

Букатый С.А., Букатый А.С., Зотов Е.В.

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОТВЕТСТВЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Надёжность и ресурс основных авиационных деталей достигают путём обеспечения нормируемых коэффициентов запаса прочности n , определяемых по максимальной величине напряжений

$$n \geq \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{экв}}} \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ – предельные напряжения, обусловленные свойствами материала, конструктивно-технологическими факторами и условиями эксплуатации детали; $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные максимальные рабочие напряжения в наиболее нагруженном элементе.

При исследовании проблемы разрушения важно учитывать способность материалов разрушаться хрупко или пластично в зависимости от внешних условий, в т.ч. и от вида напряжённого состояния, т.е. соотношения нормальных и касательных напряжений. Твёрдые тела становятся тем более пластичными, чем больше гидростатическое давление. Увеличение уровня всесторонних растягивающих напряжений уменьшает предельную пластичность металлов. Таким образом, способность материалов к значительной пластической деформации зависит от вида напряжённого состояния (НС), характеристика которого получила название «жесткость напряжённого состояния» (ЖНС). Исследованиями установлено, что независимо от типа НС перед разрушением в малом объёме материала начинается локализация пластических деформаций, величина которых определяет тип разрушения – *хрупкое разрушение отрывом* при отсутствии или очень малых пластических деформациях и *вязкое разрушение сдвигом* при существенных пластических деформациях. Следовательно, ЖНС характеризует не только способность материалов пластически деформироваться, но и определяет работоспособность деталей под действием статических и переменных циклически изменяющихся нагрузок. Это особенно важно учитывать для деталей, работающих в малоцикловой области, т.к. их работоспособность и долговечность напрямую зависят от способности материала пластически деформироваться. При этом скорость роста трещин под действием переменных нагрузок зависит от пластических свойств материала. Поэтому при выборе геометрических параметров ответственных

деталей и конструкций необходимо руководствоваться критериями, учитывающими не только прочностные характеристики материала, но и ЖНС.

Проведённые расчёты и анализ показал, что из всех критериев для характеристики ЖНС наилучшим образом подходит критерий Г.А. Смирнова-Аляева

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

где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – октаэдрическое напряжение; σ_i – интенсивность нормальных напряжений. Данный критерий с нулевым значением при сдвиге обладает свойством монотонности: разделяет области растяжения и сжатия соответственно с положительными и отрицательными значениями: $K_{ж} = \pm 1$. При этом критерий $K_{ж}$ более чувствителен к соотношениям величин главных напряжений и его величина увеличивается до $+\infty$ и $-\infty$ при равномерном всестороннем растяжении и сжатии соответственно.

Предельная пластичность материала зависит от жёсткости напряжённого состояния. Кроме того, переход материала в предельное состояние, соответствующее началу разрушения, зависит не только от ЖНС, но и от уровня напряжённости, которую наилучшим образом характеризует удельная потенциальная энергия упругой деформации

$$U_{0y} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (3)$$

где E – модуль продольной упругости, μ – коэффициент Пуассона.

Поэтому для оценки работоспособности деталей, оптимизации их размеров и формы или диагностики – поиска наиболее опасных элементов в конструкции, необходимы критерии, учитывающие оба вышеуказанных фактора при выполнении условия прочности (1). В задачах диагностики или оптимизации конструкции деталей удобнее пользоваться безразмерными критериями. Критерий $K_{ж}$ представлен в безразмерном виде. Поэтому энергетический критерий представим как отношение U_{0y} к некоторой предельной величине $U_{0\text{ пред}}$. Величину $U_{0\text{ пред}}$ получим из выражения (3) как энергию, необходимую для появления в материале пластических деформаций при испытании образцов на растяжение

$$U_{0\text{ пред}} = \frac{\sigma_T^2}{2E}, \quad (4)$$

где σ_T – напряжение, равное физическому или условному пределу текучести материала.

Тогда энергетический критерий для деталей, работающих в упругой области, будет иметь следующий вид

$$K_{Uy} = \frac{U_0}{U_{\text{опред}}} = \frac{1}{\sigma_T^2} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \right]. \quad (5)$$

Для диагностики наиболее нагруженных областей деталей и элементов конструкций в качестве основного комплексного критерия K следует использовать произведение критериев ЖНС $K_{ж}$ (2) и энергетического K_{Uy} (5)

$$K = K_{ж} \cdot K_{Uy} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \right]}{\sigma_T^2 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}. \quad (7)$$

В задачах диагностики конструкции и определения её «слабых» мест, где в процессе эксплуатации начинается зарождение микро- и макротрещин, при анализе НДС детали нужно искать области с максимальной величиной критериев: $K = \max K$ (8).

Если расчёты на прочность показывают несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями $\sigma_{\text{экв}}$ или критериями (7), то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия $K_{ж}$.

