

УДК 620.1:621.452

А. С. ГИШВАРОВ, М. Н. ДАВЫДОВ

## МЕТОД УСКОРЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ГТД

Рассматривается метод ускоренного моделирования высокотемпературной сульфидно-оксидной газовой коррозии сопловых лопаток турбин ГТД из сплава ЖС6К. Приведены результаты экспериментального исследования предлагаемого метода моделирования на примере образцов лопаток соплового аппарата одновального газотурбинного двигателя, выполненных из жаропрочного никелевого сплава ЖС6К. *Испытания ГТД; высокотемпературная коррозия; моделирование испытаний ГТД*

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что надежность и ресурс газотурбинных двигателей в основном зависят от работоспособности элементов «горячей» части (рабочих и сопловых лопаток, дисков и т. д.), подверженных действию статических, циклических, повторно-статических нагрузок, а также высокотемпературной сульфидно-оксидной газовой коррозии [1].

Сульфидно-оксидная газовая коррозия обусловлена коррозионным воздействием золых и газовых продуктов сгорания ГТД, поступающих в проточную часть двигателя и является одним из серьезных видов повреждений сопловых лопаток, вызывающих снижение надежности и экономичности газовых турбин. Интенсивность сульфидно-оксидной коррозии в некоторых случаях столь велика, что лопатки газовой турбины выходят из строя в течение нескольких сот часов работы [2].

Анализ литературных данных по исследованию надежности и прочности показывает, что процессы газовой коррозии элементов авиационных ГТД менее изучены, чем процессы разрушения от действия механических нагрузок.

В настоящее время известно несколько методов испытаний образцов и деталей узлов двигателей на высокотемпературную газовую коррозию [5–12]:

- в тиглях в расплавах солей;
- в печах с предварительным нанесением на образцы золых или нагарообразующих отложений;

- на установках с электрохимическим воздействием в расплавах солей;
- в камерах сгорания с частичным воспроизведением давления рабочего процесса ГТД;
- полномасштабные испытания лопаток в системе ГТД.

Первые три метода испытаний не позволяют оценивать долговечность образца лопатки по коррозионной стойкости и наиболее приемлемы при проведении сравнительных испытаний, например, когда необходимо из нескольких вариантов конструктивного исполнения элемента двигателя выбрать вариант, соответствующий наибольшей коррозионной стойкости.

Последние два метода испытаний дают полную (или близкую к полной) оценку коррозионной стойкости, но требуют больших временных и материальных затрат.

Следует отметить, что существующие методы автономных испытаний лопаток на надежность и ресурс при длительном статическом, повторно-статическом и других видах механического нагружения не воспроизводят полной картины коррозии, поскольку при этом не моделируется рабочая среда, и это, естественно, снижает достоверность оценки надежности и ресурса лопаток. Ускоренные испытания лопаток в системе двигателя, проводимые с форсированием режима нагружения по частоте вращения, температуре, вибрации и т. д., также не воспроизводят полной картины коррозии по причине малой (по сравнению с ресурсом) длительности пребывания лопатки в газовой среде.

Таким образом, перечисленные методы испытаний или имеют низкий уровень вос-

произведения коррозионной повреждаемости, или требуют большой длительности и затрат на испытания. В связи с этим актуальным является разработка метода ускоренных испытаний на высокотемпературную газовую коррозию лопаток ГТД, обеспечивающего достоверность оценки коррозионной повреждаемости при минимальных временных и материальных затратах на испытания.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УСКОРЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ

Моделирование процессов расходования ресурса элементов узлов ГТД, включая ускоренные испытания, основано на положениях термодинамики необратимых процессов. По определению Гленсдорфа и Пригожина классическая термодинамика в сущности есть теория разрушения структур, а производство энтропии — это мера скорости этого разрушения [6].

Энтропийный критерий эквивалентности модельных (ускоренных) и эксплуатационных испытаний может быть использован при выборе режимов ускоренных испытаний: два режима испытаний в смысле накопленных повреждений являются одинаковыми, если вызывают одно приращение термодинамической энтропии:

$$\int_0^{t_1} S_1(\tau) d\tau = \int_0^{t_2} S_2(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $S_1(\tau)$ ,  $S_2(\tau)$  — скорости роста энтропии соответственно в первом и втором режимах нагружения.

На практике приращение энтропии для элемента узла ГТД оценивается через модели расходования ресурса (повреждаемости):

$$\Pi(0, \tau, R) = \int_0^{\tau} r(\tau, R) d\tau, \quad (2)$$

где  $r(\tau, R)$  — скорость расходования ресурса (накопления повреждаемости) элемента.

Однозначно определяемые в каждый момент времени  $\tau$  ресурсы элемента изделия, модели есть разновидности аддитивно-марковских моделей расходования ресурса, основные предпосылки (принципы) которых сводятся к следующему [7].

Считается, что изделие имеет некоторый запас ресурса, который оно утрачивает в процессе эксплуатации. Ресурс, расходуемый изделием в режиме  $R(\tau)$  на интервале времени  $(\tau_1, \tau_2)$ , характеризуется одномерной функцией  $\Pi(\tau_1, \tau_2, R)$  и удовлетворяет условиям аддитивности, марковости и независимости суммарного запаса ресурса изделия от режима испытаний.

