

# ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 539.4:669.018.29

## Критерий оценки развития повреждений в сварных конструкциях судового корпуса с трещиноподобными дефектами

Молоков Константин Александрович <sup>1,2</sup>, к.т.н., [spektrum011277@gmail.com](mailto:spektrum011277@gmail.com)

Новиков Валерий Васильевич <sup>1</sup>, к.т.н., [leka230243@gmail.com](mailto:leka230243@gmail.com)

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

<sup>2</sup> Владивостокский государственный университет, г. Владивосток

*В настоящем исследовании изучается воздействие концентраторов напряжений, аналогичных трещинам, возникающих 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), характеризующимся сложным трехмерным напряженным состоянием возле вершин. Полученные данные демонстрируют значительное влияние трехмерности напряженного поля на критический коэффициент концентрации напряжений в вершинах подобных концентраторов или дефектов. Представленные точечные расчеты допустимой нагрузки и коэффициента концентрации напряжений основаны на разработанном критерии предельного состояния для вершинных зон концентраторов. Результаты исследования подтверждают зависимость критического коэффициента концентрации напряжений от механических свойств материала, его геометрических параметров и ориентации относительно внешнего силового поля. Превышение критического состояния величиной коэффициента концентрации в вершине концентратора (дефекта) свидетельствует о высокой вероятности развития макротрещины.*

*Результаты исследования имеют практическую значимость при расчетном анализе прочности элементов конструкций и сварных соединений с трещиноподобными дефектами, а также актуальны для разработки методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов.*

**Ключевые слова:** сварное соединение, корпус судна, трещиноподобный дефект, теоретический коэффициент концентрации, объемное напряженное состояние, концентрация напряжений, билинейная диаграмма деформирования.

## Criterion for assessing the development of damage in welded structures of a ship hull with crack-like defects

K.A. Molokov <sup>1,2</sup>, [spektrum011277@gmail.com](mailto:spektrum011277@gmail.com)

V.V. Novikov <sup>1</sup>, [leka230243@gmail.com](mailto:leka230243@gmail.com)

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok

<sup>2</sup> Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok

*The present study examines the effect of stress concentrators, similar to cracks, arising due to design features of elements or during welding. 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) characterized by a complex three-dimensional stress state near the vertices. The data obtained demonstrate a significant effect of the three-dimensionality of the stress field on the critical stress concentration factor at the vertices of such concentrators or defects. The presented point calculations of the permissible load and the stress concentration factor are based on the developed limit state criterion for the vertex zones of concentrators. The results of the study confirm the dependence of the critical stress concentration factor on the mechanical properties of the material, its geometric parameters and orientation relative to the external force field. Exceeding the critical state by the concentration factor at the concentrator (defect) vertex indicates a high probability of macrocrack development. The results of the study are of practical importance in the calculation analysis of the strength of structural elements and welded joints with crack-like defects, and are also relevant for the development of methods for monitoring and preventing the propagation of cracks and other defects.*

**Keywords:** welded joint, ship hull, crack-like defect, theoretical concentration coefficient, volumetric stress state, stress concentration, bilinear deformation diagram.

## **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. Особую опасность представляют концентраторы напряжений, способные провоцировать образование трещин, особенно при циклических нагрузках, 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 внешней нагрузки [1].

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

Выбор типа того или иного сварного соединения крупногабаритных корпусных конструкций, часто обусловлены экономическими факторами, поэтому приходится сталкиваться с присутствием 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 непровара может происходить как при статических нагрузках из-за хрупкого разрушения зоны сплавления, расположенной в вершине эллиптического концентратора, так и под циклическим воздействием, инициирующим образование трещин в вершинах концентратора.

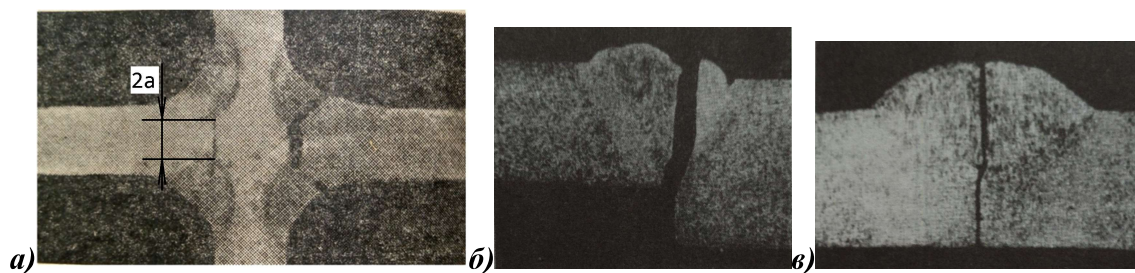


Рис. 1. Разрушения крестовых и стыковых соединений [6, 7] от концентраторов напряжений: а – трещиноподобный концентратор от непроплавления размером  $2a$  (соединение без разделки кромок); б – от концентратора образованного ступенчатым переходом в стыке кромок; в – одностороннее стыковое соединение с концентратором от непроплавления

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.

