

УДК 621.4.001.4

А. С. ГИШВАРОВ, М. Н. ДАВЫДОВ

## УЧЕТ РАЗНОРОДНЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Рассматривается методика комплексной оценки повреждаемости лопаток турбин газотурбинных двигателей при разнородных видах нагрузений в условиях высокотемпературной газовой среды. *Испытания ГТД; высокотемпературная коррозия; моделирование испытаний ГТД*

Известно, что надежность и ресурс газотурбинных двигателей определяются в основном элементами «горячей» части (рабочими и сопловыми лопатками, дисками турбин), подверженными действию статических, циклических, повторно-статических нагрузок, а также действию процессов высокотемпературной газовой коррозии.

Существующие методы испытаний лопаток турбин имеют низкий уровень воспроизведения повреждаемости или требуют большой длительности и затрат на испытания. Поэтому актуальной является задача разработки метода испытаний, обеспечивающего полное воспроизведение коррозионной повреждаемости лопаток в испытаниях совместно с повреждаемостью от механических и термических нагрузений, что позволит достоверно оценивать надежность лопаток турбин ГТД.

Вызывая поверхностное повреждение материала лопаток газовых турбин, коррозия оказывает существенное влияние на скорость развития в нем трещин и скорость протекания пластической деформации при высокой температуре. Ускоряющее влияние коррозионной среды на эти процессы приводит к преждевременным разрушениям как при статическом, так и при циклическом нагружениях.

Коррозионное влияние среды на материал, находящийся под длительным действием статических напряжений, приводит к снижению длительной прочности и тем больше, чем больше временной интервал нагрузки.

Сульфидно-оксидная коррозия материалов вызывает, наряду с уменьшением их долговечности под постоянной нагрузкой, увеличение скорости пластической деформации. Ползучесть в коррозионной среде происходит

с большей скоростью на установившейся ее стадии (во втором периоде). Это влияние увеличивается при понижении напряжения и повышении температуры.

Коррозионная среда влияет как на многоцикловую, так и на малоцикловую прочность. Влияние коррозионных сред на усталостную прочность обычно больше, чем на длительную прочность.

Термоусталостные повреждения лопаток в виде трещин на их кромках во многом являются следствием коррозионного воздействия среды. Влияние коррозионных сред на термическую усталость материалов проявляется как на стадии зарождения, так и на стадии развития трещин. Это способствует более раннему зарождению трещин и их развитию с большей скоростью, чем при испытаниях на воздухе.

В зонах концентрации термических напряжений, интенсивных диффузионных и химических процессов происходят необратимые изменения в структуре материала. Поэтому при исследовании прочности лопаток турбин основное внимание уделяется высокотемпературной газовой коррозии поверхностных слоев.

Характер и интенсивность высокотемпературных коррозионных повреждений лопаток турбин определяются следующими факторами:

- характеристиками коррозионной стойкости лопаточных материалов;
- антикоррозионными свойствами защитных покрытий;
- уровнями действующих статических и вибрационных нагрузок;
- температурой лопаток турбин;

- концентрацией коррозионно-активных веществ в продуктах сгорания топлива.

В настоящее время оценка коррозионной стойкости образцов лопаток турбин проводится:

- испытаниями образцов лопаток;
- испытаниями лопаток с частичной имитацией механических нагрузок на отдельных стендах и установках;
- испытаниями лопаток в системе газотурбинного двигателя в ускоренных эквивалентно-циклических испытаниях с имитацией всех видов нагружения: статического, циклического, повторно-статического и частично (по повреждаемости) имитацией влияния коррозионной среды.

Комплексная оценка надежности лопаток испытаниями в системе двигателя чрезвычайно дорога и проводится, как правило, на завершающих этапах его создания. К тому же такой метод оценки не позволяет проводить математическое моделирование процесса накопления повреждения лопатки, что необходимо для расчетной оценки повреждаемости лопаток в различных условиях эксплуатации, т. е. произвольного сочетания различных (механического и термического) видов нагружения в условиях высокотемпературной газовой коррозии.

Очевидно, что наиболее экономичными являются испытания образцов лопаток. Однако, как показывает практика, такие испытания пригодны для проведения только сравнительной оценки, т. е. не позволяют количественно оценивать повреждаемость или долговечность лопаток турбин.