1. Условие аддитивности. При любом  $\tau$  из интервала  $(\tau_1, \tau_2)$  имеет место равенство

$$\Pi(\tau_1, \tau_2, R_0) = \Pi(\tau_1, \tau, R_0) + \Pi(\tau, \tau_2, R_0) \quad (3)$$

или более общее соотношение

$$\Pi(\tau_1, \tau_2, R) = \sum_{i=1}^{n-1} \Pi(\tau_1, \tau_{i+1}, R) \quad (4)$$

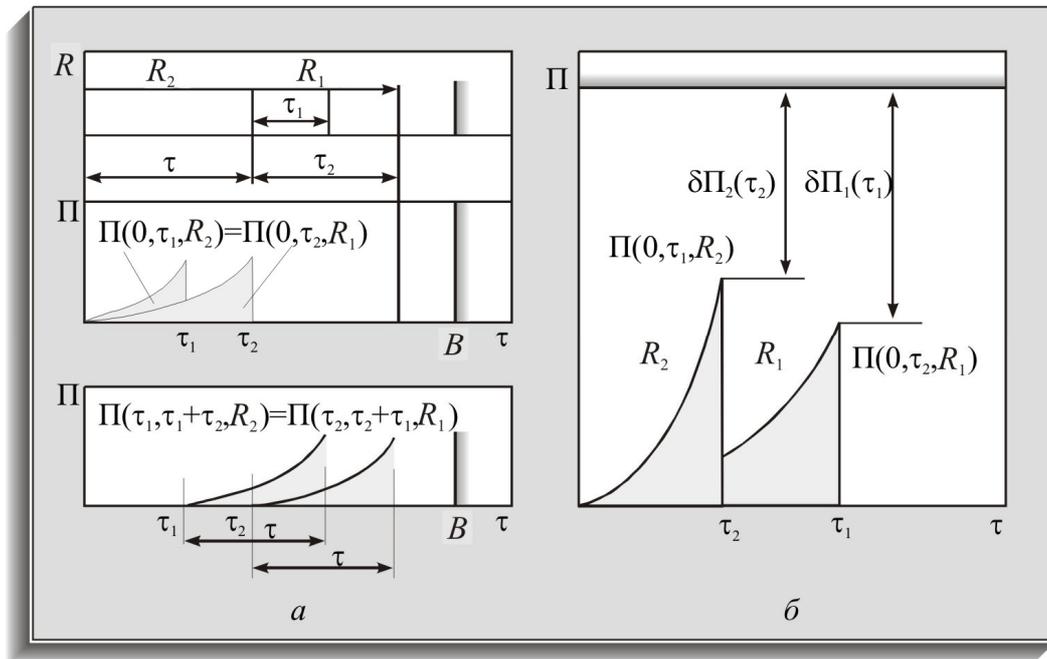
при любых  $0 < (i-1) < \tau$ .

Фактически соотношение (4) означает, что ресурс изделия в испытаниях утрачивается аддитивно.

2. Условие марковости (принцип Седякина). Функция  $\Pi(\tau_1, \tau_2, R)$  зависит от величины выработанного ресурса в прошлом  $\Pi(0, \tau_1, R)$  за время  $\tau_1$  и не зависит от того, каким образом он выработан (в каком режиме  $R$ ): если  $R(\tau + \tau_1) = R(\tau + \tau_2)$  при всех  $\tau \in [0, b]$  и  $\Pi(0, \tau_1, R_2) = \Pi(0, \tau_2, R_1)$ , то  $\Pi(\tau_1, \tau_1 + \tau, R_2) = \Pi(\tau_2, \tau_2 + \tau, R_1)$  при любом  $\tau \in [0, b]$  (рис. 1).

3. Наряду с перечисленными условиями 1 и 2 необходимо еще указать, каким первоначальным запасом ресурса обладает изделие. Поэтому вводится еще одно допущение: условие независимости суммарного запаса ресурса изделия от режима испытаний. Не нарушая общности рассуждений, полагают  $\bar{\Pi} = 1$  (повреждаемость, при которой изделие разрушается), так как введением вместо  $\Pi(\tau, \tau_2, R)$  новой функции  $r(\tau_1, \tau_2, R)/r$  ресурс изделия всегда можно нормировать на единицу. Каждое изделие обладает своим запасом ресурса  $\delta\bar{\Pi}$ . Так, если два одинаковых изделия на момент времени  $\tau = 0$  имеют одинаковые запасы ресурса  $\delta\bar{\Pi}_1(0) = \delta\bar{\Pi}_2(0) = 1$  (рис. 1, б), то после испытаний за время  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в режимах соответственно  $R_1$  и  $R_2$  запасы ресурса составят  $\delta\bar{\Pi}_1(\tau_1) > \delta\bar{\Pi}_2(\tau_2)$ .

Применительно к процессу газовой коррозии показателями повреждаемости  $\Pi_{\text{кор}}$  лопатки турбины двигателя являются следующие характеристики:



**Рис. 1.** Графическое представление условий марковости (а) и изменения запаса ресурса (б) двух одинаковых изделий при испытаниях различной длительности в различных режимах

- толщина  $h$  или масса  $m$  поверхностного слоя лопатки:

$$h_{кор} \vee m_{кор}; \quad (5)$$

- состав поверхностного слоя лопатки:

$$\vec{C}_{кор} = [c_1, \dots, c_i]^T = [Ni, Al, W, Cr, Ti, \dots]^T; \quad (6)$$

- микроструктура (фазовый состав) поверхностного слоя лопатки:

$$\vec{\Phi}_{кор} = [\Phi_1, \dots, \Phi_i]^T, \quad (7)$$

где  $\Phi_i$  —  $i$ -я фаза микроструктуры ( $\alpha, \beta, \gamma, \gamma', \dots$ ).