### **Исследования по расчетной оценке зарождения и развития трещин в районе концентраторов напряжений**

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 напряжений возникают в местах резкого изменения геометрии сварных соединений, например, в зонах подрезов, несплавлений, сварочных кратеров и пр. В этих точках происходит перераспределение напряжений, приводящее к локальному повышению их величины. Это повышение напряжений может значительно превышать номинальные значения напряжений, действующих в конструкции в целом, что может приводить к пластической деформации материала или даже к его разрушению.

В стыковых и крестовых соединениях (см. рис. 1), наиболее распространенных типах сварных соединений, область основного металла, непосредственно примыкающая к сварному шву, является наиболее уязвимой. Швы, как правило, имеют значительную длину по сравнению с толщиной металла и концентратором напряжения, например, подрезом в стыковом соединении, или протяженное непроплавление в сварном соединении и др. Подобная геометрия препятствует равномерному распределению напряжений, а совместно с неоднородностью зон соединения приводит к возникновению двухосного, а чаще – многоосного напряженного состояния [8]. В этом исследовании автором 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  $\sigma_{0,2}$ , (т.е., когда для упругого решения выполняются соотношения  $\sigma_{max} = \alpha_m \sigma_n \gg \sigma_{0,2}$ , а  $\sigma_n \approx \sigma_{0,2}$  и  $\sigma_n < \sigma_{0,2}$ ) характерно значение теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_m = 7,3$ , при котором концентратор можно считать трещиноподобным.

добным. Различия между трещиноподобным концентратором и трещиной должны нивелироваться, если  $\alpha_m > 7,3$ . При этом жесткость напряженного состояния в его вершине, при определенном 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, приведенным в [5, 6, 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:

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

В последней зависимости  $\rho$  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. Полуэмпирическая зависимость демонстрирует высокую степень соответствия экспериментальным данным.

Согласно принятой модели, теоретический коэффициент концентрации напряжений для выреза определяется геометрическими параметрами: 1 – глубиной и радиусом кривизны в вершине; 2 – 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 воздействии 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 [9], увеличение размеров повреждения под поверхностью показано слева направо.

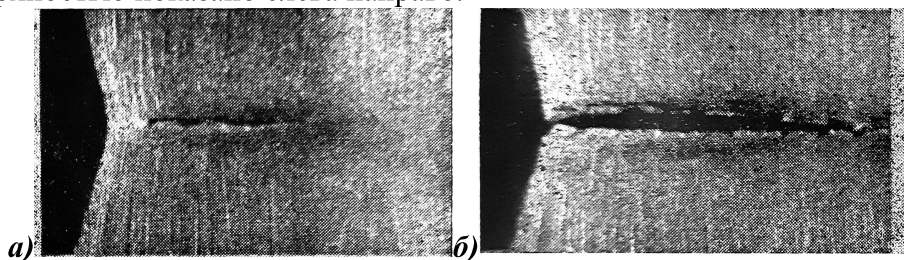


Рис. 2. Образование несплошности под поверхностью в области вершины концентратора при статическом растяжении

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 увеличивается уровень пластической деформации, а

предел прочности материала в ослабленном месте может повышаться до 160%, в зависимости от типа материала [9].

Для сравнительной оценки чувствительности материала к концентрации напряжений автор [10] рекомендует использовать зависимость:

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

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 [1] в несколько другой вид:

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

При этом предлагаемый автором [10] коэффициент  $\alpha_m$ , характеризующий условие возникновения трещины при конкретной нагрузке  $\sigma_n$ , на графиках его будем обозначать как значение  $\alpha_m$ . Это 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.

Исследование [11] предлагает 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 формулы Нейбера Г. 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  $\alpha_m$ ;  $\sigma_b$  – по условной диаграмме условный предел прочности;  $E$  – 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 по формуле в следующем виде [1]:

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

Последнее соотношение позволяет, при заданной нагрузке, численно определить напряжения  $\sigma_{\text{H}}^{\text{bc}}$  или построить диаграмму вероятности образования макротрещин в зоне концентратора. Однако предложенный подход не учитывает влияние трехмерности напряженного состояния в вершине концентратора на зарождение дефекта при достижении критического состояния.

