

Конференция памяти профессора П.Ф. Папковича
**КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ОБРАЗОВАНИЯ НАЧАЛЬНЫХ МАКРОТРЕЩИН
В КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ
ИЛИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Молоков К.А., Новиков В.В., ДВФУ, Владивосток, Россия

Разработан критерий предельного состояния, учитывающий нелинейное деформирование материала и многоосное напряженное состояние в вершинах концентраторов при плоской деформации. Анализ показал существенное влияние жесткости напряженного состояния на критический теоретический коэффициент концентрации напряжений. Если коэффициент концентрации в вершине достигает критического уровня, такой концентратор (дефект) следует рассматривать как развивающуюся макротрещину. На основе разработанного критерия предельного состояния для вершины концентратора представлены точечные расчеты допустимого уровня внешней нагрузки и критического коэффициента концентрации напряжений соответствующему образованию начальных разрушений. Выполнены сравнительные расчеты с учетом изменения многоосности напряженного состояния в вершине трещиноподобного концентратора при использовании билинейной и степенной аппроксимаций диаграмм деформирования материала.

A limit state criterion has been developed that takes into account the nonlinear deformation of the material and the multiaxial stress state at the vertices of the concentrators during plane deformation. The analysis showed a significant influence of the stiffness of the stress state on the critical theoretical stress concentration coefficient. If the concentration coefficient at the apex reaches a critical level, such a concentrator (defect) should be considered as a developing macrofracture. Based on the developed criterion of the limiting state for the top of the concentrator, point calculations of the permissible level of external load and the critical stress concentration coefficient corresponding to the formation of initial failures are presented. Comparative calculations have been performed taking into account changes in the multiaxis of the stress state at the tip of a crack-like concentrator using bilinear and power-law approximations of material deformation diagrams.

Постановка проблемы. Концентраторы напряжений в сварных соединениях, например, подрезы, несплавления, поры, а также конструктивные особенности, вызывающие значительную концентрацию напряжений, способствуют снижению прочности корпусных судовых конструкций. Это особенно ярко выражено при циклических нагрузках, которые способствуют раннему возникновению начальных разрушений – образованию трещин в вершинах концентраторов. Особенно опасным является появление макротрещин в протяженных концентраторах, характерных для крупногабаритных конструкций. Подобные трещины быстро распространяются приводя к полной потере несущей способности. Существующие методы оценки надежности не учитывают нелинейное поведение материала, изменение напряженного состояния (НС) и его жесткости в вершинах трещиноподобных концентраторов при значительных деформациях в малых объемах, характерных для таких концентраторов.

Разработанный в работе критерий, созданный для степенной и билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования материала, призван более точно прогнозировать возникновение начальных несплошностей в трещиноподобных концентраторах напряжений при плоской деформации.

Расчетные предпосылки. Для упрочняющихся материалов циклическое нагружение в зоне острого концентратора напряжений повышает вероятность хрупкого разрушения или возникновения несплошностей при плоской деформации.

Хрупкое разрушение вблизи острого концентратора напряжений может быть вызвано различными причинами [1]. С учетом принятия допущения о линейной зависимости повышения напряжений текучести в области вершины концентратора

($\sigma_2/\sigma_1 = q \neq const$) получено выражение:

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

Для предельного случая, когда внешняя нагрузка σ_H равна пределу текучести $\sigma_{0,2}$, и теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_T = 7,3$, имеет место достаточно близкое соотношение между нормальными компонентами к соотношениям их для трещины. При таких значениях концентратор можно считать трещиноподобным и, как легко видеть из (1), пропорциональность q будет изменяться в зависимости от значений α_T и σ_H .

Действующие напряжения в вершине концентратора находятся из решения упругой задачи по билинейной аппроксимации истинной диаграммы деформирования:

$$\sigma_i^y = \sigma_{0,2} + (S_{отр} - \sigma_{0,2})(\alpha_T\sigma_H - \sigma_{0,2})/(Ee_{кр} - \sigma_{0,2}), \quad (2)$$

или степенной

$$\sigma_i^y = \sigma_{0,2}^{1-m^2} (\alpha_T \sigma_H)^{2m/(m+1)}, \quad (3)$$

где $S_{отр}$ – 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.

