

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ АНАЛИЗА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2016

А. С. Букатый кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, bukaty@inbox.ru

С. А. Букатый доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва, bukaty_sa@mail.ru

С целью диагностики опасных мест в ответственных деталях предлагается использовать для анализа их напряжённого состояния безразмерный комплексный критерий. Критерий включает коэффициент жёсткости напряжённого состояния (НС), характеризующий вид НС, и энергетический критерий, характеризующий напряжённость материала в упругопластической области. Энергетический критерий состоит из упругой и пластической составляющих энергий. Рассматривается применение комплексного критерия в режиме диагностики опасных мест детали и в режиме оптимизации её размеров и формы в заданных пределах с целью уменьшения напряжённости. Эффективность критерия показана на примере анализа напряжённо-деформированного состояния дисков газотурбинных двигателей. Показан пример изменения критериев при совершенствовании конструкции компрессорного диска.

Жёсткость напряжённого состояния, энергетический критерий, комплексный критерий, диагностика, оптимизация параметров деталей.

Цитирование: Букатый А.С., Букатый С.А. Разработка критериев анализа напряжённо-деформированного состояния деталей газотурбинного двигателя в упругопластической области // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 46-52. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-46-52

Введение

Основные детали (диски, валы), определяющие ресурс газотурбинных двигателей (ГТД), работают в условиях малоциклового усталости и длительной прочности. При этом в наиболее нагруженных областях – зонах концентрации напряжений – в каждом цикле нагружения возникают упругопластические деформации. Поэтому возникает необходимость расчётного диагностирования состояния деталей и выявления наиболее нагруженных областей с учётом условий деформирования и типа напряжённо-деформированного состояния (НДС), которые существенно влияют на циклическую долговечность деталей.

Комплексный критерий анализа НДС

Известно, что увеличение составляющих всестороннего растяжения – шарового тензора напряжений – существенно увеличивает жёсткость напряжённого состояния (НС) и уменьшает предельную пластичность материала. Однако в практике проектирования ГТД оценку конструкционной прочности основных деталей осуществляют на основе анализа НДС с использованием эквивалентных напряжений по энергетической теории Губера – Мизеса, аналитическое выражение которых совпадает с выражением интенсивности напряжений ($\sigma_{эkv} = \sigma_i$):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1)$$

В работе предлагается учитывать тип НС коэффициентом жёсткости напряжённого состояния [1; 2]

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

где σ_0 – среднее (октаэдрическое) напряжение $\sigma_0 = 1/3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$; σ_i – интенсивность напряжений (1).

Степень нагруженности деталей наилучшим образом характеризует удельная энергия, затраченная на упругопластическое деформирование материала, которую можно разделить на упругую и пластическую составляющие

$$\begin{aligned} U_0 &= U_{0y} + U_{0nl}, \\ U_{0y} &= \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \\ U_{0nl} &= (S_1\varepsilon_{1nl} + S_2\varepsilon_{2nl} + S_3\varepsilon_{3nl}), \end{aligned} \quad (3)$$

где S_i – средняя величина главных напряжений, действующих в материале в процессе его пластического деформирования; $\varepsilon_{i nl}$ – соответствующие пластические деформации; $i = 1, 2, 3$.

Обычно при упругопластическом нагружении равные или превышающие предел текучести σ_T напряжения действуют только в одном из главных направлений. В остальных двух направлениях пластические деформации в соответствии с законом Пуассона протекают при напряжениях, существенно меньших σ_T . Тогда выражения для напряжений S_i в случае растяжения при условии $\sigma_1(\varepsilon) > \sigma_T$ можно выразить следующим образом:

$$S_1 = \frac{1}{2}(\sigma_T + \sigma_1(\varepsilon_1)), \quad S_i = \frac{\sigma_i}{2\varepsilon_i}(\varepsilon_{iy} + \varepsilon_i),$$

где ε_{iy} – упругая составляющая деформаций; $\varepsilon_i = \varepsilon_{iy} + \varepsilon_{i nl}$ – полная деформация. При этом $i = 2, 3$ при растяжении или $i = 1, 2$ при сжатии.