### Оценка влияния циклической нагрузки, концентрации и сложного НС на трещинообразование

В упрочняемых материалах циклическое нагружение в области острых концентраторов напряжений повышает вероятность хрупкого разрушения, это происходит тем больше, чем ниже температура эксплуатации. В связи с этим, критерием опасности принимается теоретический коэффициент концентрации напряжений ( $\alpha_{\text{T}}$ ), соответствующий пределу хрупкого разрушения при статическом нагружении. Зависимость максимальных напряжений от числа циклов нагружения ( $N$ ) может быть представлена следующей аппроксимационной формулой:

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

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

Хрупкое разрушение вблизи острого концентратора напряжений может быть вызвано следующими причинами:

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

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

Вблизи вершины концентратора на поверхности материала преобладает плоское напряженное состояние, а под поверхностью наблюдается трехосное напряженное состояние, которое характеризуется значительно более высокой жесткостью. Вследствие этого хрупкое разрушение, как правило, возникает на некотором расстоянии от поверхности концентратора. 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 значением  $\sigma_{0,2}$  возрастает с увеличением концентрации напряжений, а это означает, что жесткость напряженного состояния изменяется.

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

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

Здесь  $\mu_m = 0,5$  – коэффициент Пуассона в пластической области, а  $D$  – коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение первого главного напряжения 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:

$$q = 1 - \frac{\sqrt{3}\sigma_{0,2}}{15\sigma_n} \left( 1 + \frac{9}{\alpha_T} \right). \quad (8)$$

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

### Критерий 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:

$$\sigma_i^y = \sigma_{0,2} + \frac{S_{omp} - \sigma_{0,2}}{Ee_{кр} - \sigma_{0,2}} (\alpha_T \sigma_n - \sigma_{0,2}), \quad (9)$$

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

Допуская, что интенсивность истинных одноосных напряжений энергетически эквивалентна приведенным напряжениям при многоосном напряженном состоянии в вершине концентратора, по формуле Губера-Мизеса имеем  $\sigma_i^y = \sigma_i$ .

Однако за счет многоосного НС при плоском НС, первая главная компонента нормальных напряжений  $\sigma_1$  увеличивается, и для вершины трещиноподобного концентратора напряжений можно записать через отношение компонент (7) следующим образом:

$$\sigma_i^y = \sqrt{\left[ (\sigma_1 - q\sigma_1)^2 + \left( q\sigma_1 - \mu_m(1+q)\sigma_1 \right)^2 + \left( \sigma_1 - \mu_m(1+q)\sigma_1 \right)^2 \right] / 2}, \quad (10)$$

где  $q$  – вычисляется по формуле (8) для трещиноподобного концентратора;  $\mu_m$  – коэффициент Пуассона для пластического состояния материала. Положим что критическое состояние, при котором неизбежно будет развиваться поврежденность для вершины концентратора, будет соответствовать условию достижения

$$\sigma_1 = S_{omp}. \quad (11)$$

Тогда заменив в (10)  $\sigma_1$  на  $S_{omp}$  и приравняв (10) к (9) можно численно найти все пары соответствующих искомым величин  $\alpha_T$  и  $\sigma_n$ , удовлетворяющих неизбежному развитию повреждений у вершины трещиноподобного концентратора напряжений. К сожалению, прямую запись формулы относительно  $\alpha_T$  или  $\sigma_n$  здесь привести невозможно из-за ее громоздкости.

### Сравнительный анализ результатов

Для верификации адекватности модели, определяющей критическое состояние, построены графики зависимости  $\sigma_n^{bc}/\sigma_{0,2}$  от  $\alpha_m^{bc}$  (рис. 3). В расчетах использованы распространенные в судостроении конструкционные стали феррито-перлитного класса в состоянии поставки (10, 22К, 50, Ст3сп, 37ХН3А, 30ХГСА и др.). Механические характеристики этих сталей приведены в табл. 1, а некоторые результаты расчетов представлены в работах [10, 1] и других публикациях.

Таблица 1 – Характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	m	$\varphi_k$
10	320	190	0,17	0,73
Ст3сп	450	270	0,16	0,71
22К	540	310	0,16	0,69
50	680	350	0,16	0,62
37ХН3А	1014	743	0,12	0,6
30ХГСА	1750	1360	0,09	0,44

Предложенный критерий применим для оценки опасности дефектов в сварных соединениях, локализованных в зоне сплавления (см. рис. 1). 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 многоосности и использования билинейной диаграммы деформирования, дают критические напряжения несколько отличающиеся от напряжений, рассчитанных по другим критериям (см. рис. 3). В целом при высокой концентрации напряжений (порядка  $\alpha_T > 35$ ) напряжения  $\sigma_n^{bc}$ , рассчитанные по предлагаемому критерию, приближаются к значениям, получаемым по модели (3), однако для области значений  $7,3 < \alpha_T < 25$   $\sigma_n^{bc}$  они становятся значительно 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 ее механических характеристик. Точки пересечения зависимостей с моделью (3) наблюдаются при разных значениях  $\alpha_T$  и  $\sigma_n^{bc}$ , и их положение зависит также от марки стали.