Таким образом:

$$\Pi_{кор} = [h_{кор}, \vec{C}_{кор}, \vec{\Phi}_{кор}]^T \vee \vee \Pi_{кор} = [m_{кор}, \vec{C}_{кор}, \vec{\Phi}_{кор}]^T.$$

Согласно принципу независимости суммарного запаса ресурса изделия от режима испытания конечное состояние по коррозионной стойкости лопатки, соответствующее эксплуатационным условиям нагружения, может быть воспроизведено в испытаниях различными способами, включая как традиционно используемые методы (ускоренные испытания с форсированием режима нагружения, исключение слабовлияющих режимов

и др. [1, 7, 8]), так и применяя новые методы. В частности, в данной работе предлагается ускоренные испытания сопловых лопаток турбин ГТД проводить в виде последовательно реализуемых нагружений  $R_i$ , (рис. 2):

- травление лопатки в электролите —  $R_{ТР}$ ;
- электрохимическая обработка (ЭХО) —  $R_{ЭХО}$ ;
- высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов —  $R_{ВТО}$ :

$$R_{исп} \sim R_{ТР} \rightarrow R_{ЭХО} \rightarrow R_{ВТО}. \quad (8)$$

В конечном итоге эквивалентность ускоренных (смоделированных) и эксплуатационных (полномасштабных) испытаний при высокотемпературной газовой коррозии обеспечивается получением поверхностного слоя сопловой лопатки, эквивалентного эксплуатационному по толщине коррозионного слоя, составу и микроструктуре поверхностного слоя:

$$\vec{\Pi}_{кор.исп} = f(R_{ТР}, R_{ЭХО}, R_{ВТО}) = \vec{\Pi}_{кор.экс} = f(\tau_{экс}, \vec{R}_{экс}), \quad (9)$$

где  $\vec{\Pi}_{кор.исп}$ ,  $\vec{\Pi}_{кор.экс}$  — коррозионная повреждаемость лопатки в ускоренных испытаниях и эксплуатационных условиях;  $\tau_{экс}$ ,  $\vec{R}_{экс}$  — длительность и вектор параметров эксплуатационного нагружения.

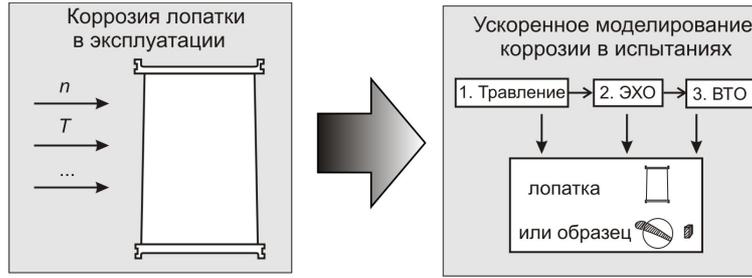


Рис. 2

На этапах травления и электрохимической обработки в ускоренных испытаниях формируется коррозионный слой, эквивалентный эксплуатационному по толщине и составу продуктов коррозии:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{кор.исп}} &= f(R_{\text{тр}} \rightarrow R_{\text{эхо}}); \\
 h_{\text{кор.исп}} &= h_{\text{кор.экс}}; \\
 \vec{C}_{\text{кор.исп}} &= \vec{C}_{\text{кор.экс}}; \\
 \text{I: } \begin{cases} h_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); \\ \vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); \\ \vec{\Phi}_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); \\ R_{\text{тр}} = f(\vec{\Xi}_{\text{тр}}, T_{\text{тр}}, \tau_{\text{тр}}); \\ \vec{\Xi}_{\text{тр}} = [e_{\text{тр.1}}, \dots, e_{\text{тр.n}}]^T; \end{cases} & (10) \\
 \text{II: } \begin{cases} h_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{эхо}}); \\ \vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{эхо}}); \\ \vec{\Phi}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{эхо}}); \\ R_{\text{эхо}} \sim \vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = \\ = f(\vec{\Xi}_{\text{эхо}}, J_{\text{эхо}}, T_{\text{эхо}}, \tau_{\text{эхо}}); \\ \vec{\Xi}_{\text{эхо}} = [e_{\text{эхо.1}}, \dots, e_{\text{эхо.n}}]^T, \end{cases}
 \end{aligned}$$

где  $h_{\text{кор.исп}}^{(1)}$ ,  $h_{\text{кор.исп}}^{(2)}$  — толщина коррозионного слоя после травления и ЭХО;  $\vec{\Xi}_{\text{тр}}$ ,  $\vec{\Xi}_{\text{эхо}}$  — электролиты, включающие  $e_{\text{тр.1}}, \dots, e_{\text{тр.n}}$  и  $e_{\text{эхо.1}}, \dots, e_{\text{эхо.n}}$  компонент (соли для приготовления раствора электролита);  $\vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(1)}$ ,  $\vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)}$  — состав поверхностного слоя после травления и ЭХО;  $J_{\text{эхо}}$  — ток ЭХО;  $T_{\text{тр}}$  и  $T_{\text{эхо}}$  — температура травления и ЭХО;  $\tau_{\text{тр}}$  и  $\tau_{\text{эхо}}$  — длительность травления и ЭХО.

Электрохимическая обработка позволяет увеличить содержание серы и способствует образованию оксидов.

