

Букатый А.С., Букатый С.А., Лунин В.В., Пешков П.А.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ ЖЁСТКОСТИ И СТЕПЕНИ ИХ НАГРУЖЕННОСТИ

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

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

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

Однако при исследовании проблемы разрушения следует учитывать способность материалов разрушаться хрупко или пластично в зависимости от внешних условий, в том числе и от вида напряжённо-деформированного состояния (НДС), то есть от соотношения нормальных и касательных напряжений. Одним из факторов, оказывающим большое влияние на вид напряжённого состояния и свойства материалов является гидростатическое давление, характеризуемое шаровым тензором $T_{\sigma 0}$. Многочисленные исследования влияния гидростатического давления сжатия на свойства металлов при растяжении показали, что пластичность материала под давлением резко возрастает. При этом растёт и истинное сопротивление разрыву S_k без какого-либо существенного

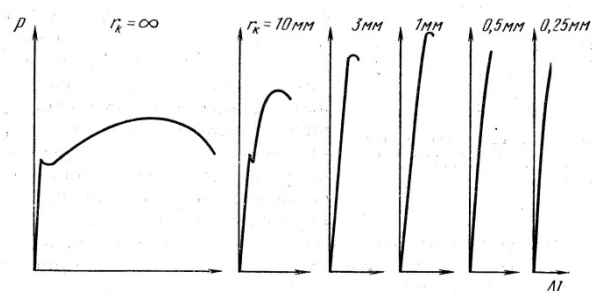


Рис. 1. Схемы диаграмм растяжения образцов

увеличения предела текучести и сопротивления малым пластическим деформациям.

Твёрдые тела становятся тем более пластичными, чем больше гидростатическое давление. Увеличение уровня всесторонних растягивающих напряжений уменьшает предельную пластичность металлов. Это

явление наблюдается, например, при растяжении нагрузкой P образцов с различными радиусами r_k концентраторов напряжений (рис. 1). Таким образом, способность материалов к значительной пластической деформации зависит от вида напряжённого

состояния, характеристика которого получила название «жёсткость напряжённого состояния» (ЖНС).

Исследованиями установлено, что независимо от типа напряжённого состояния 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 или 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, так как их работоспособность и долговечность напрямую зависит от способности материала пластически деформироваться. При этом скорость роста трещин под действием переменных нагрузок также 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

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

где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – октаэдрическое нормальное 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 $K_{\text{ж}} = \pm 1$. При этом критерий $K_{\text{ж}}$ более чувствителен к соотношениям величин главных напряжений и его величина соответственно увеличивается до $+\infty$ и $-\infty$ при равномерном всестороннем растяжении или сжатии соответственно.

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

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

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

В связи с этим 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 – физический или условный предел текучести материала.

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

$$K_{Uy} = \frac{U_0}{U_{0\text{ пред}}} = \frac{1}{\sigma_T^2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]. \quad (5)$$

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)

$$K = K_{ж} \cdot K_{Uy} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{\sigma_T^2 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}. \quad (6)$$

В задачах диагностики конструкции и определения её «слабых» мест, в которых в процессе эксплуатации начинается зарождение микро- и макротрещин, при анализе НДС детали необходимо искать области с максимальной величиной критерия K (6). Если расчёты на прочность показывают несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями $\sigma_{эКВ}$ или критериями, то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия $K_{ж}$. Оптимизацию конструкции деталей, работающих как в упругой, так и в упруго-пластической областях, следует проводить соответственно из условий $\min K$ (6).

При проектировании нового изделия задача определения необходимых размеров ответственных деталей с использованием разработанных критериев решается методом последовательных приближений следующим образом.

1. Исходя из конструктивных особенностей изделия и расчёта на прочность назначаются исходные размеры детали и создаётся её параметрическая конечно-элементная модель (КЭМ), необходимая для проведения прочностных оптимизационных расчётов. Для этого определяются изменяемые параметры детали и допустимые пределы их изменения.

2. На основе созданной КЭМ с начальными геометрическими параметрами производится расчёт НДС детали, определяются наиболее опасные области и проверяется выполнение условия (1). В зависимости от величины коэффициента запаса прочности n в соответствии с условием (1) уточняются параметры детали и пределы их изменения.

3. С помощью разработанных критериев анализируется НДС детали и уточняется расположение наиболее опасных областей детали $V_{оп}$.

4. С использованием специализированных оптимизационных пакетов и методик на основе условия (6) определяются оптимальные величины изменяемых параметров конструкции детали. Анализ НДС для сокращения длительности расчётов осуществляется в выделенных областях $V_{оп}$.

5. Проводится расчёт НДС оптимизированной детали и проверяется выполнение условия прочности (1) в наиболее опасных элементах.

6. В случае невыполнения условия (1) корректируются найденные параметры при соблюдении условия подобия и проверяется выполнение условия (1). В случае необходимости значительного изменения геометрических параметров уточняются области их изменения и повторяются действия по п. 4–5 до выполнения требования по коэффициенту запаса прочности по всему объёму детали с необходимой точностью.

Данные критерии позволяют анализировать 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 уменьшается величина пластических деформаций. Поэтому данные критерии можно применять и за пределами упругости, что особенно важно для деталей, работающих в малоцикловой области.