

УДК 620.178.3:620.171.32

**М.Б. МИЛЕШКИН, И.В. БИБЛИК***Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЛОПАТОК ГТД

*Рассмотрена возможность применения специального расчетно-экспериментального метода, основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций, для оценки влияния эксплуатационных условий нагружения на долговечность лопаток ГТД. Показана возможность определения степени влияния различных видов поврежденных лопаток ГТД (от малоциклового усталости, многоциклового усталости и коррозии) на их долговечность. Приведена методология комплексной оценки повреждаемости лопаток ГТД при разнородных видах нагружений в условиях высокотемпературной газовой среды.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, расчетно-экспериментальный метод, разрушение, повреждаемость, долговечность.

### 1. Введение и постановка задачи

Прогресс в области турбостроения и повышение эффективности турбомашин определяются качеством и эксплуатационными характеристиками их основных деталей. Бесперебойная и надежная работа оборудования турбомашин является важнейшей задачей энергетического производства.

Лопатки турбомашин работают в тяжелых термодинамических условиях. Они подвергаются сильному воздействию центробежной силы, изгибающему и пульсирующему влиянию рабочей среды, вызывающему вибрации лопаток, в которых легко могут быть возбуждены резонансные колебания, а также действию процессов высокотемпературной газовой коррозии [1].

Нагрузки, действующие на лопатку, разделяют по характеру действия на статические и динамические. Статические и динамические нагрузки, длительно воздействуя на лопатку, вызывают накопление в ней микроскопических повреждений, развитие и объединение которых приводит к появлению трещин и разрушению. Физические механизмы накопления повреждений в настоящее время исследованы недостаточно, однако существуют многочисленные эмпирические модели для оценки работоспособности и долговечности лопаток.

В зависимости от эксплуатационных условий нагружения лопаток ГТД, принято различать повреждаемость от статических нагрузок, циклическую повреждаемость по механизму малоциклового усталости и повреждаемость при воздействии динамических нагрузок по механизму многоциклового усталости [1, 2]. При этом механизмы накопления

повреждений могут различаться в зависимости от материала и температуры.

В связи с тем, что лопатки ГТД работают при значительных вибрационных нагрузках, основным требованием к их материалам является высокое сопротивление усталости. Усталость представляет собой крайне опасный вид разрушения деталей машин из-за фактора внезапности и полного выхода их из строя. Проблема усталости может быть решена только в том случае, если будут разработаны достаточно надежные методы, позволяющие прогнозировать зарождение усталостной трещины, описать процесс ее развития и предсказать момент окончательного разрушения с учетом влияния основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Трещины в лопатках турбины, возникающие в процессе эксплуатации, являются одним из наиболее характерных и распространенных дефектов.

Ускоряющее влияние коррозионной среды на эти процессы приводит к преждевременным разрушениям как при статическом, так и при циклическом нагружении. Коррозионное влияние среды на материал, находящийся под длительным действием статических напряжений, приводит к снижению длительной прочности.

Коррозионная среда влияет как на многоцикловою, так и на малоцикловою прочностью. Влияние коррозионных сред на усталостную прочность обычно больше, чем на длительную прочность.

Как правило, для оценки степени повреждаемости материала элемента конструкции в процессе эксплуатации используется гипотеза линейного суммирования повреждений [3].

Гипотеза линейного суммирования – простейшая модель накопления повреждений, при этом она не учитывает порядок приложения нагрузок (историю нагружения). Поэтому использовать ее для оценки долговечности необходимо с большой осторожностью в связи с возможными ошибками, для исключения которых необходимо проведение экспериментов по ее проверке для конкретных материалов и режимов нагружения.

## 2. Оценка возможности применения компьютерного моделирования

В условиях высокотемпературной газовой среды при одновременном воздействии многоциклового и малоциклового нагружений, а также повреждений от длительной статической нагрузки условие суммирования повреждений лопатки примет вид [4]:

$$D_{\Sigma} = D_{\dot{n}\dot{o}} + D_{i \dot{o}\dot{o}} + D_{\dot{o}\dot{n}\dot{o}} + D_{\dot{e}\dot{i} \dot{\delta}} = 1,$$

где  $D_{\Sigma}$  – суммарная повреждаемость лопатки;  $D_{\dot{n}\dot{o}}, D_{i \dot{o}\dot{o}}, D_{\dot{o}\dot{n}\dot{o}}, D_{\dot{e}\dot{i} \dot{\delta}}$  – повреждаемости от статических, малоцикловых и усталостных нагружений и от действия коррозионно-активной среды соответственно.