В задачах диагностики опасных мест или оптимизации конструкции деталей удобнее пользоваться безразмерными критериями. Поэтому энергетический критерий представим как отношение U_0 к некоторой предельной величине $U_{0пред}$, которую представим из двух слагаемых:

$$U_{0пред} = U_{0y_пред} + U_{0nl_пред} = \frac{\sigma_T^2}{2E} + \sigma_{cp}e, \quad (4)$$

где σ_T – напряжение, равное физическому или условному пределу текучести материала; $\sigma_{cp} = 0,5(\sigma_T + \sigma_{max})$ – среднее напряжение на участке упрочнения диаграммы растяжения; $e = \ln(1 + \delta) - \ln(1 + \varepsilon_T)$ – натуральная деформация; δ – относительное

удлинение; $\varepsilon_T = \sigma_T / E$ – предельная упругая деформация материала. Тогда на основании (3) и (4) энергетический критерий будет иметь вид:

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0пред}} = \frac{U_{0y} + U_{0nl}}{U_{0y_пред} + U_{0nl_пред}}. \quad (5)$$

В результате получаем следующий комплексный критерий для анализа НДС деталей:

$$K_{y-nl} = K_{жс} \cdot K_U. \quad (6)$$

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 критерия (6)

$$K_{y-nl} = \max K_{y-nl}.$$

Если расчёты на прочность показывают не одну, а несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями $\sigma_{экв}$ или критериями (5), (6), то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия жёсткости НДС $K_{жс}$ (2).

На практике в ряде случаев величина $U_{0пред}$ может превышать U_0 более чем на порядок, что существенно уменьшает информативность критерия. В задачах диагностики это допустимо. Но в оптимизационных задачах величина критерия становится малочувствительной к изменению геометрических параметров исследуемых деталей. Поэтому в задачах оптимизации размеров и формы деталей для определения комплексного критерия в безразмерном виде предпочтительнее вместо предельной величины $U_{0пред}$ использовать величину удельной энергии деформаций в исходном состоянии $U_{0исх}$ в наиболее опасной – нагруженной области, существовавшую до начала процесса оптимизации конструкции детали. Тогда критерий (5) принимает вид

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0исх}} = \frac{U_{0y} + U_{0nl}}{(U_{0y} + U_{0nl})_{исх}}. \quad (7)$$

Оптимизацию конструкции деталей следует проводить из условия достижения минимальной величины критерия (6)

$$K_{y-nl} \rightarrow \min K_{y-nl}.$$

Результаты расчётно-экспериментальных исследований

В качестве иллюстрации эффективности разработанных критериев анализа НДС рассмотрим их применение в сопоставлении с результатами экспериментальных исследований НДС дисков газотурбинных двигателей [3; 4]. Расчётно-экспериментальные доводочные работы проводились с целью увеличения и подтверждения ресурса дисков. В связи с высокой концентрацией напряжений НДС в области концентраторов – шлиц в

ступице дисков – было упругопластическим. Поскольку НДС основных деталей ГТД в рабочем цикле близко к жёсткому отнулевому циклу нагружения, то эквивалентные циклы испытаний (ЭЦИ) опытных дисков приближали к рабочим. Испытания проводили на стенде УИР-3: двух дисков первой ступени компрессора низкого давления (КНД, материал ВТ3-1) с приблизительно одинаковой предварительной наработкой порядка 3500 циклов и двух дисков девятой и десятой ступеней компрессора высокого давления (КВД, материал ЭИ961-Ш) в составе двигателей Д-30КУ-154, а также одного диска вентилятора двигателя М70ФРУ (материал ВТ22И). Для сравнения с результатами испытаний на стенде приведены данные о разрушении в эксплуатации дисков первой ступени КНД Д-30КУ-154. Кроме того, рассмотрены также результаты испытаний дисков одиннадцатой ступени КВД двигателя Д-30КУ-154 (материал ЭИ-961Ш). Испытания дисков одиннадцатой ступени проводили после следующих ремонтных доработок: первой доработки – прошивки переднего и заднего ряда шлиц на увеличенный радиус $R = 0,65 \pm 0,1$ мм с целью уменьшения концентрации напряжений; второй доработки – срезки заднего ряда и аналогичной прошивки переднего ряда шлиц; третьей доработки – прошивки переднего и срезки заднего ряда шлиц и кольцевой части ступицы с контрольными отверстиями и вставкой вместо неё кольца. Указанные доработки были обусловлены появлением трещин после 2000 циклов нагружения: после первой доработки – в заднем ряде шлиц и после второй доработки – в контрольных отверстиях диска.