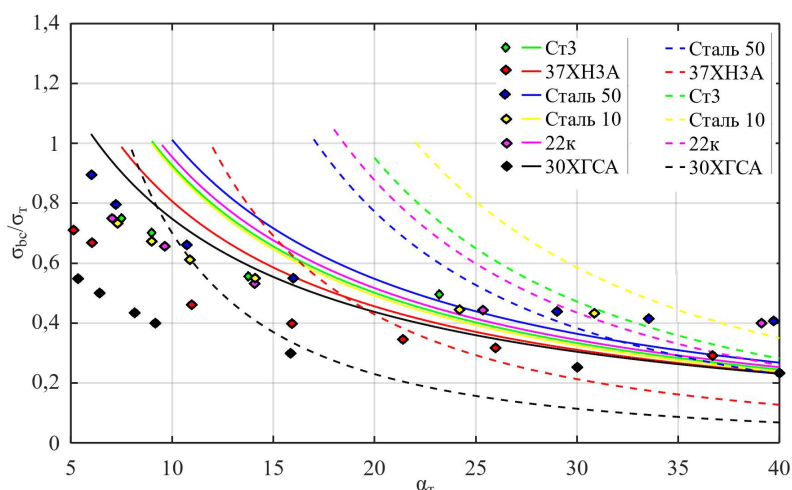


Рис. 3. Изменение относительного уровня безопасных напряжений внешней нагрузки  $\sigma_{bc}^{bc}/\sigma_{0,2}$  от  $\alpha_m$  для трещиноподобных концентраторов по различным моделям: сплошные кривые – формула (5); пунктирные – формула (3); маркеры – формулы (7)-(11)

Учет объемного напряженного состояния в трещиноподобных дефектах сказывается на снижении допустимых напряжений зарождения и развития повреждений, особенно от границы перехода, когда дефект можно считать трещиноподобным, до  $\alpha_T$  порядка 17, причем в большей степени для сталей средней и низкой прочности. Очень вероятно, что для не трещиноподобных дефектов (обычных концентраторов), когда  $\alpha_T \ll 7,3$ , критерий учета объемного состояния и начального разрушения по условию (11) будет давать заниженные опасные напряжения, гарантируя большой запас прочности и отсутствие процесса образования и развития повреждений от концентратора. Для таких концентраторов необходимо использовать другие критерии, например, описанные в [12, 13].

Учет трехмерного напряженного состояния в моделях приводит к снижению критической пластической деформации до разрушения при статическом растяжении образцов, что свидетельствует о выполнении условия (11) до полного исчерпания пластичности материала. Аналогичные исследования показывают, что более глубокие концентраторы вызывают более значительное локальное повышение предела текучести в их вершине. Экспериментальные данные подтверждают отсутствие пластического течения при чисто гидростатическом нагружении, разрушение происходит хрупко. Однако в зоне концентратора объемное напряженное состояние не является стабильным при увеличении внешней нагрузки, что приводит к бифуркации – образованию трещины или перераспределению пластических деформаций. При этом, первая компонента нормальных напряжений может оставаться неизменной величиной, и условие (11) может не нарушаться. 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 параметры бифуркации и повысить точность предсказания образования макротрещины в очаге. Более того, анализ эволюции напряженно-деформи-

рованного 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.

Полученный 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.

Экспериментальные данные подтверждают отсутствие пластического течения при чисто гидростатическом нагружении для определенного класса конструкций, разрушение в этом случае носит хрупкий характер. Однако, в области концентрации напряжений, при возрастании внешней нагрузки, стабильность трехмерного напряженного поля нарушается, что приводит к точке бифуркации, проявляющейся в образовании микродефекта или перераспределении пластических деформаций. А при циклических нагрузках, вероятность нарушения этого поля тем больше, чем больше становится циклическая нагрузка.

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.

### **Список литературы**

1. 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.
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. Суров, 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. Турмов Г.П. Расчет прерывистых связей на прочность с учетом концентрации напряжений. - Владивосток: ДВГУ, 1984. - 152 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. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения. - М.: Физматлит, 2021. - 208 с.
9. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов. - М.: МГУ, 1976. - 184 с.
10. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1976. - 184 с.
11. Ямалеев К.М., Гумерова Л.Р. Структурные аспекты разрушения металла нефтепроводов. - Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. - 144 с.
12. 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.
13. 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.

*Поступила в редакцию 12 ноября 2024 г.*