Чрезвычайно высокая сложность оценки повреждаемости лопаток турбин с учетом разнородности видов нагружения в условиях наличия коррозионно-активной среды, очевидно, требует разработки новых подходов к проблеме моделирования эксплуатационной повреждаемости.

С целью исследования закономерностей взаимного влияния составляющих эксплуатационных нагрузок на исчерпание ресурса лопаток ГТД и прогнозирования их долговечности в настоящей работе был применен специальный расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) [5, 6], основанный на имитационном компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций.

Как было показано ранее [7, 8] РЭМ позволяет моделировать «промежуточную поврежденность» материала (поврежденность в процессе эксплуатации) и оценивать ее влияние на прочностную надежность при усталостном и длительном статическом нагружении с определением пределов выносливости и длительной прочности лопаточных жаропрочных сплавов [7, 8].

Под поврежденностью в РЭМ подразумевается количество разрушенных структурных элементов при нагружении модели материала с определенным шагом нагружения [5].

Ниже приведены результаты применения РЭМ для оценки влияния степени поврежденности от различных видов нагружения лопаток ГТД на их долговечность.

## 3. Результаты исследования

В настоящей работе проведено исследование закономерностей взаимного влияния составляющих нагрузок на исчерпание ресурса лопаток турбин, изготовленных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ765 (ХН70ВМЮТ), работающих при температурах до 750-800 °С.

Механические характеристики сплава ЭИ765 для двух температур приведены в табл. 1 [9, 10].

Таблица 1  
Механические характеристики сплава ЭИ765

Температура, °С	Механические характеристики			
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа
600	600	970	20	1,90
750	580	710	14	1,75

Будем рассматривать накопление повреждений в материале лопатки при ее нагружении как процесс, протекающий во времени. При этом накопление повреждений по механизмам многоциклового и малоциклового усталости будем рассматривать независимо друг от друга, не учитывая их взаимодействие. Несмотря на то, что РЭМ позволяет проводить оценку несущей способности элементов конструкций при любом сочетании повреждающих факторов [11], необходимо учитывать, что в лопатках ГТД накопление повреждений по механизмам многоциклового и малоциклового усталости имеет место в эксплуатационных (полетных) циклах, которые представляют собой последовательность режимов: например, запуск и прогрев двигателя, выход на «взлет», «останов» и др.

На рис. 1, 2 в качестве примера приведены результаты компьютерного моделирования поведения сплава ЭИ765 при малоцикловом нагружении для двух температурных уровней.

Из приведенных результатов видно, что, зная величину амплитуды малоциклового нагружения (размах деформации), можно определить длину максимальной на данный момент трещины (рис. 2).

Кроме того, можно говорить о том, что для данной амплитуды цикла (размаха деформаций) существует время работы лопатки (в циклах нагружения), когда в ней не возникают повреждения от малоциклового усталости, а при известной наработке в циклах – сколько трещин возникло и какой длины, т.е. оценить степень малоциклового повреждаемости.

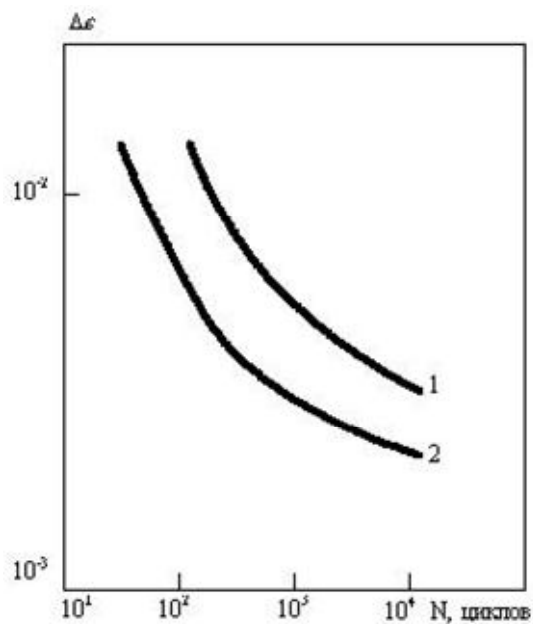


Рис. 1. Зависимость числа циклов до разрушения от размаха деформации ( $\Delta\varepsilon$ ) при двух температурах (1 – 600 °C; 2 – 750 °C).

