УДК 621.791:629.02
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
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

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

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

Аннотация

В статье проводится анализ напряженно-деформированного состояния элементов судовых конструкций при сложном нагружении и концентрации напряжений. Рассматривается применение зависимостей сдвига и нормальных напряжений для оценки предельного состояния конструкций. Предложены новые аналитические подходы и зависимости, основанные на степенных аппроксимациях диаграмм деформирования, что позволяет более точно определять истинные напряжения чистого сдвига с учетом развития пластических деформаций. Получено хорошее согласование аппроксимаций напряжений сдвига и растяжения с экспериментальными данными для отдельных сталей на участке деформаций от 0 до 0,04. Разработан метод преобразования диаграмм одноосного растяжения в диаграммы чистого сдвига, основанный на теории подобия, дающий достаточно хорошее совпадение с известными экспериментальными данными. Результаты исследования дают возможность более точно прогнозировать эксплуатационный ресурс элементов судовых конструкций при сложном нагружении и находящихся в условиях повышенной концентрации напряжений.

Ключевые слова: *концентратор напряжений, модуль сдвига, диаграмма деформирования, одноосное растяжение, напряжение сдвига, теория подобия, сложное нагружение, предел выносливости.*

Тезисы

Постановка проблемы. 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. В составе корпуса судна всегда присутствуют продольные связи с резко изменяющимся поперечным сечением, что вызывает концентрацию жесткости и нормальных напряжений на кромке закругления [1, 2, 3].

Поперечный изгиб и скручивание прерывистых судовых конструкций вызывают сложное напряженно-деформированное состояние с выраженными сдвиговыми деформациями. Это также приводит к концентрации напряжений и образованию трещин, особенно в машиностроительных деталях и сварных соединениях с отверстиями, галтелями и выступами, что может вызвать преждевременное разрушение

материала, особенно при наличии дефектов и циклического нагружения.

Для оценки трещиностойкости и разрушения материала необходимо учитывать характеристики сталей и гетерогенность сварных соединений. В зоне концентратора возникают пластические деформации, а это требует применения моделей диаграмм растяжения или чистого сдвига с упрочнением для определения истинных напряжений или деформаций в условиях сложного напряженного состояния.

Таким образом, понимание особенностей напряженно-деформированного состояния узлов конструкций с концентрацией напряжений в условиях появления и развития макротрещин является важной задачей для обеспечения прочности и долговечности судовых конструкций.

О получении и подобии диаграмм чистого сдвига. Аналитический подход, основанный на зависимости Рамберга-Осгуда, позволяет аппроксимировать полную диаграмму растяжения и преобразовывать её в диаграмму чистого сдвига. Рассмотрим эту зависимость для полной диаграммы растяжения:

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

где E – модуль Юнга, МПа; m – коэффициент степенного упрочнения при растяжении стандартного образца; 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 использования четвертой энергетической теории прочности была получена следующая связь $(\gamma_i - \tau_i)$ при чистом сдвиге с сопоставлением её с экспериментальной кривой:

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

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

В механике разрушения важным параметром, характеризующим интенсивность напряженного состояния вблизи концентраторов напряжений таких, как трещины, является эффективный коэффициент интенсивности напряжений (КИН) $\mathrm{K_e}$.

При смешанном нагружении, когда в конструкции действуют как нормальные, так и касательные напряжения, $\mathrm{K_e}$ зависит от коэффициентов интенсивности напряжений $\mathrm{K_I}$ и $\mathrm{K_{II}}$, соответствующих механизмам отрыва и сдвига [4]

$$\mathrm{K_e} = \sqrt{\mathrm{K_I^2} + \mathrm{K_{II}^2}}. \quad (3)$$

Эта формула учитывает вклад обоих механизмов разрушения и позволяет оценить общую интенсивность напряженного состояния вблизи концентратора. 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 материалы могут испытывать значительные пластические деформации сдвига, непосредственно влияющие на КИН.