Таблица 1. Результаты расчётно-экспериментальных исследований малоциклового долговечности дисков ГТД

Наименование дисков	Контролируемые параметры				
	Среднее количество циклов до разрушения N циклов	Интенсивность напряжений σ_i , МПа	Критерий ЖНС $K_{ж}$	Критерий энергетический K_U	Критерий комплексный $K_{y-пл} = K_{ж} \cdot K_U$
0 ступень ГТД М70ФРУ материал ВТ-22	1710	1150	1,7804	0,1574	0,2802
первая ступень КНД Д-30КУ-154 материал ВТ3-1	6755	781	1,4997	0,0799	0,1199
первая ступень КНД Д-30КУ-154 (разрушение в эксплуатации)	5890	913	1,5284	0,1242	0,1899
Девятая и десятая ступень КВД Д-30КУ-154 материал ЭИ961-Ш	17200 (без разрушения)	837	1,8243	0,0567	0,1035

Таблица 2. Результаты расчётно-экспериментальных исследований малоцикловой долговечности дисков одиннадцатой ступени КВД Д-30КУ-154 после доработок конструкции

Варианты доработки дисков материал ЭИ961-Ш	Контролируемые параметры				
	Среднее количество циклов до разрушения N циклов	Интенсивность напряжений σ_i , МПа	Критерий ЖНС $K_{ж}$	Критерий энергетический K_U	Критерий комплексный $K_{y-пл} = K_{ж} \cdot K_U$
В режиме диагностики					
После первой доработки	2000	896	1,9207	0.1679	0.3225
После второй доработки	2000	864	1,7214	0.1274	0.2193
После полной доработки	23500 (без разрушения)	881	1,3780	0.1090	0.1502
В режиме оптимизации					
После первой доработки	2000	896	1,9207	1 (исходный)	1.9207
После второй доработки	2000	864	1,7214	0,7627	1.3128
После полной доработки	23500 (без разрушения)	881	1,3780	0,6547	0.9022

Результаты, приведённые в табл. 1, 2, показывают хорошую корреляцию разработанных критериев с долговечностью дисков. При этом критерии показывают по сравнению с интенсивностью напряжений (эквивалентными напряжениями) значительно большую чувствительность к изменению типа напряжённого состояния и степени нагруженности дисков. Большая эффективность и адекватность критериев проявляется в процессе совершенствования конструкции – доработки дисков одиннадцатой ступени КВД двигателя Д-30КУ-154 как в режиме диагностики, так и в режиме оптимизации. Так, например, после второй доработки дисков, несмотря на их пониженную долговечность, интенсивность напряжений $\sigma_i = 864$ МПа существенно меньше, чем после третьей доработки при $\sigma_i = 881$ МПа.

Выводы

Разработанные безразмерные энергетический и комплексный критерии, характеризующие напряжённость и тип (жесткость) упругопластического напряжённо-деформированного состояния, могут быть использованы для анализа НДС деталей в режимах диагностики опасных мест и оптимизации конструкции деталей.

Достоверность и эффективность критериев подтверждается результатами малоцикловых испытаний дисков компрессоров ГТД.

