

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Букатый С.А.^{1,2}, Букатый А.С.^{1,2}, Зотов Е.В.^{1,2}, Бычков Д.А.²

¹Самарский университет, г. Самара, bukaty@inbox.ru

²АО «Авиаагрегат», г. Самара

Ключевые слова: жёсткость напряжённого состояния, хрупкое разрушение, вязкое разрушение, критерии напряжённого состояния, критерии оптимизации конструкции.

Надёжность и ресурс основных авиационных деталей, как правило, достигается путём обеспечения нормируемых коэффициентов запаса прочности n . При исследовании проблемы разрушения также важно учитывать способность металлов разрушаться хрупко или пластично в зависимости от внешних условий и от вида напряжённого состояния, характеризующего соотношением нормальных и касательных напряжений.

В общем случае напряжённое состояние (НС) в точке характеризуется тензором напряжений T_σ , который можно разложить на шаровой тензор T_{σ_0} и девиатор напряжений D_σ . Одним из факторов, оказывающим большое влияние на вид напряжённого состояния и свойства материалов, является гидростатическое давление, характеризующее шаровым тензором T_{σ_0} . Многочисленные исследования влияния гидростатического давления сжатия на свойства металлов при растяжении показали [1], что пластичность материала под давлением резко возрастает. При этом растёт и истинное сопротивление разрыву S_k без какого-либо существенного увеличения предела текучести и сопротивления малым пластическим деформациям.

Таким образом, способность материалов к значительной пластической деформации зависит от вида напряжённого состояния, характеристика которого получила название «**жёсткость напряжённого состояния**» (ЖНС) [2]. Исследованиями [3] 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, так как их работоспособность и долговечность напрямую зависит от способности материала пластически деформироваться. 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 [4]

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

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

Для конструкционных достаточно пластичных материалов перед разрушением происходит локализация деформаций в наиболее нагруженной области деталей [3]. При этом 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, которую представим в следующем виде:

$$U_{0y} = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]$$

или в главных напряжениях:

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

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.

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 (2) как энергию, необходимую для появления в материале пластических деформаций при испытании образцов на растяжение

$$U_{0\text{ пред}} = \frac{\sigma_T^2}{2E}, \quad (3)$$

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

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

$$K_{Uy} = \frac{U_0}{U_{0\text{ пред}}} = \frac{1}{\sigma_T^2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (4)$$

В оптимизационных задачах – поиске оптимальных геометрических параметров деталей часто величина U_{0y} существенно меньше величины $U_{0\text{ пред}}$. Поэтому для повышения информативности и эффективности критерия следует в качестве предельной $U_{0\text{ пред}}$ в (4) принять величину $U_{0\text{ исх}}$, полученную в начальном расчёте

$$K_{Uy_0} = \frac{U_0}{U_{0\text{ исх}}} = \frac{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]_{\text{исх}}}. \quad (5)$$

Для диагностики наиболее нагруженных областей деталей и элементов конструкций в качестве основного комплексного критерия K следует использовать произведение критериев ЖНС $K_{ж}$ (1) и энергетического K_{Uy} (4)

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

а для задач оптимизационных

$$K_0 = K_{ж} \cdot K_{Uy_0} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \times \frac{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]_{\text{исх}}}. \quad (7)$$

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 $K = \max K$. Если расчёты на прочность показывают несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями $\sigma_{экв}$ или критериями (6), то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия $K_{ж}$.

Оптимизацию конструкции деталей, работающих как в упругой, так и в упругопластической областях, следует проводить соответственно из условий $K_0 \rightarrow \min K_0$.

При проектировании нового изделия задачу определения необходимых размеров ответственных деталей решают методом последовательных приближений. Для этого разработана методика оптимизации конструкции ответственных деталей ГТД.

Разработанные критерии могут быть использованы в задачах исследования длительной и циклической прочности теплонагруженных деталей ГТД, а также при разработке

эквивалентных опытных образцов для проведения эквивалентных испытаний на малоцикловую усталость, ползучесть и длительную прочность деталей сложной формы с концентраторами напряжений. Достоверность и эффективность критериев подтверждается результатами исследований [5, 6] а также в множестве других работ.

Список литературы

1. Бандес М. Механические свойства материалов под гидростатическим давлением. М.: Мир, 1973. С. 19-80.
2. Фридман Я.Б. Механические свойства материалов. М.: Оборонгиз, 1946. 424 с.
3. Пашков П.О. Пластичность и разрушение металлов. Л.: Судпромгиз, 1950. 259 с.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. – Л.: Машиностроение, 1968. 272 с.
5. Букатый С.А., Букатый А.С., Андреев И.Б. Разработка методики оптимизации параметров замкового соединения лопатка-диск типа «ёлка» / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. Ч. 2. № 3(27). С. 259-265.
6. Букатый С.А., Букатый А.С., Андреев И.Б. Оптимизация конструкции ответственных деталей ГТД на основе критериев напряжённого состояния / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, 2016. № 4 (39). С. 4-12.

Сведения об авторах

Букатый С.А., д.т.н., профессор кафедры сопротивления материалов, ведущий инженер АО «Авиаагрегат». Область научных интересов: механика разрушения и малоцикловая усталость, остаточные напряжения и деформации.

Букатый А.С., д.т.н., начальник лаборатории технологических проблем АО «Авиаагрегат», профессор кафедры сопротивления материалов. Область научных интересов: упрочняющие технологии и покрытия, остаточные напряжения и деформации.

Зотов Е.В., начальник цеха термической и упрочняющей обработки АО «Авиаагрегат». Область научных интересов: упрочняющие технологии и покрытия, остаточные напряжения и деформации.

Бычков Д.А., ведущий инженер АО «Авиаагрегат». Область научных интересов: упрочняющие технологии и покрытия, остаточные напряжения и деформации.

DEVELOPMENT OF THE CRITERIA FOR AVIATION PARTS OPTIMIZATION BASED ON STRESS STRAIN STATE STIFFNESS

Bukatyi S.A.^{1,2}, Bukatyi A.S.^{1,2}, Zotov E.V.², Bychkov D.A.²

¹Samara University, Samara, Russia, bukaty@inbox.ru

²JSC Aviaagregat, Russia

Keywords: stress state stiffness, fragile rupture, plastic rupture, stress state stiffness criterion, construction optimization

The dimensionless complex criterion is proposed to use for analysis of the stress-strain state with the purpose to diagnose the most vulnerable for damaging areas of aviation parts. The criterion includes the stress-strain stiffness criterion characterizing the stress-strain type and energetic criterion characterizing the material tension in the elasto-plastic areas. The energetic criterion includes the elastic and plastic components of energy. Applying of the complex criterion is considered for the diagnostic of the most vulnerable for damaging areas of parts and for optimization of the geometric parameters and shape according to criterion minimization condition. The criterion method is proposed for construction optimization of the most critical aviation parts under static or dynamic loadings in the low or high cycle fatigue.