Вопрос ускоренного моделирования коррозионной повреждаемости лопаток газотурбинных двигателей рассматривался авторами данной статьи ранее в работах, где был предложен метод ускоренной проверки надежности лопаток, основанный на реализации последовательности: подготовка образцов, травление, электрохимическая обработка, высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов, что позволяет более чем в 100 раз уменьшить длительность эксплуатационных испытаний [1].

Дополнительно был предложен метод [2], в котором воспроизводится повреждаемость от механических нагрузок и коррозионного воздействия путем предварительной химической обработки в электролите и термоциклического воздействия на элемент газовым потоком с агрессивной атмосферой  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , отличающийся тем, что сначала про-

водят химическую обработку в электролите, затем электрохимическую анодную обработку, далее механическое нагружение, состоящее из нагружения на вибростенде и статического нагружения, после чего термоциклическое воздействие в агрессивной атмосфере и далее механическое нагружение, причем данный цикл производят многократно. Естественно, данный метод повышает достоверность оценки надежности лопаток по сравнению с другими методами, но он не воспроизводит полную картину повреждаемости, поскольку совместное действие нагрузок заменяется последовательным.

Учитывая чрезвычайно высокую сложность оценки повреждаемости лопаток турбин с учетом разнородности видов нагружения в условиях наличия коррозионно-активной среды, очевидно, что моделирование повреждаемости возможно только с применением экспериментального исследования.

Поскольку объем эксперимента весьма значителен, то актуальным является решение вопроса о его планировании из условия получения требуемой точности моделирования при минимально возможных временных и материальных затратах.

Необходимо отметить, что решение задачи с применением планирования эксперимента осложнено тем, что моделируется динамический процесс, т. е. в модели накопления повреждаемости помимо факторов нагружения присутствует фактор времени. В частности, при оценке уровня коррозионной повреждаемости лопаток турбин необходимо располагать кинетическими характеристиками окисления (рис. 1).

При исследовании коррозионных процессов важно правильно выбрать критерий коррозионной стойкости. В качестве таких критериев в настоящее время наиболее широко используют [3]:

- относительную потерю массы:  $\Delta \bar{M} = \frac{\Delta M}{F}$ ;

- глубину коррозионного повреждения:  $h = \frac{\Delta \bar{M}}{\rho}$ ;

- среднюю скорость относительной коррозионной потери массы:  $V = \frac{\Delta \bar{M}}{t}$  и др.,

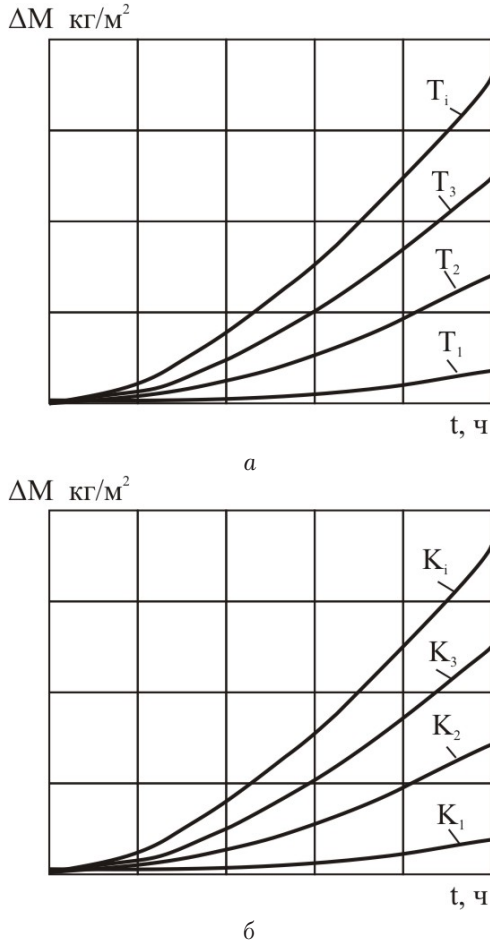
где  $\Delta M$  — абсолютная потеря массы объекта исследования после удаления пораженного коррозией слоя, кг;  $F$  — площадь пораженной поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  — плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  — время наработки, ч.

Кинетические характеристики окисления определяются экспериментально для каждого

лопаточного материала и описываются уравнениями регрессии:

$$\Delta \bar{M} = f(T, K, \tau), \quad (1)$$

где  $T$  — температура поверхности сплава;  $K$  — концентрация коррозионно-активных соединений в газовом потоке;  $\tau$  — время.