Данные критерии позволяют анализировать напряжённо-деформированное состояние (НДС) и могут быть использованы для диагностики и совершенствования деталей, подвергающихся действию статических или циклически изменяющихся нагрузок в многоцикловой области, где напряжения не превышают предела текучести. Оптимизация конструкции деталей, работающих в упругопластической области, позволяет существенно уменьшить уровень напряжений, за счёт чего величина пластических деформаций уменьшается. Поэтому данные критерии можно применять и за пределами упругости, что особенно важно для деталей, работающих в малоцикловой области.

Апробация комплексного критерия осуществлялась на детали – траверса Ил-76. Траверса является основным элементом шасси, воспринимающим повышенные нагрузки при взлёте и посадке воздушного судна ИЛ-76. Он изготавливается из титанового сплава ВТ-22. При испытаниях траверс на многоцикловую усталость были выявлены преждевременные разрушения в местах, не совпадающих с расположением максимальных напряжений. Расчёт НДС траверсы показал отсутствие пластических деформаций, поэтому для диагностики и определения очага зарождения микротрещин был проведён анализ НДС траверсы с использованием комплексного критерия $K_{\text{упр}}$. Расчёт НДС траверсы проводился на предприятии АО «Авиаагрегат» в программном пакете ANSYS Workbench.

Результаты расчётов показали наличие двух опасных зон (рис. 1, показаны стрелками позиции 1 и 2), в которых значение критерия $K_{упр}$ принимает наибольшие значения. Результаты расчётов соответствуют анализу разрушений, проведённому по результатам испытаний на многоцикловую усталость. Зоны с максимальными комплексными критериями соответствуют расположению областей с очагами микротрещин, которые при воздействии знакопеременных циклических нагрузок приводят к образованию трещины и разрушению центрального узла траверсы.

Согласно проведённым расчётно-экспериментальным исследованиям, зарождение макротрещины возникает в месте с наибольшим значением комплексного критерия $K_{упр} = 0,749$ (рис. 1, позиция 1), откуда растёт в направлении второго очага с величиной критерия $K_{упр} = 0,606$ (рис. 1, позиция 2) и далее в направлении области с максимальным критерием $K_{ж} = 2,431$ (рис. 1, позиция 3), характеризующим пониженную пластичность материала.

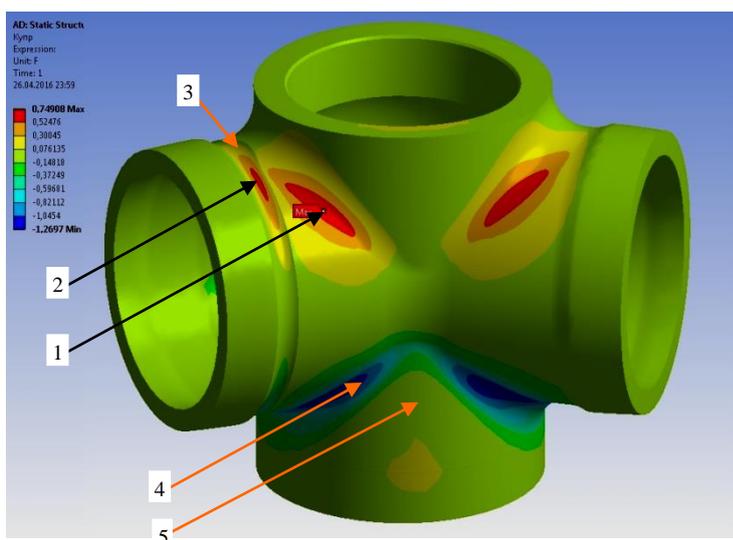


Рис. 1. Результаты анализа НДС траверсы.

Расположение максимальных значений критериев:

$$1 - K_{упр_max} = 0,749; 2 - K_{упр_max} = 0,606;$$

$$3 - K_{ж_max} = 2,431; 4 - \sigma_{i_max} = 797,86 \text{ МПа};$$

$$5 - K_{Уу_max} = 0,726$$

Необходимо отметить, что расположение областей с наибольшей величиной энергетического критерия $K_{Уу}$ (рис. 1, позиция 4) и интенсивности напряжений σ_i (рис. 1, позиция 5) существенно отличаются от фактического места расположения очага трещины. При этом области 1, 2 (расположенные снаружи детали) и область 3 (расположенная внутри детали), выявленные путём анализа НДС по разработанным критериям $K_{ж}$ и $K_{упр}$, образуют совокупность

концентраторов напряжений, создающих сложное объёмное НДС и полностью соответствуют результатам испытаний. Изложенные результаты исследований подтверждают эффективность метода диагностики опасных мест на основе комплексного критерия $K_{упр}$ для анализа НДС и определения «слабых» мест элементов конструкций, а также для оценки их конструкционной прочности.