На этапе высокотемпературной обработки формируется коррозионный слой, эквивалентный эксплуатационному по микрострук-

туре (фазовому составу):

$$\begin{aligned}
 \vec{\Phi}_{\text{кор.исп}} &= \vec{\Phi}_{\text{кор.экс}}; \\
 h_{\text{кор.исп}}^{(3)} &= \text{idem} = h_{\text{кор.исп}}^{(1)} + h_{\text{кор.исп}}^{(2)}; \\
 \vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(3)} &= \text{idem} = \vec{C}_{\text{кор.экс}}; \\
 \vec{\Phi}_{\text{кор.исп}} &= F(R_{\text{вто}}); \\
 R_{\text{вто}} &= f[\text{СОЛИ}, T_{\text{вто}}, \\ & \quad \tau_{\text{вто.1}}, \tau_{\text{вто.2}}, \tau_{\text{вто.3}}],
 \end{aligned} \quad (11)$$

где  $T_{\text{вто}}$  — температура;  $\tau_{\text{вто.1}}, \tau_{\text{вто.2}}, \tau_{\text{вто.3}}$  — время нагрева, выдержки и охлаждения испытываемого образца при ВТО.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ МЕТОДА УСКОРЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Последовательность реализации рассматриваемого метода ускоренного моделирования высокотемпературной газовой коррозии сопловых лопаток ГТД сводится к выполнению следующих этапов (рис. 3).

**1. Подготовка исходных данных к испытаниям.** Исходными данными являются:

- толщина коррозионного слоя, а также толщина обезлегированной зоны поверхностного слоя лопатки, отработавшей в эксплуатации;
- фазовый состав продуктов коррозии в поверхностном слое лопатки, отработавшей в эксплуатации.

К ускоренным испытаниям готовят образцы новых лопаток, вырезанные с места, соответствующего максимальной эксплуатационной температуре.

Толщина коррозионного слоя, подлежащего моделированию в ускоренных испытаниях, определяется одним из двух способов, отличающихся наличием или отсутствием эксплуатационных данных по коррозии лопаток.

При наличии данных оценивается уменьшение массы лопаток  $\Delta m$  за время эксплуатации, удельная потеря (уменьшение) массы



Рис. 3. Общая схема ускоренного моделирования высокотемпературной газовой коррозии образцов лопаток из жаропрочного сплава (типа ЖС6К)

металла  $q$  и глубина равномерной коррозии  $h$

$$\Delta m = m_n - m_{\text{ср.экс}}; \quad m_{\text{ср.экс}} = \sum_{i=1}^n m_i/n;$$

$$q = \Delta m/S; \quad h_{\text{кор}} = q/\rho, \quad (12)$$

где  $m_n$  — масса новой лопатки;  $m_{\text{ср.экс}}$  — осредненное значение массы лопатки после эксплуатации;  $n$  — число лопаток, отработавших в эксплуатации;  $S$  — площадь окисляемой поверхности лопатки;  $\rho$  — плотность металла.

При отсутствии эксплуатационных данных определяется прогнозное значение толщины коррозионного слоя  $h_{\text{кор}}$  по номограммам вида (рис. 4, а) [4]:

$$h_{\text{кор}} = h \cdot k, \quad (13)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от скорости коррозии и определяемый по графику вида  $k = f(V_h)$ , где  $V_h$  — скорость коррозии (рис. 4, б) (например, для сплава ЖС6К  $V_h = 5 \dots 8 \cdot 10^4$  мкм/ч [2]).

Фазовый состав коррозионного слоя лопаток, отработавших в эксплуатации, определяется в зоне максимальной коррозионной повреждаемости, т. е. в зоне максимальной температуры лопатки. При этом, как правило, оценка состава проводится с использованием методов электронной оже-спектроскопии, а также микрорентгеноспектрального анализа.

Образцы прямоугольной формы вырезаются из новых лопаток, химический состав сплава которых соответствует ГОСТ и

ТУ завода-изготовителя. Таким же образом готовятся образцы из лопаток, прошедших отработку в эксплуатации, что необходимо для оценки эксплуатационного коррозионного повреждения. Место вырезки образцов соответствует максимальной температуре по высоте пера лопатки (рис. 5).

Для очистки поверхности образцов от жировых и масляных загрязнений используется обезжиривание с применением водных растворов органических растворителей, не оказывающих последующего коррозионного воздействия на поверхность деталей и не влияющих на процесс коррозии.

**2. Проводится вытравливание образцов в электролите**, тем самым моделируется выгорание легирующих элементов, свойственное эксплуатационным условиям.

Химическое травление проводится при комнатной температуре методом погружения в раствор электролита состава:

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = [e_{\text{тр.1}}, e_{\text{тр.2}}], \quad (14)$$

где  $e_{\text{тр.1}}$  — 0,8%-ный водный раствор лимонной кислоты ( $C_6H_8O_7$ );  $e_{\text{тр.2}}$  — 0,9%-ный водный раствор сульфата аммония ( $(NH_4)_2SO_4$ );

$$\vec{C}_{\text{кор.исп}}^{(1)} = [Al, Ni, W, Cr, Ti]^T = f(e_{\text{тр.1}}, e_{\text{тр.2}}, T_{\text{тр}}, \tau_{\text{тр}}). \quad (15)$$

Длительность травления определяется в зависимости от толщины коррозионного слоя поверхностного слоя лопатки  $h_{\text{кор}}$  (рис. 6).