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

Однако при плоском НС (за счет многоосности), первая главная компонента нормальных напряжений σ_1 увеличивается, и для вершины трещиноподобного концентратора напряжений истинные напряжения можно записать через отношение компонент следующим образом:

$$\sigma_i^y = \sqrt{[(\sigma_1 - q\sigma_1)^2 + (q\sigma_1 - \mu_T(1+q)\sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \mu_T(1+q)\sigma_1)^2]}/2, \quad (4)$$

где q – вычисляется по формуле (1) для трещиноподобного концентратора; μ_T – коэффициент Пуассона для пластического состояния материала. Положим, что критическое состояние, при котором неизбежно будет развиваться поврежденность для вершины концентратора, будет соответствовать условию достижения

$$\sigma_1 = S_{отр}. \quad (5)$$

Тогда заменив в (4) σ_1 на $S_{отр}$ и приравняв (4) к (2) можно численно найти все пары соответствующих искомым величин α_T и σ_H , удовлетворяющих неизбежному развитию повреждений у вершины трещиноподобного концентратора напряжений. Следует отметить, что целевая формула выражается в конечных функциях. Однако прямую запись ее относительно α_T или σ_H здесь привести невозможно из-за ее громоздкости.

Результаты и выводы. С целью проверки результатов физической адекватности модели критерия построены графики зависимостей для критического состояния $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ как функции от α_T (рис. 1). При этом взяты широко распространенные в судостроении конструкционные стали феррито-перлитного класса в состоянии поставки (сталь 10, 22К, 50, Ст3сп, 37ХНЗА, 30ХГСА и др.). Механические характеристики присутствуют в [2, 1] и других источниках.

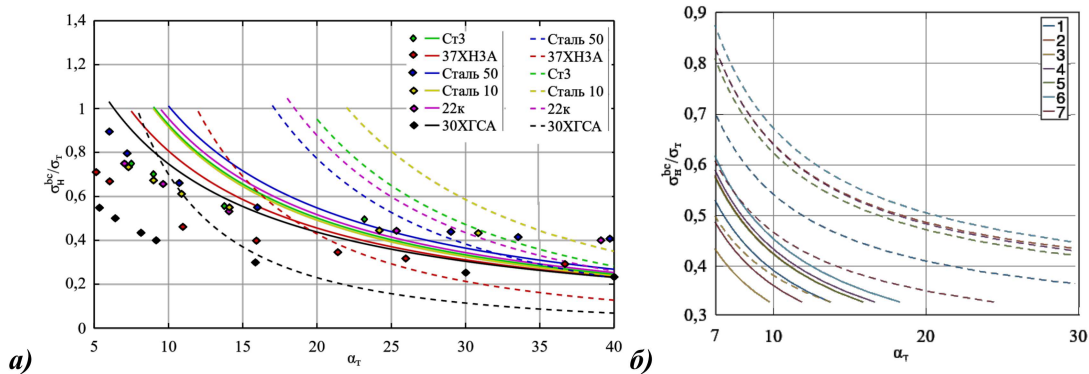


Рис. 1. Изменение относительного уровня безопасных напряжений внешней нагрузки $\sigma_H^{bc}/\sigma_{0,2}$ от α_T для трещиноподобных концентраторов по различным моделям (а): сплошные кривые и пунктирные – результаты [1]; маркеры – вычисления по (1)-(5) (билинейная аппроксимация), (б): сплошные и пунктирные – степенная и билинейная аппроксимация соответственно по (1)-(5), номера (1-7) – стали 09Г2С, 10, 30ХГСА, 22К, Ст3сп, 50 и 37ХНЗА, соответственно

Полученный критерий для трещиноподобных дефектов достаточно корректно описывает изменение предельных напряжений образования несплошностей, хотя – и не для всех степеней теоретического коэффициента концентрации. Результаты, полученные по данному критерию, являются более устойчивыми, особенно для области, где концентратор можно отнести к трещиноподобным дефектам.

Установлено и проверено на косвенных опытах, что текучесть при гидростатической нагрузке для некоторых конструкций не наступает, а материал разрушается в этом случае только хрупко. Однако в очаге концентратора при увеличении внешней нагрузки объемное напряженное состояние не может оставаться достаточно стабильным, поэтому неизбежно наступит момент бифуркации. В

итоге произойдет нарушение сплошности (начальные разрушения) или перераспределение пластических деформаций.

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. 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. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1976. - 184 с.