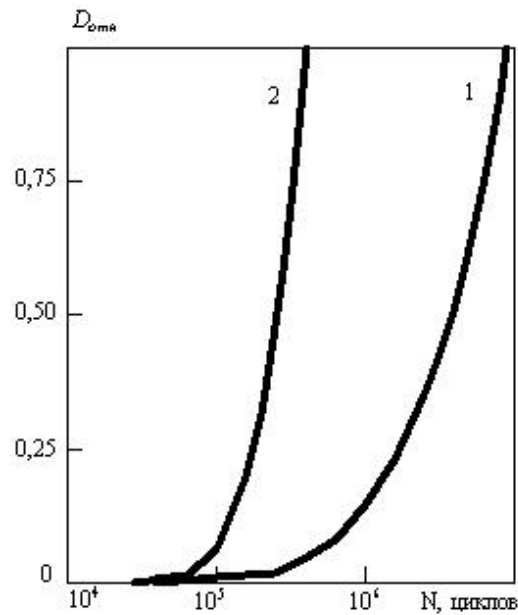


Рис. 3. Зависимость относительной поврежденности ( $D_{отн}$ ) от числа циклов при многоцикловом нагружении с амплитудой 450 МПа (1 – 600 °C; 2 – 750 °C).

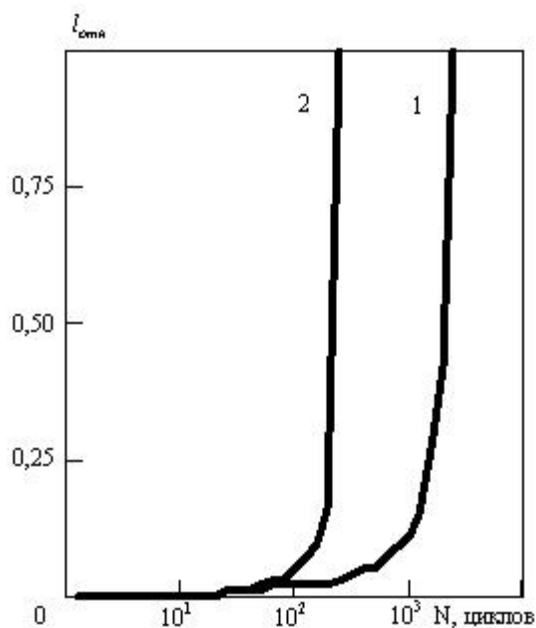


Рис. 2. Изменение относительной длины трещины ( $l_{отн}$ ) в процессе малоциклового нагружения ( $\Delta\varepsilon = 6 \cdot 10^{-3}$ ) при двух температурах (1 – 600 °C; 2 – 750 °C).

Как было показано ранее [6], РЭМ позволяет получать кривые усталости и при многоцикловом нагружении. В настоящей работе результаты компьютерного моделирования поведения сплава ЭИ765 при многоцикловой усталости представлены на рис. 3, на котором приведена зависимость степени поврежденности материала от числа циклов нагружения для двух температур.

В работе [7] была установлена возможность получения диаграмм длительной прочности для лопаточных жаропрочных сплавов. Оценка степени влияния статической нагрузки от центробежных сил, действующих на лопатку, на ее долговечность проводилась с учетом диаграммы длительной прочности для исследуемого сплава. Диаграмма длительной прочности сплава ЭИ765, полученная с помощью РЭМ, приведена на рис. 4. Видно хорошее совпадение расчетных значений длительной прочности со справочными данными.

