

лей ГТД поверхностным пластическим деформированием / С.А. Букатый, А.С. Букатый // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 10(67). – С. 45–49.

2. Букатый, С. А. Автоматизированная система определения остаточных напряжений / С.А. Букатый, А.С. Букатый // *Механика и процессы управления. Труды XXXVIII Уральского семинара*. – 2008. – Том 1. – С. 191–194.

УДК 621.438:519.24

*Букатый С.А., Букатый А.С., Зотов Е.В.,  
Ахтамьянов Р.М., Баранова В.Р.*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РАЗРУШЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Основные детали (диски, валы и др.), 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.

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 (Huber M.T., Mises R.), аналитическое выражение которых совпадает с выражением интенсивности напряжений ( $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$ ):

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

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

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

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

Степень нагруженности деталей наилучшим образом характеризует удельная энергия, затраченная на упругопластическое деформирование материала. На основе удельной энергии разработан энергетический критерий:

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0\text{пред}}} = \frac{U_{0\text{y}} + U_{0\text{пл}}}{U_{0\text{y\_пред}} + U_{0\text{пл\_пред}}}. \quad (3)$$

В результате получаем следующий комплексный критерий для анализа НС деталей:

$$K_{\text{y-пл}} = K_{\text{ж}} \cdot K_U. \quad (4)$$

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 (4):

$$K_{\text{y-пл}} = \max K_{\text{y-пл}}.$$

Если расчёты на прочность показывают не одну, а несколько областей с наибольшими и близкими по величине эквивалентными напряжениями  $\sigma_{\text{экв}}$  или критериями (3, 4), то наиболее опасными следует считать области с наибольшей положительной величиной критерия жёсткости НС  $K_{\text{ж}}$  (2).

На практике в ряде случаев величина  $U_{\text{опред}}$  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  $U_{\text{опред}}$  использовать величину удельной энергии деформаций в исходном состоянии  $U_{\text{исх}}$  в наиболее опасной – нагруженной области, существовавшую до начала процесса оптимизации конструкции детали. Тогда критерий (3) принимает следующий вид:

$$K_{\text{У}} = \frac{U_0}{U_{\text{исх}}} = \frac{U_{0\text{у}} + U_{0\text{пл}}}{(U_{0\text{у}} + U_{0\text{пл}})_{\text{исх}}} . \quad (5)$$

Оптимизацию конструкции деталей следует проводить из условия достижения минимальной величины критерия (4):

$$K_{\text{у-пл}} \rightarrow \min K_{\text{у-пл}} .$$

В качестве иллюстрации эффективности разработанных критериев анализа НС 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 НС 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 опытных дисков приближали к рабочим. Испытания проводили на стенде УИР-3: двух дисков 1 ступени компрессора низкого давления (КНД, материал ВТЗ-1) с приблизительно одинаковой предварительной наработкой порядка 3500 циклов и двух дисков 9 и 10 ступеней компрессора высокого давления (КВД, материал ЭИ961-Ш) в составе двигателей Д-30КУ-154, а также одного диска 0 ступени двигателя М70ФРУ (материал ВТ22И).

Для сравнения с результатами испытаний на стенде приведены данные о разрушении в эксплуатации дисков 1 ступени КНД Д-30КУ-154. Кроме того, рассмотрены также результаты испытаний дисков 11 ступени КВД двигателя Д-30КУ-154 (материал ЭИ-961Ш). Испытания дисков 11 ступени проводили после следующих ремонтных доработок: 1-й доработки – прошивки переднего и заднего ряда шлиц на увеличенный радиус  $R = 0,65 + 0,1$  мм с целью уменьшения концентрации напряжений; 2-й доработки – срезки заднего ряда и аналогичной прошивки переднего ряда шлиц; 3-й доработки – прошивки переднего и срезки заднего ряда шлиц и кольцевой части ступицы с контрольными отверстиями вставкой вместо неё кольца. Указанные доработки были обусловлены появлением трещин после ~2000 циклов нагружения: после 1-й доработки – в заднем ряду шлиц и после 2-й доработки – в контрольных отверстиях диска.