**Рис. 1.** Качественный вид кинетических кривых высокотемпературной коррозии лопаточных материалов турбин: а — при постоянной концентрации коррозионно-активных соединений в газовом потоке и различных рабочих температурах ( $K_i = \text{const}$ ;  $T_1 < T_2 < T_3 < T_i$ ); б — при постоянной температуре поверхности материала и различных концентрациях коррозионно-активных соединений в газовом потоке ( $T_i = \text{const}$ ;  $K_1 < K_2 < K_3 < K_i$ )

В случае, когда моделируется глубина коррозионного повреждения:

$$h = f(T, k, \tau) = k_0 \exp\left(-\frac{Q^*}{RT}\right) \tau, \quad (2)$$

где  $h$  — глубина коррозии;  $k_0$  — константа, зависящая от материала и коррозионной среды;  $Q^*$  — условная энергия активации. В тех случаях, когда критическим является коррозионное повреждение антивибрационных полок, в

соответствии со статистикой разрушения лопаток турбин предельная глубина повреждения составляет 0,4... 0,5% от длины лопатки.

Получение характеристик возможно на испытательных стендах на образцах или моделях из соответствующих жаропрочных сплавов. Контроль теплового состояния испытываемых объектов осуществляется их термометрированием, а заданная концентрация коррозионно-активных соединений в газовом потоке достигается введением в топливо необходимого количества этих соединений.

В некоторых случаях испытания на коррозионную стойкость проводят, покрывая образцы лопаток синтетической золой, содержащей коррозионно-активные соединения в той пропорции, которая соответствует реальным отложениям на лопатках турбины.

Используя кинетические кривые окисления, можно определить относительную потерю массы  $\Delta \bar{M}_i$  и глубину коррозионных повреждений материала лопаток в процессе работы двигателя на определенном  $i$ -м режиме, с известными температурой лопаток  $T_i$ , концентрацией коррозионно-активных соединений в газовом потоке  $K_i$  и временем непрерывной работы на этом режиме  $t_i$ .

Поскольку получение кинетических характеристик материала требует проведения большого объема экспериментов, то применение методов теории запланированного эксперимента позволяет повысить эффективность экспериментального исследования.

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:

$$D_{\Sigma} = D_{\text{ст}} + D_{\text{мцу}} + D_{\text{уст}} + D_{\text{кор}} = a, \quad (3)$$

где  $D_{\text{ст}}$ ,  $D_{\text{мцу}}$ ,  $D_{\text{уст}}$ ,  $D_{\text{кор}}$  — повреждаемости от статических, малоциклового и усталостных нагружений, а также от действия коррозионно-активной среды. Более подробно формулу (3) можно представить в виде:

$$\left( \int_0^{N_{\Sigma}^*} \frac{dN}{N * [\sigma_a(N), T(N)]} \right)^{\alpha} + \left( \int_0^{N_{p\Sigma}^*} \frac{dN_p}{N_p * [\varepsilon_a(N_p), T(N_p)]} \right)^{\beta} +$$

$$+ \left( \int_0^{t_\Sigma} \frac{dt}{t^* [\sigma_m(t), T(t)]} \right)^\gamma + \left( \int_0^{t_\Sigma} \frac{dt_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}}^* [\Delta M_{\text{пред}}, T, K_{\text{кор}}]} \right)^\xi = a, \quad (4)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\xi$  и  $\gamma$  – положительные показатели степени (зависят от материала, структуры нагружения и окружающей среды);  $a$  – параметр, зависящий от материала и структуры нагружения, деформации, температуры, состава и концентрации коррозионно-активных веществ;  $N^* [\sigma_a(N), T(N)]$  – число циклов до разрушения при амплитуде переменных напряжений  $\sigma_a$  и температуре  $T$ ;  $N_p^* [\varepsilon_a(N_p), T(N_p)]$  – число циклов до разрушения при амплитуде деформации  $\varepsilon_a$  и температуре  $T$ ;  $t^* [\sigma_m(t), T(t)]$  – долговечность (время до разрушения) при напряжении  $\sigma_m$  и температуре  $T$ ;  $t_{\text{кор}}^* [\Delta M_{\text{пред}}, T, K_{\text{кор}}]$  – долговечность при коррозионном разрушении при температуре  $T$  и концентрации коррозионно-активных веществ  $K_{\text{кор}}$  ( $\Delta M_{\text{пред}}$  – предельная относительная потеря массы материала лопатки).