Коэффициенты $\mathrm{K_I}$ и $\mathrm{K_{II}}$, характеризующие механизм отрыва и сдвига (тип II) классически выражаются как $\mathrm{K_I} = \sigma_\mathrm{H}\sqrt{\pi \mathrm{l}}\cdot \mathrm{Y_I}$; $\mathrm{K_{II}} = \tau_\mathrm{H}\cdot\sqrt{\pi \mathrm{l}}\cdot \mathrm{Y_{II}}$, где $\sigma_\mathrm{H}, \tau_\mathrm{H}$ – приложенные нормальные и касательные напряжения внешней нагрузки, l – характерный размер трещины; $\mathrm{Y_I}, \mathrm{Y_{II}}$ – безразмерные параметры, зависящие от геометрии конструкции и типа нагружения.

Упругопластическое решение для чистого сдвига. Пусть напряжения сдвига действуют в плоскости берегов поверхностной трещины, вызывая их скольжение в

направлении поперек фронта трещины (тип II). На основе деформационной теории пластичности для вершины трещины, 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 для задачи выражения интенсивности касательных напряжений при чистом сдвиге с упрочнением в окрестности вершины трещины:

$$\tau_i = \left(\sigma_{0,2}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} (\tau^y)^2 \Big/ \left[G\varepsilon_{0,2} \cdot 3^{\left(\frac{1}{2m}+1\right)} \right] \right)^{\frac{m}{2m+1}}, \qquad (4)$$

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 (4) в (2) приобретает вид

$$\gamma_i = \left(\frac{1}{G}\right) \left[\tau^y + \left(\sigma_{0,2}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} (\tau^y)^2 \Big/ \left[G\varepsilon_{0,2}\, 3^{\left(\frac{1}{2m}+1\right)} \right] \right)^{\frac{m}{2m+1}} \right]. \qquad (5)$$

Согласно уравнению (2), напряжения из упругого решения легко выражаются через теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений α_τ. С учетом этого получим уравнения (4) и (5) от τ_H:

$$\tau_i = \left(\sigma_{0,2}^{\left(1+\frac{1}{m}\right)} (\alpha_\tau \tau_H)^2 \Big/ \left[G \cdot \varepsilon_{0,2} \cdot 3^{\left(1+\frac{1}{2m}\right)} \right] \right)^{\frac{m}{2m+1}}; \qquad (6)$$

$$\gamma_i = \left(\frac{1}{G}\right) \left[\alpha_\tau \tau^y + \left(\sigma_{0,2}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} (\alpha_\tau \tau_H)^2 \Big/ \left[\varepsilon_{0,2} \cdot G \cdot 3^{\left(\frac{1}{2m}+1\right)} \right] \right)^{\frac{m}{2m+1}} \right]. \qquad (7)$$

Зависимость между деформациями чистого сдвига и истинными напряжениями τ_i сдвига, через известные коэффициенты G, m и $\sigma_{0,2}$, будет выражаться формулой

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G} + \tau_i \cdot \sqrt{3\varepsilon_{0,2} \left(\tau_i \sqrt{3}\right)^{\left(\frac{1}{m}\right)} \Big/ \left[G\sigma_{0,2}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \right]}. \qquad (8)$$

Последняя зависимость позволяет находить коэффициент m по результатам минимальных опытных данных на образцах для кручения.

Расчетный анализ показывает, что полученная зависимость может быть использована для решений методом сечений в теории трещин и оценки предела выносливости (для типа II) по предлагаемому принципу [5]. При этом открываются возможности для определения критических длин трещин в жестких точках при сложной нагрузке по результатам известных предельных деформаций, коэффициента упрочнения и предела текучести материала.

Результаты исследования дают возможность более точно прогнозировать эксплуатационный ресурс элементов судовых конструкций при сложном нагружении и находящихся в условиях повышенной концентрации напряжений и могут быть использованы для разработки методов контроля и предупреждения распространения трещин и других дефектов.

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] 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.

[4] 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.

[5] Молоков К.А. Применение силового подхода к методу сечений в теории трещин при упругопластической постановке задачи для оценки пределов выносливости материалов / К.А. Молоков, // Молодежь и научно-технический прогресс: Материалы региональной научно-практической конференции: Владивосток, 01 мая – 30 2025 года. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2025. – С.74-79. – EDN FQPLNB.