

## РАСЧЁТЫ ДЕТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ С УЧЁТОМ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ

Букатый А.С.<sup>1</sup>, Букатый С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет им. академика С.П. Королёва, г. Самара, [bukaty@inbox.ru](mailto:bukaty@inbox.ru)

<sup>2</sup>ФГБУВО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва», г. Рыбинск, [bukaty\\_sa@mail.ru](mailto:bukaty_sa@mail.ru)

*Ключевые слова: жёсткость напряжённого состояния, прочность, моделирование.*

В настоящее время расчёты на прочность ответственных деталей ведут исходя из механических свойств материалов, определяемых стандартными методами при растяжении-сжатии. При этом не учитывается влияние вида напряжённого состояния (НС) на механические свойства материалов, которое определяется характеристикой жёсткость напряжённого состояния (ЖНС), впервые введённой Я.Б. Фридманом. ЖНС зависит от соотношения нормальных и касательных или главных напряжений и определяет способность материалов пластически деформироваться в процессе разрушения. Это особенно важно учитывать для деталей, работающих в малоцикловой области, так как их работоспособность и долговечность зависит от способности материала пластически деформироваться.

Анализ различных выражений для ЖНС показал, что для расчётов наилучшим образом подходит критерий Г.А. Смирнова-Аляева [1]

$$K_{ж} = \frac{3\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – октаэдрическое напряжение;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Для оценки уровня напряжённости деталей в работе предлагается использовать выражение для удельной полной энергии упругой деформации  $U_0$ . Но для оптимизации размеров и формы деталей или диагностики – поиска наиболее опасных элементов и мест в конструкции предлагается безразмерный энергетический критерий

$$K_{Uy} = \frac{U_0}{U_{0\text{пред}}} = \frac{1}{\sigma_T^2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (2)$$

где  $U_{0\text{пред}}$  – предельная энергия, определяемая пределом текучести материала  $\sigma_T$  при растяжении.

Для диагностики наиболее нагруженных опасных мест в области концентраторов напряжений деталей в качестве комплексного критерия  $K$  следует использовать произведение критериев ЖНС  $K_{ж}$  и энергетического  $K_{Uy}$

$$K = K_{ж} \cdot K_{Uy} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{\sigma_T^2 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}. \quad (3)$$

Для поиска наиболее опасных мест следует на основе анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) сначала по критерию  $K_{Uy}$  выявить наиболее нагруженные области. Затем на основе критерия  $K$  по его наибольшей величине  $K_{\text{max}}$  и близким к нему значениям определяют области с наибольшей вероятностью образования микро- и макротрещин.

Изложенный метод апробирован на примере анализа причин разрушения основного элемента авиационного шасси – Траверсы Ил-76, изготавливаемой из сплава ВТ-22. Испытания траверс на многоцикловую усталость выявили преждевременные разрушения в местах, не совпадающих с расположением максимальных напряжений. При этом расчёт в пакете ANSYS Workbench НДС траверсы показал отсутствие пластических деформаций. Анализ НДС с использованием комплексного критерия  $K$  показал наличие двух опасных зон – на рис. 1, показаны стрелками позиции 1 и 2, в которых значения критерия  $K$  принимают наибольшие значения: в области поз. 1 с  $K_{\text{max}} = 0,749$ , где образовалась трещина с последующим ростом в

направлениях области поз. 2, где  $K = 0,606$ , и далее к области поз. 3 с максимальной величиной критерия ЖНС  $K_{ж} = 2,431$ . При этом расположение областей с наибольшей величиной энергетического критерия  $K_{Uy}$  – позиция 4 и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  – позиция 5 значительно отличается от фактического места расположения очага и роста трещины. В областях 1, 2 и 3, расположенных внутри детали, возникает объёмная концентрация напряжений со сложным НДС и повышенной ЖНС, что стало причиной образования и роста усталостной трещины. Следовательно,

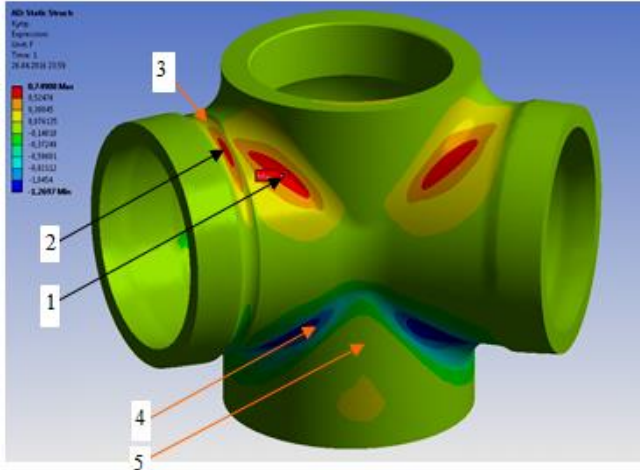


Рис. 1 – Результаты анализа НДС траверсы  
Расположение максимальных значений критериев:

- 1 –  $K_{упр\_max} = 0,749$ ; 2 –  $K_{упр\_max} = 0,606$ ;  
3 –  $K_{ж\_max} = 2,431$ ; 4 –  $\sigma_{i\ max} = 797,86$  МПа;  
5 –  $K_{Uy\_max} = 0,726$

критерии  $K$  и  $K_{ж}$  адекватно отражают наиболее опасные области, подтверждают эффективность изложенного метода диагностики и могут использоваться для оптимизации размеров и других геометрических параметров конструкции ответственных деталей.

Необходимо отметить, что расчёт НДС стандартных образцов с концентраторами напряжений с учётом влияния ЖНС на механические характеристики материалов точность определения коэффициентов концентрации напряжений и главных напряжений в расчётах на прочность повышается до 25 % и интенсивности напряжений до 38 %. Эти дополнительные резервы прочности деталей в настоящее время не учитываются.

### Список литературы

1. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчёта операций пластической обработки материалов. 2-е изд., переработ. и доп. М.-Л.: Машгиз, 1961. 463 с.

### Сведения об авторах

Букатый Алексей Станиславович, д-р техн. наук, доцент. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, биомеханика.

Букатый Станислав Алексеевич, д-р техн. наук, профессор. Область научных интересов: механика разрушения и малоцикловая усталость, остаточные напряжения и деформации.

### STRENGTH SOLUTIONS OF PARTS BASED ON STRESS STATE STIFFNESS

Bukatyi A.S.<sup>1</sup>, Bukatyi S.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara national research university, Samara, [bukaty@inbox.ru](mailto:bukatyi@inbox.ru)

<sup>2</sup>FSBEI 'RSATU named after P.A. Soloviev, Rybinsk, [bukaty\\_sa@mail.ru](mailto:bukatyi_sa@mail.ru)

*Keywords: stress state stiffness, strength, residual stress and strains modeling.*

In the bound of this research shown the necessity to use the parameter of the stress state stiffness, determined by the G. A. Smirnov-Alyayev criterion for strength calculating of the most loaded parts. The method for estimating of the level of tension of parts and diagnostic of the most critical zones of parts, based on dimensionless energy and complex criteria, is proposed. The effectiveness of the method, which can be used not only to diagnose critical zones, but also to optimize the geometric parameters of the design of critical parts, is shown.