По диаграмме длительной прочности определялось влияние степени повреждаемости от малоциклового усталости, многоциклового усталости и от коррозионных повреждений на долговечность лопаток ГТД.

При этом для оценки влияния степени усталостной поврежденности на долговечность лопаток с помощью РЭМ можно использовать два подхода – по распределению длин трещин, возникших за определенное число циклов нагружения для выбранной амплитуды цикла, и по степени поврежденности за это же число циклов.

Так, например, предположив, что воздействие малоциклового и многоциклового усталости на лопатку приводит к изменению относительной повреждаемости на 35 % ( $D_{i\delta\delta} + D_{\delta\delta\delta} = 0,35$ ) и зная зависимость степени повреждаемости от времени при действии статической нагрузки (равной, допустим, 560 МПа), можем определить какому числу шагов нагружения (времени) соответствует степень по-

вреждаемости  $D_{\text{нб}} = 0,65$ . С учетом коррозионных повреждений (в предположении, что за время эксплуатации относительная глубина коррозии составила, например, 0,18), получаем, что долговечность лопатки снизилась с  $5 \cdot 10^3$  часов до  $10^3$  часов (положение точки + на рис. 4 определяет изменение долговечности).

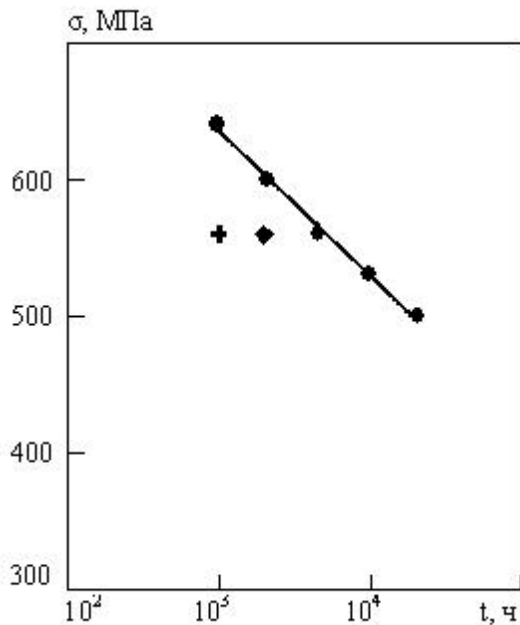


Рис. 4. Диаграмма длительной прочности для  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  (● – значения, полученные с помощью РЭМ, прямая – диаграмма, соответствующая справочным данным [10]).

Кроме того, возможное влияние коррозионных повреждений ( $D_{\text{эт}} \delta$ ) на долговечность лопаток ГТД проводилось и другим способом. Предполагалось, что изменение толщины лопатки от коррозии ( $\Delta d$ ) в процессе эксплуатации происходит по линейному закону, так, что

$$\Delta d = 1 - 0,00015t,$$

где  $t$  – время, ч.

При этом предположении расчет проводился следующим образом. Через определенный интервал времени (определенное число шагов нагружения) в модель материала РЭМ вносились коррозионные повреждения глубиной, соответствующей этому интервалу времени, согласно выбранному закону изменения толщины лопатки. В результате проведенных расчетов оказалось, что при таком законе уменьшения толщины лопатки ее долговечность снижается с  $5 \cdot 10^3$  часов до  $2 \cdot 10^3$  часов (◆ на рис. 4).

Естественно, что расчеты с применением РЭМ должны проводиться с учетом распределения напряжений по сечениям лопаток, которое носит дос-

таточно сложный характер и зависит от целого ряда факторов. Поэтому оценку влияния эксплуатационных условий нагружения на долговечность лопаток ГТД следует проводить по различным сечениям.

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований показано, что разработанный расчетно-экспериментальный метод, основанный на имитационном компьютерном моделировании, позволяет проводить оценку степени влияния эксплуатационных условий нагружения на долговечность лопаток ГТД.

Рассмотрена возможность применения компьютерного моделирования для учета влияния повреждений, возникающих в лопатке ГТД от малоцикловой и многоцикловой усталости, а также от коррозионных повреждений на ее долговечность, используя диаграмму длительной прочности, которая также может быть получена с помощью РЭМ.