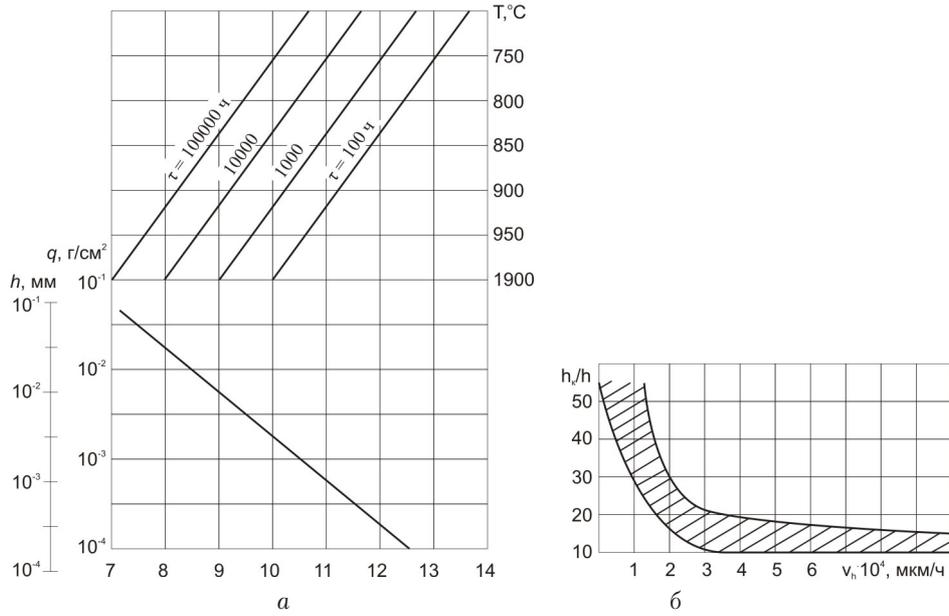


Рис. 4. Определение прогнозных значений: а — толщины коррозионного слоя; б — коэффициента коррозии

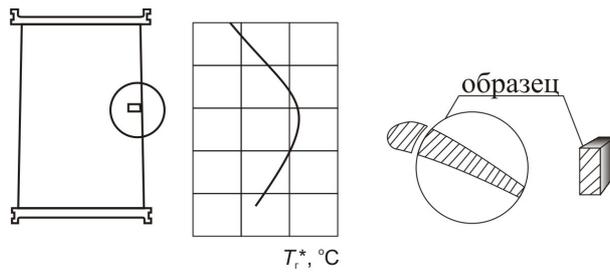


Рис. 5

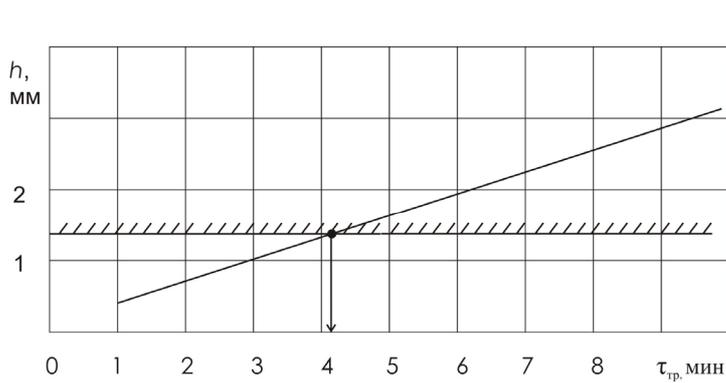


Рис. 6

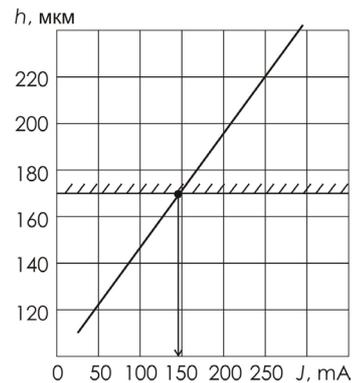


Рис. 7

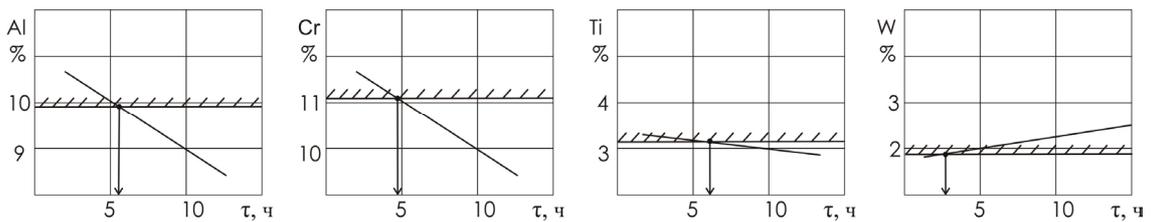


Рис. 8

**3. Образцы лопаток подвергаются электрохимической анодной обработке (ЭХО)** в электролите, чем обеспечивается насыщение поверхностного слоя серой и формируется оксидная пленка, содержащая оксиды Ni, Cr, Al, необходимые для формирования легкоплавких сульфидов на следующем этапе испытаний:

$$\begin{aligned} R_{\text{ЭХО}} &= [\vec{\mathcal{E}}_{\text{ЭХО}}, T_{\text{ЭХО}}, J_{\text{ЭХО}}, \tau_{\text{ЭХО}}]^T; \\ T_{\text{ЭХО}} &\in 15...25^\circ\text{C}; \quad J_{\text{ЭХО}} \in 50...300 \text{ mA}; \\ \tau_{\text{ЭХО}} &= 1 \text{ ч.} \end{aligned} \quad (16)$$

