracks // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 479-486.
2. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
3. Математическая модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений в сварных тавровых соединениях / В.В. Ерофеев, А.Г. Игнатьев, Н.И. Олейник [и др.] // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2021. – № 4(17). – С. 28-36.
4. Новиков В.В. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций / В.В. Новиков, Г.П. Турмов, О.Э. Суоров, А.П. Герман, К.А. Молоков, М.В. Китаев. // Монография. - Владивосток: ДВФУ, 2020. - 266 с.
5. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. Монография. - Владивосток: Дальнаука, 2010 - 281 с.
6. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П., Васильченко Н.П. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 3(41). С. 45-54.
7. Турмов Г.П. Расчет прерывистых связей на прочность с учетом концентрации напряжений. - Владивосток: ДВГУ, 1984. - 152 с.
8. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов. - М.: МГУ, 1976. - 184 с.
9. Мюнзе В.Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций. - М.: Машиностроение, 1968. - 312 с.
10. Морозов Н.Ф., Петров Ю.П., Смирнов В.И. Предельное равновесие хрупких тел с концентраторами напряжений: структурный подход. - СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2011. - 80 с.

11. Подзоллов И.В. Допускаемые напряжения для сталей в машиностроении (при концентрациях и переменности напряжений). - М.: Оборонгиз, 1940. - 423 с.
12. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения. - М.: Физматлит, 2021. - 208 с.
13. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1976. - 184 с.
14. Молоков К.А., Новиков В.В., Дабалез М. Оценка появления начальных разрушений от концентраторов напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций. *Advanced Engineering Research (Russia)*. 2023;23(1):41–54.
15. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов. - Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. - 144 с.
16. Ларионов В.П. Перспективные направления исследований, связанных с созданием машин и конструкций в северном исполнении // Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода: К 60-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова. - Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 1998. - С. 379-392.

#### References

1. Molokov K., Domashevskaya Ya. Estimation of Endurance Limits of Welded Joints by the Criterion of Non-propagating Cracks // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 479-486.
2. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Kонтсентратсия napryazheniy i drugie osobennosti napryazhennogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstruksiy [Stress concentration and other features of the stress state of ship hull structures]. - Vladivostok: DVFU, 2014. - 178 s.
3. Matematicheskaya model' dlya otsenki koeffitsientov kontsentratsii napryazheniy v svarnykh tavrovnykh soedineniyakh [Mathematical model for estimating stress concentration factors in welded T-joints] / V.V. Erofeev, A.G. Ignat'ev, N.I. Oleynik [i dr.] // *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*. - 2021. - № 4(17). - S. 28-36.
4. Novikov V.V. Povrezhdeniya i raschetnyy analiz prochnosti korabel'nykh konstruksiy [Damage and calculation analysis of the strength of ship structures] / V.V. Novikov, G.P. Turmov, O.E. Surov, A.P. German, K.A. Molokov, M.V. Kitaev. // *Monografiya*. - Vladivostok: DVFU, 2020. - 266 s.
5. Matokhin G.V., Gorbachev K.P. Inzheneru o soprotivlenii materialov razrusheniyu [To the engineer on the resistance of materials to destruction]. *Monografiya*. - Vladivostok: Dal'nauka, 2010 - 281 s.
6. Molokov K.A., Novikov V.V., Turmov G.P., Vasil'chenko N.P. Otsenka nadezhnosti sudovykh konstruksiy s mikrotreshchinami i ostatochnymi svarochnymi napryazheniyami [Reliability assessment of ship structures with microcracks and residual welding stresses] // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2018. T. 1. № 3(41). S. 45-54.
7. Turmov G.P. Raschet preryvistykh svyazey na prochnost' s uchetom kontsentratsii napryazheniy [Calculation of intermittent connections for strength taking into account stress concentration]. - Vladivostok: DVGU, 1984. - 152 s.
8. Kishkin B.P. Konstruksionnaya prochnost' materialov [Structural strength of materials]. - M.: MGU, 1976. - 184 s.
9. Myunze V.Kh. Ustalostnaya prochnost' svarnykh stal'nykh konstruksiy [Fatigue strength of welded steel structures]. - M.: Mashinostroenie, 1968. - 312 s.
10. Morozov N.F., Petrov Yu.P., Smirnov V.I. Predel'noe ravновесие khрупkikh tel s kontsentratorami napryazheniy: strukturnyy podkhod [Limit equilibrium of brittle bodies with stress concentrators: structural approach]. - SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2011. - 80 s.
11. Podzolov I.V. Dopускаемые napryazheniya dlya staley v mashinostroenii (pri kontsentratsiyakh i peremennosti napryazheniy) [Permissible stresses for steels in mechanical engineering (with stress concentrations and variability)]. - M.: Oborongiz, 1940. - 423 s.
12. Matvienko Yu.G. Dvukhparametricheskaya mekhanika razrusheniya [Two-parameter fracture mechanics]. - M.: Fizmatlit, 2021. - 208 s.
13. Kurkin S.A. Prochnost' svarnykh tonkostennykh sosudov, rabotayushchikh pod davleniem [Strength of welded thin-walled vessels operating under pressure]. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 184 s.
14. Molokov K.A., Novikov V.V., Dabalez M. Otsenka poyavleniya nachal'nykh razrusheniy ot kontsentratorov napryazheniy v svarnykh soedineniyakh i elementakh konstruksiy [Evaluation of the occurrence of initial failures from stress concentrators in welded joints and structural elements]. *Advanced Engineering Research (Russia)*. 2023;23(1):41–54.
15. Yamaleev K.M., Gumerova L.R. Strukturnye aspekty razrusheniya metalla nefteprovodov [Structural aspects of failure of oil pipeline metal]. - Ufa: AN RB, Gilem, 2011. - 144 s.
16. Larionov V.P. Perspektivnye napravleniya issledovaniy, svyazannykh s sozdaniem mashin i konstruksiy v severnom ispolnenii [Promising areas of research related to the creation of machines and structures for northern use] // *Svarka i problemy vyazkokhрупkogo perekhoda: K 60-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.P. Larionova*. - Novosibirsk: Sibirskoe otделение RAN, 1998. - S. 379-392.



**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), 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 04.06.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 15.06.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 01.09.2025.