Показана возможность определения степени влияния различных видов повреждений на долговечность лопаток как путем непосредственного введения соответствующих дефектов в модель материала РЭМ, так и путем сравнения и суммирования накопленной поврежденности на определенном этапе эксплуатации.

В дальнейшем предполагается исследовать особенности решения задач оценки повреждаемости лопаток ГТД в процессе термомеханического нагружения, когда доминирующим механизмом повреждения являются термоусталостные повреждения, а основным показателем для оценки работоспособности лопаток – сопротивление термоциклическим нагрузкам.

#### Литература

1. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружениях / В.Т. Троценко [и др.]. – К.: Наук. думка, 1981. – 316 с.
2. Прочность материалов и конструкций / Под ред. В.Т. Троценко. – К.: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
4. Гишваров А.С. Учет разнородных видов механических и термических нагружений лопаток турбин в условиях высокотемпературной газовой среды / А.С. Гишваров, М.Н. Давыдов // Вестник УГАТУ / УГАТУ. – Уфа, 2008. – Т. 11, №2 (29). – С. 24–29.
5. Милешкин М.Б. Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов

и оценки прочностной надежности элементов конструкций / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений: международный научно-технический сборник / Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – К., 2006. – Вып. 26. – С. 302-310.

6. Милешкин М.Б. Новый подход к оценке остаточного ресурса элементов конструкций / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // *Deformation & Fracture of Materials (DFM2006): сборник статей по материалам Первой междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов»*: Москва, 2006. – Т.2. – С. 771-773.

7. Милешкин М.Б. Применение компьютерного моделирования для определения предела выносливости жаропрочных сплавов / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // *Вестник двигателестроения*. – 2007. – С. 90-94.

8. М.Б. Милешкин. Применение компьютерного

моделирования для прогнозирования длительной прочности лопаточных жаропрочных сплавов / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // *Вестник двигателестроения*. – 2008. – С. 111-115.

9. Химушин Ф.Ф. *Жаропрочные стали и сплавы* / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969. – 432 с.

10. Масленков С.Б. *Стали и сплавы для высоких температур: справочное издание. Кн. 2* / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. – 832 с.

11. Милешкин М.Б. Комплексная оценка влияния различных видов повреждений материала на несущую способность элементов конструкций / М.Б. Милешкин, И.В. Библик // *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: сборник научных трудов*. – Х.: ИПМаш НАНУ, 2000. – С. 369-374.

*Поступила в редакцию 1.06.2009*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

#### **ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЛОПАТОК ГТД**

*М.Б. Милешкін, І.В. Біблік*

Розглянуто можливість застосування спеціального розрахунково-експериментального методу, заснованого на комп'ютерному моделюванні процесу руйнування матеріалів і елементів конструкцій, для оцінки впливу експлуатаційних умов навантаження на довговічність лопаток ГТД. Показано можливість визначення ступеня впливу різних видів пошкоджень лопаток ГТД (від малоциклової, багатоциклової втоми і корозії на їх довговічність. Приведено методологію комплексної оцінки пошкоджуваності лопаток ГТД при різно-рідних видах навантажень в умовах високотемпературного газового середовища.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, розрахунково-експериментальний метод, руйнування, пошкоджуваність, довговічність.

#### **ESTIMATION OF INFLUENCE OF LOADING OPERATIONAL CONDITIONS ON DURABILITY OF GAS TURBINE ENGINE BLADES**

*M.B. Mileshkin, I.V. Biblik*

The opportunity of application of the special design-experimental method based on computer modelling of material and element of designs fractures, for an estimation of loading operational conditions influence on gas turbine engine blades durability is considered. The opportunity of definition of an influence degree of various kinds of damages of gas turbine engine blades (from low-cycle fatigue, high-cycle fatigue and corrosion) on its durability is shown. The methodology of a complex estimation of gas turbine engine blades damaging at loading diverse kinds in conditions of the high-temperature gas environment is resulted.

**Key words:** computer modelling, design-experimental method, fracture, damaging, durability.

**Милешкин Михаил Борисович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.

**Библик Ирина Валентиновна** – младший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.