В качестве электролита для ЭХО используется многокомпонентный раствор:

$$\vec{\mathcal{E}}_{\text{ЭХО}} = [e_{\text{ЭХО.1}}, e_{\text{ЭХО.2}}, e_{\text{ЭХО.3}}]^T, \quad (17)$$

где  $e_{\text{ЭХО.1}}$  — 15%-ный водный раствор нитрата натрия ( $\text{NaNO}_3$ );  $e_{\text{ЭХО.2}}$  — 5%-ный водный раствор сульфида натрия ( $\text{Na}_2\text{S}$ );  $e_{\text{ЭХО.3}}$  — 5%-ный водный раствор глицерина ( $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$ ).

Для получения коррозионного слоя требуемой толщины электрохимическую обработку проводят, варьируя длительностью  $\tau_{\text{ЭХО}}$  и значением тока  $J_{\text{ЭХО}}$  обработки. Для каждого сплава экспериментальным путем определяются зависимости вида  $h = f(J_{\text{ЭХО}}, \tau_{\text{ЭХО}})$ . Для сплава ЖС6К при  $\tau_{\text{ЭХО}} = 1$  ч величина тока определяется по графику (рис. 7):

$$h_{\text{кор.исп}}^{(1)} = f(J_{\text{ЭХО}}, \tau_{\text{ЭХО}}); \quad J_{\text{ЭХО}} = 50...300 \text{ mA}.$$

Экспериментально установлено, что, вследствие значительного увеличения тока обработки и усложнения получения требуемой толщины коррозионного слоя, длительность травления менее 1 часа непригодна.

**4. Проводится высокотемпературный нагрев образцов лопаток** в печи в атмосфере агрессивных газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ , полученных разложением солей  $\text{MgCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . Этим ускоренно моделируется газовая коррозия поверхности образцов лопаток:

$$\begin{aligned} R_{\text{ВТО}} &= [\text{соли}, T_{\text{ВТО}}, \tau_{\text{ВТО.1}}, \tau_{\text{ВТО.2}}, \tau_{\text{ВТО.3}}]^T; \\ \tau_{\text{ВТО.1}} &= 1 \text{ ч}; \quad \tau_{\text{ВТО.2}} = 5 \text{ ч}; \quad \tau_{\text{ВТО.3}} = 2, 5 \text{ ч}; \\ T_{\text{ВТО}} &\in 920...950^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (18)$$

Разложение солей  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  происходит в тигле, в котором расположены образцы лопаток. С целью исключения эффекта Ребиндера для фиксации образцов лопаток используется сетка из сплава ЭИ437Б.

Температура испытаний соответствует эксплуатационной, при которой лопатка работает наиболее длительное время (для сплава лопаток ВСУ, изготовленных из ЖС6К,  $T_{\text{исп}} = 920^\circ\text{C}$ ).

Длительность высокотемпературной обработки в атмосфере агрессивных газов определяется в зависимости от состава легирующих элементов в поверхностном слое лопаток, отработавших ресурс (рис. 8). Поскольку длительность выдержки для различных легирующих элементов сплава неодинакова, то за окончательную принимается математическое ожидание длительности  $\tau_i$ :

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i/n, \quad (19)$$

где  $n$  — количество легирующих элементов сплава.

Экспериментальная апробация метода ускоренного моделирования высокотемпературной газовой коррозии проводилась на примере сопловых лопаток 1 ступени СА турбины вспомогательного газотурбинного двигателя ТА-6А, изготовленных из сплава ЖС6К. Основная цель исследования сводилась к получению результатов коррозионного повреждения модельных образцов лопаток, идентичных результатам эксплуатационного повреждения лопаток 3-х двигателей, отработавших  $\sim 1400$  часов в эксплуатации.

При этом в соответствии с методикой  $h_{\text{экс}} \approx 170$  мкм.

Образцы прямоугольной формы вырезались из новых сопловых лопаток и лопаток 1 ступени СА турбины, прошедших отработку в эксплуатации. Место вырезки образцов соответствовало 2/3 от замковой части лопатки.

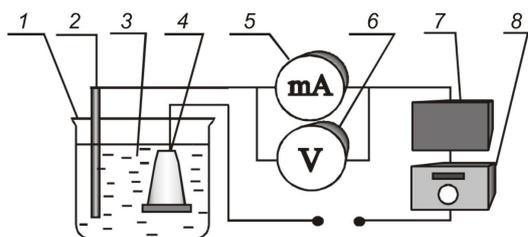
Длительность травления составляла  $\tau_{\text{тр}} = 5$  мин.

Условия ЭХО были следующие:  $\tau_{\text{ЭХО}} = 1$  ч;  $J_{\text{ЭХО}} = 100$  mA;  $T_{\text{ЭХО}} = 20^\circ\text{C}$  (рис. 9).

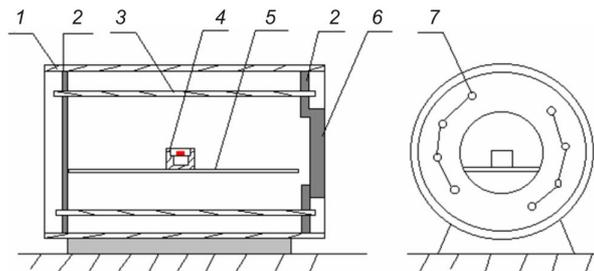
После ЭХО образцы лопаток исследовались на микроскопе "Неофот-2". Для этого образцы шлифовались и подвергались травлению составом: 2,5 г NaF, 35 г HCl, 10 г HNO<sub>3</sub> и 55 мл H<sub>2</sub>O.