Первый член в формуле (4) выражает повреждение от многоциклового нагружения, второй – от малоциклового, что отмечается индексом  $p$ , третий – от длительной статической нагрузки, четвертый – от влияния коррозионно-активной среды.

При  $\alpha < 1$ ,  $\beta < 1$ ,  $\gamma < 1$ ,  $\xi < 1$  взаимное влияние разнородных механизмов повреждения оказывается весьма существенным.

При  $\alpha = \beta = \gamma = \xi = 1$  оценка идет обычно в «запас долговечности».

При  $\alpha > 2$ ,  $\beta > 2$ ,  $\gamma > 2$ ,  $\xi > 2$  взаимным влиянием разнородных повреждений практически можно пренебречь.

В формулу (4) входят средние значения числа циклов и времени до разрушения. Условию (4) можно придать вероятностный смысл, если значения  $N^*$ ,  $N_p^*$ ,  $t^*$  и  $t_{\text{кор}}^*$  определять с учетом доверительной вероятности.

Другой способ учета взаимного влияния разнородных повреждений можно рассматривать в связи с предельными поверхностями прочности и долговечности.

В качестве определяющих параметров нагружения примем амплитуду переменных напряжений многоциклового усталости  $\sigma_a$ , амплитуду переменных деформаций малоциклового усталости  $\varepsilon_a$ , постоянное напряжение  $\sigma_m$  и коррозионную активность  $K_{\text{кор}}$  газовой среды.

При действии только одного нагружения, например, многоциклового усталости, предельные значения параметров нагружения определяются в соответствии с уравнением:

$$\sigma_{-1N}^m N = C, \quad (5)$$

где  $\sigma_{-N} = \sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений, соответствующих разрушению при  $N$  циклах (предел выносливости для  $N$  циклов).

При действии только малоциклового усталости предельное значение амплитуды циклической деформации определится в соответствии с уравнением:

$$\varepsilon_{-1N_p}^{m_1} N_p = C_1. \quad (6)$$

При длительном нагружении статической нагрузкой разрушение за время  $t$  происходит при напряжении  $\sigma_{dt}$  – пределе длительной прочности,

$$\sigma_{dt}^{m_d} t = C_d. \quad (7)$$

При работе лопаток без нагрузки в условиях наличия газовой среды разрушение за время  $t_{\text{кор}}$  происходит при концентрации коррозионно-активных веществ  $K_{\text{кор},t}$ , определяемой в соответствии с уравнением:

$$K_{\text{кор},t}^{m_{\text{кор}}} t_{\text{кор}} = C_{\text{кор}}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{кор},t}$  – концентрация коррозионно-активной среды, при которой происходит разрушение защитного слоя лопатки и начинается катастрофическое расходование ресурса лопатки.

На рис. 2 показана предельная поверхность прочности, которая должна проходить через точки предельной прочности при однородных нагружениях: точку  $A$  с координатами  $[\sigma_{-1N}; 0; 0; 0]$ , точку  $B$  с координатами  $[0; \sigma_{dt}; 0; 0]$ , точку  $C$  с координатами  $[0; 0; \varepsilon_{-1N_p}; 0]$  и точку  $D$  с координатами  $[0; 0; 0; K_{\text{кор}}]$  (ввиду того, что пространство четырехмерное, точка  $D$  на рис. 2 не показана).

В общем случае уравнение предельной прочности (при заданных параметрах долговечности) может быть принято в следующем виде:

$$\left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1N}(T)} \right)^\mu + \left( \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{-1N_p}(T)} \right)^\nu + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{dt}(T)} \right)^\eta + \left( \frac{K_{\text{кор}}}{K_{\text{кор},t}(T)} \right)^\theta = 1, \quad (9)$$