Результаты, приведённые в табл. 1 и табл. 2, показывают хорошую корреляцию разработанных критериев с долговечностью дисков.

**Таблица 1. Результаты расчётно-экспериментальных исследований малоцикловой долговечности дисков ГТД на стендах УИР-3**

Наименование дисков	Контролируемые параметры				
	среднее количество циклов до разрушения $N$ циклов	интенсивность напряжений $\sigma_i$ , МПа	критерий ЖНС $K_{ж}$	критерий энергетический $K_U$	критерий комплексный $K_{y-ш} = K_{ж} \cdot K_U$
0 ступень ГТД М70ФРУ материал ВТ-22	1710	1150	1,7804	0,1574	0,2802
1 ступень КНД Д-30КУ-154 материал ВТЗ-1	6755	781	1,4997	0,0799	0,1199
1 ступень КНД Д-30КУ-154 (разрушение в эксплуатации)	5890	913	1,5284	0,1242	0,1899
9 и 10 ст. КВД Д-30КУ-154 материал ЭИ961-Ш	17200 (без разруш.)	837	1,8243	0,05673	0,1035

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 11 ступени КВД двигателя Д-30КУ-154 как в режиме диагностики, так и в режиме оптимизации.

**Таблица 2. Результаты расчётно-экспериментальных исследований малоцикловой долговечности дисков 11 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 $\sigma_i$ , МПа	критерий ЖНС $K_{ж}$	критерий энергетический $K_U$	критерий комплексный $K_{у-пл} = K_{ж} \cdot K_U$
<b>В режиме диагностики</b>					
после 1-й доработки	2000	896	1,9207	0,16793	0,32253
после 2-й доработки	2000	864	1,7214	0,127426	0,21934
после полной доработки	23500 (без разруш.)	881	1,3780	0,10902	0,15022
<b>В режиме оптимизации</b>					
после 1-й доработки	2000	896	1,9207	1 (исх.)	1,9207
после 2-й доработки	2000	864	1,7214	0,7627	1,3128
после полной доработки	23500 (без разруш.)	881	1,3780	0,6547	0,9022

### *Библиографический список*

1. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. – Инженерные методы. – Ленинград: Машиностроение, 1968. – 272 с.
2. Агоджино, А.М. Влияние надрезов, напряжённое состояние и пластичность / А.М. Агоджино // Тр. Амер. о-ва инж.-мех.; пер. с англ. – Москва: Мир, 1978. – № 4. – С. 12–19.
3. Букатый, А.С. Совершенствование конструкции и технологии изготовления ответственных деталей ГТД на основе энергетического метода и исследования жёсткости напряжённого состояния /

А.С. Букатый, С.А. Букатый, Д.П. Лёшин, А.А. Округин // Научно-технические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012). Материалы IV международной научно-технической конференции. В 2-х частях. Рыбинск: РГАТУ имени П.А.Соловьёва, 2012. – Ч. 1. – С. 308–312.

4. Портер, А.М. Исследование достоверности прогнозирования малоциклового долговечности деталей ГТД на основе уравнения Мэнсона / А.М. Портер, С.А. Букатый, Д.П. Лёшин // Вестник СГАУ. – 2014. – № 5 (47). – Ч. 4. – С. 142–150.

УДК 621.787

*Букатый А.С., Швецов А.Н., Лунин В.В.,  
Мухин А.Ю., Сараев А.С.*

## **НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ШАССИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок, является важной задачей, стоящей перед авиационными производствами. Решение указанной задачи достигается применением упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования. Наиболее распространёнными методами упрочнения валов являются пневмодробеструйная обработка, алмазное выглаживание, обкатка роликом. Наличие на валах посадочных поверхностей с жёсткими технологическими допусками значительно усложняет процесс назначения режимов упрочняющей обработки. Целью данной работы является разработка методик, позволяющих на стадии проектирования технологического процесса изготовления валов осуществить расчёт-