Высокотемпературная обработка образцов лопаток проводилась в электрической печи в среде агрессивных газов, создаваемой разложением солей  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  (рис. 10, 11):

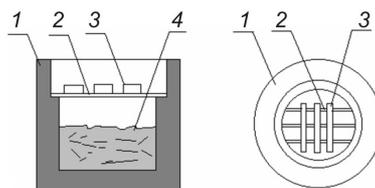
$$\begin{aligned} T_{\text{ВТО}} &= 920^\circ\text{C}; & \tau_{\text{ВТО.1}} &= 1 \text{ ч}; \\ \tau_{\text{ВТО.2}} &= 5 \text{ ч}; & \tau_{\text{ВТО.3}} &= 2,5 \text{ ч}. \end{aligned}$$



**Рис. 9.** Схема установки для электрохимической обработки образцов: 1 – кювета; 2 – электрод хлорсеребряный; 3 – электролит; 4 – образец; 5 – миллиамперметр; 6 – вольтметр; 7 – стабилизатор; 8 – потенциостат



**Рис. 10.** Схема печи для высокотемпературной обработки образцов: 1 – корпус, 2 – стенка, 3 – нагреватель, 4 – тигель, 5 – полка, 6 – крышка, 7 – жгут медный



**Рис. 11.** Тигель для высокотемпературной обработки образцов в среде агрессивных газов: 1 – тигель, 2 – проволока жаропрочная из сплава ЭИ437Б, 3 – образец, 4 – смесь солевая

После завершения испытаний образцы, прошедшие испытания и отработавшие в эксплуатации, а также образцы из новых лопаток исследовались в ВИАМЕ. Исследование проводилось с применением метода электронной оже-спектроскопии на спектрометре ЛАС-200 фирмы РИБЕР (Франция), метода растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на установке «Суперпроб-733» с приставкой «Линк».

Анализировались образцы:

- новых лопаток (вариант 1);
- лопаток, прошедших отработку в эксплуатации на двигателе (вариант 2);
- лопаток, прошедших ЭХО (15%  $\text{NaNO}_3$ , 5%  $\text{Na}_2\text{S}$ , 5% глицерина) и нагрев в печи до  $920\text{...}950^\circ\text{C}$  в течение 5 ч в контейнере с солью  $\text{MgCO}_3$  (вариант 3);
- лопаток, прошедших ЭХО (15%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) и нагрев в печи до  $920 \dots 950^{\text{circ}}\text{C}$  в течение 5 ч в контейнере с солью  $\text{MgCO}_3$  (вариант 4);
- лопаток, прошедших ЭХО (15%  $\text{NaNO}_3 + 5\%$  глицерина) (вариант 5).

Наиболее близкие результаты по составу приповерхностного слоя имели образцы, испытанные по варианту 3 (погрешность оценки составляла 0,5...1,25%).

Сравнение микроструктуры новой лопатки (рис. 12, а) и лопаток, подвергнутых раз-

личным видами ЭХО (рис. 12, б, 13), показало наличие изменений в структуре и составе поверхностного слоя лопаток.

На поверхности образцов лопаток, испытанных по варианту 3, наблюдалась зона шириной около 5 мкм, обедненная легкими элементами и по цвету светлее основного металла. Это подтвердилось результатами МРСА, свидетельствующими об обеднении поверхностного слоя Al-м и Ti-м по сравнению с их содержанием в сердцевине лопатки (табл.).

Структура поверхностного слоя образцов, испытанных по варианту 4, была подобна структуре в варианте 3, но зона, обедненная Ti и Al, была меньше (ширина составляла 1 ... 2 мкм).

Структура поверхностного слоя образцов, испытанных по варианту 5, сильно отличалась от структуры в вариантах 3 и 4. Поверхность образцов, испытанных по варианту 5, в результате ЭХО была сильно изъедена, имела поры и каверны, расположенные от поверхности в глубину материала лопатки.

Известно, что высокотемпературное окисление никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием хрома и алюминия связано с потерей алюминия и образованием обедненной приповерхностной зоны. Аналогичный результат наблюдался на образцах, испытанных по вариантам 3 и 4, различающихся глубиной обедненной зоны.

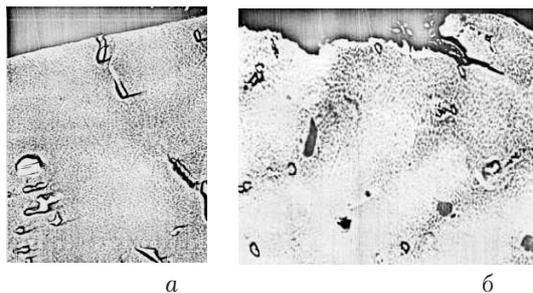


Рис. 12. Микроструктура поверхности (×860): а – исходных лопаток; б – лопаток варианта 5