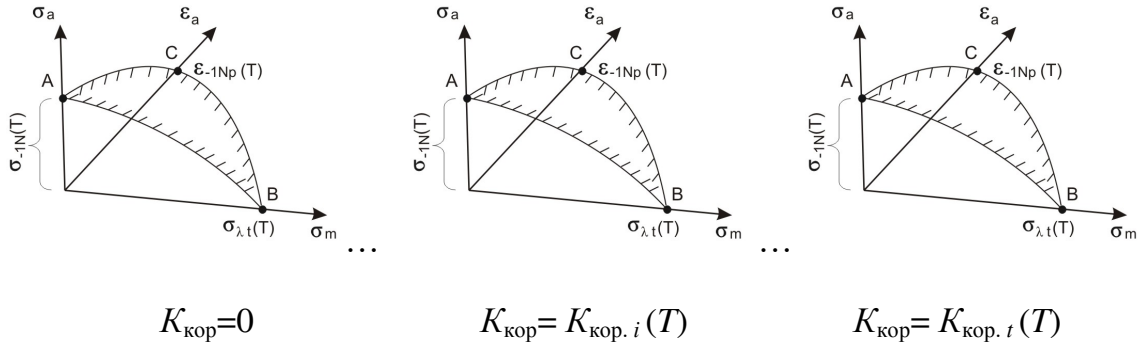


Рис. 2. Предельная поверхность прочности в трехмерном пространстве

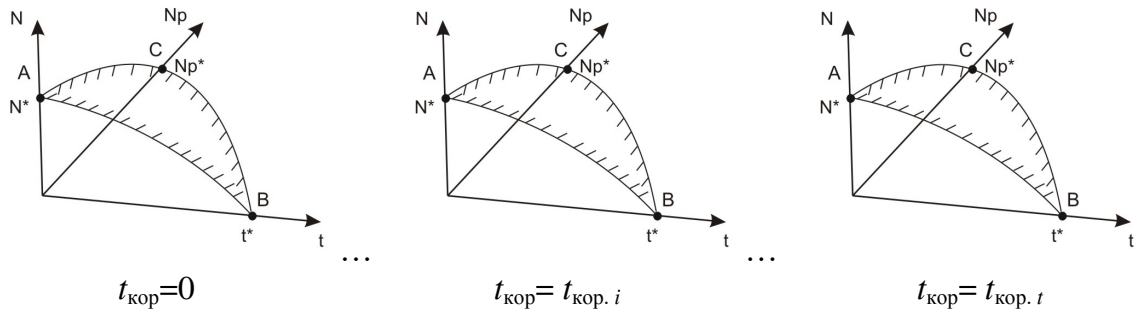


Рис. 3. Предельная поверхность долговечности в трехмерном пространстве

где  $\mu, \nu, \eta$  и  $\theta$  — положительные параметры.

Уравнение (9) позволяет определить запасы прочности и эквивалентные напряжения.

В практических расчетах удобно воспользоваться представлением плоской предельной поверхности ( $\mu = \nu = \eta = \theta = 1$ ):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1N}} + \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{-1Np}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{\lambda t}} + \frac{K_{\text{кор}}}{K_{\text{кор}.t}} = 1. \quad (10)$$

Предельная поверхность долговечности при стационарных значениях параметров нагружения  $\sigma_a, \varepsilon_a, \sigma_m$ , температуре  $T$  и коррозионной активности  $K_{\text{кор}}$  показана на рис. 3.

В общем случае уравнение предельной поверхности долговечности можно представить следующим образом:

$$\left(\frac{N}{N^*(\sigma_a, T)}\right)^\alpha + \left(\frac{N_p}{N_p^*(\varepsilon_a, T)}\right)^\beta + \left(\frac{t}{t^*(\sigma_m, T)}\right)^\gamma + \left(\frac{t_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}}^*(\Delta M_{\text{пред}}, T, K_{\text{кор}})}\right)^\xi = 1, \quad (11)$$

где число циклов  $N^*$ ,  $N_p^*$ , время  $t^*$  и  $t_{\text{кор}}^*$  до разрушения соответствуют уравнениям:

$$\sigma_a^m N^* = C; \quad \varepsilon_a^{m_1} N_p^* = C_1; \\ \sigma_m^{m_\delta} t^* = C_\delta; \quad K_{\text{кор}.t}^{m_{\text{кор}}} t_{\text{кор}} = C_{\text{кор}}.$$

При  $\alpha = \beta = \gamma = \xi = 1$  условие (11) выражает правило линейного суммирования разнородных повреждений при  $\alpha = 1$  (плоская предельная поверхность). Условие (11) позволяет определить запасы долговечности.