Установлено, что по сравнению с интенсивностью напряжений (эквивалентными напряжениями) разработанные критерии обладают большей адекватностью и информативностью при изменении НДС деталей. При этом величина комплексного критерия в режиме оптимизации конструкции деталей значительно (в 5 раз) больше по сравнению с режимом диагностики опасных мест.

Показана эффективность применения критериев для оптимизации конструкции ответственных деталей на примере совершенствования – доработки конструкции дисков одиннадцатой ступени КВД Д-30КУ-154.

Библиографический список

1. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. Л.: Машиностроение, 1968. 272 с.
2. Agogino A.M. Notch effects, stress state, and ductility // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. 1978. V. 100, Iss. 4. С. 348-355. DOI:10.1115/1.3443503
3. Букатый А.С., Букатый С.А., Лёшин Д.П., Округин А.А. Совершенствование конструкции и технологии изготовления ответственных деталей ГТД на основе энергетического метода и исследования жёсткости напряжённого состояния // Сб. материалов IV международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012)». Часть 1. Рыбинск: Рыбинский государственный авиационный технический университет, 2012. С. 308-312.
4. Портер А.М., Букатый С.А., Лёшин Д.П. Исследование достоверности прогнозирования малоциклового долговечности деталей газотурбинных двигателей на основе уравнения Мэнсона // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5 (47), ч. 4. С. 142-150.

DEVELOPMENT OF THE CRITERIA OF ANALYZING THE STRESS-STRAIN STATE OF GAS TURBINE ENGINE PARTS IN THE ELASTOPLASTIC RANGE

© 2016

- | | |
|---------------------|---|
| A. S. Bukaty | Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor, Department of Strength of Materials, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, bukaty@inbox.ru |
| S. A. Bukaty | Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Applied Mechanics, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyev, Rybinsk, Russian Federation, bukaty_sa@mail.ru |

A dimensionless complex criterion is proposed to be used for the analysis of the stress-strain state of gas turbine parts with the purpose of diagnosing their most vulnerable areas. The criterion includes the stress-strain stiffness criterion characterizing the stress-strain type and the energy criterion characterizing the stress level of the material in elastoplastic areas. The energy criterion includes the elastic and plastic components of energy. Application of the complex criterion for the diagnostics of the most vulnerable areas of gas turbine parts and for the optimization of the geometric parameters and shape with the aim of minimizing the stress level is discussed. The efficiency of the criterion is illustrated by the example of stress-strain state analysis of gas turbine disks and by the example of varying the parameters in the process of optimization of the compressor disk structure.

Stress-strain state stiffness, energy criterion, complex criterion, diagnostics, parametric optimization of part parameters.

Citation: Bukaty A.S., Bukaty S.A. Development of the criteria of analyzing the stress-strain state of gas turbine engine parts in the elastoplastic range. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 46-52. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-46-52

References

1. Smirnov-Alyayev G.A. *Mekhanicheskie osnovy plasticheskoy obrabotki metallov. Inzhenernye metody* [Mechanical principles of plastic working of metals]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1968. 272 p.
2. Agogino A.M. Notch effects, stress state, and ductility. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 1978. V. 100, Iss. 4. C. 348-355. DOI: 10.1115/1.3443503
3. Bukatyy A.S., Bukatyy S.A., Leshin D.P., Okrugin A.A. Sovershenstvovanie konstruktsii i tekhnologii izgotovleniya otvetstvennykh detaley GTD na osnove energeticheskogo metoda i issledovaniya zhestkosti napryazhennogo sostoyaniya. *Sb. materialov IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii i aviadvigatelestroenii (TM-2012)»*. Part 1. Rybinsk: Rybinsk State Aviation Technical University Publ., 2012. P. 308-312. (In Russ.)
4. Porter A.M., Bukatyy S.A., Leshin D.P. Research of the validity of forecasting low cycle durability of gas turbine engine parts based on Manson's equation. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 5 (47), part 4. P. 142-150. (In Russ.)