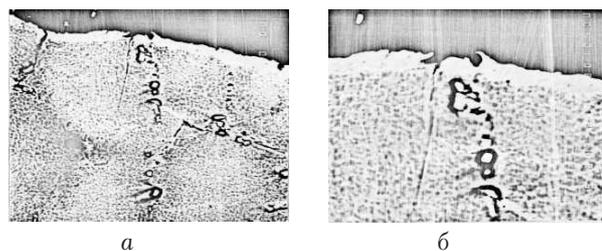


Рис. 13. Микроструктура поверхности лопаток варианта 4: а – ×860; б – ×2000

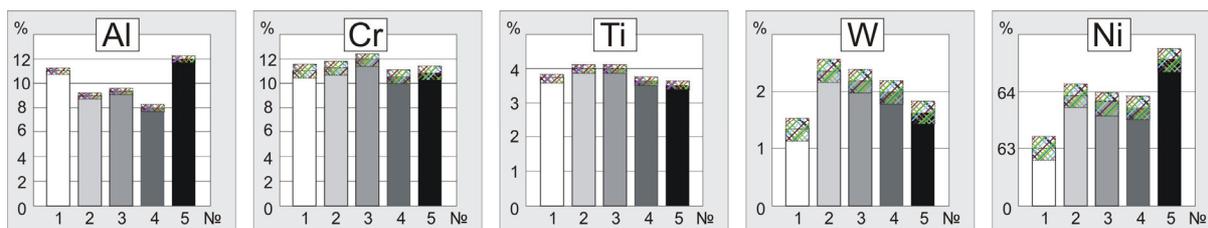


Рис. 14. Гистограмма содержания легирующих элементов в поверхностном слое образцов: 1 – вариант 1 (до обработки); 2 – вариант 2 (после эксплуатации); 3 – вариант 3; 4 – вариант 4; 5 – вариант 5

Таблица

Место определения состава	Химический состав, %						
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
Матрица сплава ЖС6К.....	5,0	2,5	10,0	4,2	66,0	4,0	8,0
Поверхность образцов после обработки	1,0	1,0	9,0	4,5	71,0	4,0	8,0

Содержание основных легирующих элементов по атомарному составу в сплаве ЖС6К, приведенное на рис. 14, показывает, что наиболее близкими по содержанию основных легирующих элементов являются результаты испытаний образцов, испытанных по варианту 3. Толщина коррозионного слоя после ускоренных испытаний по методике и эксплуатации находится в пределах 120...150 мкм и 140...170 мкм соответственно. Фазовые составы поверхностного слоя образцов на глубине 20 А, прошедших испытания по данной методике и после эксплуатационной наработки, подобны. При этом погрешность оценки составляла: Al – 1%; Cr – 2,5%; Ti – 0,7%; W – 1%; Ni – 1%.

Сокращение длительности испытаний на высокотемпературную газовую коррозию сопловых лопаток в данном исследовании составило более чем в 100 раз.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Очевидно, что эффект сокращения длительности испытаний зависит от многих факторов, и, в частности, от марки жаропрочного сплава. При этом, естественно, условия про-

ведения испытаний для различных сплавов будут отличаться. Однако общая схема проведения испытаний при этом будет сохраняться неизменной.

2. В целом, рассмотренный метод ускоренного моделирования коррозионной повреждаемости лопаток в испытаниях позволяет повысить достоверность оценки таких характеристик материалов, как длительная прочность, ползучесть и циклическая прочность.

3 Областью применения данного метода является:

- сравнительная экспресс-оценка надежности различных по конструкции лопаток при проведении научно-исследовательских и доводочных испытаний ГТД;
- проверка надежности лопаток при проведении совмещенных ускоренных испытаний ГТД в целом, когда проверяется надежность одновременно нескольких наиболее важных элементов, ответственных за надежность и ресурс двигателя в целом;
- ускоренная оценка долговечности лопаток, позволяющая проводить оценку фактических запасов прочности элементов узлов ГТД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузнецов, Н. Д.** Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин. М. : Машиностроение, 1976. 216 с.
2. **Никитин, В. И.** Коррозия и защита лопаток турбин / В. И. Никитин. М. : Машиностроение, 1987. 287 с.
3. **А. с. № 1147144 (СССР) МКИ G01M 15/00.** Способ стендовых испытаний элементов конструкций / А. С. Гишваров, П. Н. Сеняшин, Р. А. Амиров. 1984.
4. **Гишваров, А. С.** Ускоренное моделирование высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбины ГТД / А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей : межвуз. сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 2002. № 20. С. 157–169.
5. **Никитин, В. И.** Расчет жаростойкости металлов / В. И. Никитин. М. : Машиностроение, 1976. 208 с.
6. **Гецов, Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин / Л. Б. Гецов. М. : Недра, 1996. 591 с.
7. **Гишваров, А. С.** Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем / А. С. Гишваров. Уфа : Гилем, 2000. 338 с.
8. **Третьяченко, Г. Н.** Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Г. Н. Третьяченко [и др.] Киев : Наук. Думка, 1985. 280 с.
9. **Коломыцев, П. Т.** Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов / П. Т. Коломыцев. М. : Metallurgia, 1984. 216 с.
10. **Орышич, И. В.** Разработка методики испытания жаропрочных сплавов в расплавах солей / И. В. Орышич // Защита металлов. 1981. № 1.
11. **Багерман, А. З.** Оценка потерь массы жаропрочными сплавами при переменной температуре / А. З. Багерман [и др.] // Защита металлов. 1999. № 3.
12. **Туляков, Г. А.** Термическая усталость в теплоэнергетике / Г. А. Туляков. М. : Metallurgia, 1978.

## 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 испытания техн. систем.



**Давыдов Марсель Николаевич**, аспирант той же каф. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2002).