Если число циклов и длительность нагружения в рабочих условиях составляет  $\tilde{N}, \tilde{N}_p, \tilde{t}$  и  $\tilde{t}_{\text{кор}}$ , то запас долговечности  $n_{\text{дв}}$  при их пропорциональном возрастании находится из уравнения:

$$n_{\text{дв}}^\alpha \left(\frac{\tilde{N}}{N(\sigma_a, T)}\right)^\alpha + n_{\text{дв}}^\beta \left(\frac{\tilde{N}_p}{N_p(\varepsilon_a, T)}\right)^\beta + n_{\text{дв}}^\gamma \left(\frac{\tilde{t}}{t(\sigma_m, T)}\right)^\gamma + n_{\text{дв}}^\xi \left(\frac{\tilde{t}_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}}(\Delta M_{\text{пред}}, T, K_{\text{кор}})}\right)^\xi = 1. \quad (12)$$

Модель долговечности (11) указана для более общего случая нестационарного нагружения.

Запасы долговечности при приведении к однородным повреждениям можно представить в таком виде: запас долговечности по усталостной прочности

$$n_N = \frac{N^*(\sigma_{ae}, T)}{\tilde{N}}; \quad (13)$$

запас долговечности по малоцикловой прочности

$$n_{N_p} = \frac{N_p^*(\varepsilon_{ae}, T)}{\widetilde{N}_p}; \quad (14)$$

запас долговечности по длительной прочности

$$n_t = \frac{t^*(\sigma_{me}, T)}{\widetilde{t}}; \quad (15)$$

запас долговечности по коррозионной стойкости

$$n_{t_{кор}} = \frac{t_{кор}^*(\Delta M_{пред}, T, K_{кор})}{\widetilde{t}_{кор}}. \quad (16)$$

Учет взаимного влияния повреждений проводится, таким образом, снижением предельных значений долговечности по числу циклов и времени. Если нагружение состоит из отдельных блоков, в которых число циклов и длительность нагружения связаны между собой, то минимальное значение одного из запасов долговечности показывает, по какому фактору впервые наступает ограничение.

Запасы долговечности (13)–(16) указаны для стационарного нагружения. При нестационарном нагружении для определения запасов долговечности используется линейное суммирование однородных повреждений и тогда

$$\begin{aligned} n_N &= \left( \int_0^{\widetilde{N}_\Sigma} \frac{d\widetilde{N}}{N^*(\sigma_{ae}[\widetilde{N}], T(\widetilde{N}))} \right)^{-1}; \\ n_{N_p} &= \left( \int_0^{\widetilde{N}_{p\Sigma}} \frac{d\widetilde{N}_p}{N_p^*(\varepsilon_{ae}[\widetilde{N}], T(\widetilde{N}))} \right)^{-1}; \\ n_t &= \left( \int_0^{\widetilde{t}_\Sigma} \frac{d\widetilde{t}}{t^*(\sigma_{me}(\widetilde{t}), T(\widetilde{t}))} \right)^{-1}; \\ n_{t_{кор}} &= \left( \int_0^{\widetilde{t}_{кор}} \frac{d\widetilde{t}_{кор}}{t_{кор}^*(\Delta M_{пред}, T, K_{кор})} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\widetilde{N}_\Sigma, \widetilde{N}_{p\Sigma}$  – суммарное число циклов нагружения в рабочих условиях (многоцикловой и малоцикловой усталости);  $\widetilde{t}_\Sigma, \widetilde{t}_{\Sigma_{кор}}$  – суммарная длительность длительного статического и коррозионного нагружения.

Эквивалентные параметры прочности учитывают влияние других повреждений. В общем случае они относятся к номинальным напряжениям. Концентрации напряжений и деформаций учитываются введением эффективных коэффициентов концентрации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов, М. Н. Ускоренное моделирование высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбин ГТД / А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 3. С. 51–60.
2. Гишваров, А. С. Способ ускоренного испытания авиационного ГТД. Патент RU 2270431 С1 / А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов. МПК7 G01 М 13/00. Опубл. 20.02.06. Бюл. № 5.
3. Эль-Хожайри, Х. Оценка повреждаемости лопаток турбин газотурбинных двигателей в эксплуатации / Х. Эль-Хожайри // Вестник НАУ. 2004. № 1. С. 126–130.

### ОБ АВТОРАХ



**Гишваров Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1993). Теорет. и эксперим. иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.



**Давыдов Марсель Николаевич**, ст. преп. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по тепловым и электроракетным двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. надежн. ресурсов, испытаний лопаток турбин ГТД.