

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕННЫХ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД

© 2006 А.С. Гишваров, М.Н. Давыдов

Уфимский государственный авиационный технический университет

В данной работе рассматривается метод моделирования высокотемпературной газовой коррозии, основанный на целенаправленном комплексном воздействии и позволяющий получать результаты, близкие к эксплуатационным, за более короткое время по сравнению с длительностью эксплуатации.

Надежность и ресурс ГТД определяется в основном элементами «горячей» части двигателя, ресурс которых исчерпывается под воздействием статического, циклического, повторно-статического и усталостного нагружений, а также процессов газовой коррозии. Поэтому эти воздействия необходимо учитывать при проведении испытаний для достоверности оценки ресурса материалов.

Сульфидно-оксидная газовая коррозия, связанная с коррозионным воздействием золотых и газовых продуктов сгорания ГТД, поступающих в проточную часть двигателя, является одним из серьезных видов повреждений сопловых лопаток, вызывающих снижение надежности и экономичности газовых турбин [1]. Интенсивность сульфидно-оксидной коррозии в некоторых случаях столь велика, что лопатки газовой турбины выходят из строя в течение нескольких сот часов работы. Процессы газовой коррозии элементов ГТД менее изучены, чем процессы разрушения от действия механических нагрузок.

Существующие методы испытаний на коррозию не позволяют оценивать долговечность образца 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. Методы автономных испытаний лопаток на длительное статическое нагружение, повторно-статическое нагружение и другие виды механического нагружения не воспроизводят полную картину коррозии, поскольку не моделируется рабочая среда, и это естественно снижает достоверность оценки надежности

и ресурса. Ускоренные испытания лопаток в системе двигателя с форсированием режима нагружения по частоте вращения, температуре, вибрации также не воспроизводят полностью картину коррозии по причине малой (по сравнению с ресурсом) длительности пребывания лопатки в газовой среде.

Моделирование процессов расходования ресурса (включая ускоренное моделирование) основывается 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 [2,3].

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 в лопатке ГТД одно и то же 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 оценивается через модели расходования ресурса (повреждаемости) вида:

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

где  $r(\tau, R)$  - скорость расходования ресурса (накопления повреждаемости);  $R$  – вектор параметров режима нагружения.

Однозначно определяя в каждый мо-

мент времени  $\tau$  количество расходуемого ресурса элемента изделия, модели являются разновидностями аддитивно-Марковских моделей расходования ресурса, основные предпосылки (принципы) которых сводятся к следующему [2].

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  $\Pi(\tau_1, \tau_2, R_0) = \Pi(\tau_1, \tau, R_0) + \Pi(\tau, \tau_2, R_0)$  (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 введем 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  $\delta\Pi$ . 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 ис-

пытаний за время  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в режимах соответственно  $R_1$  и  $R_2$  запасы ресурса составят  $\delta\bar{\Pi}_1(\tau_1) > \delta\bar{\Pi}_2(\tau_2)$ .

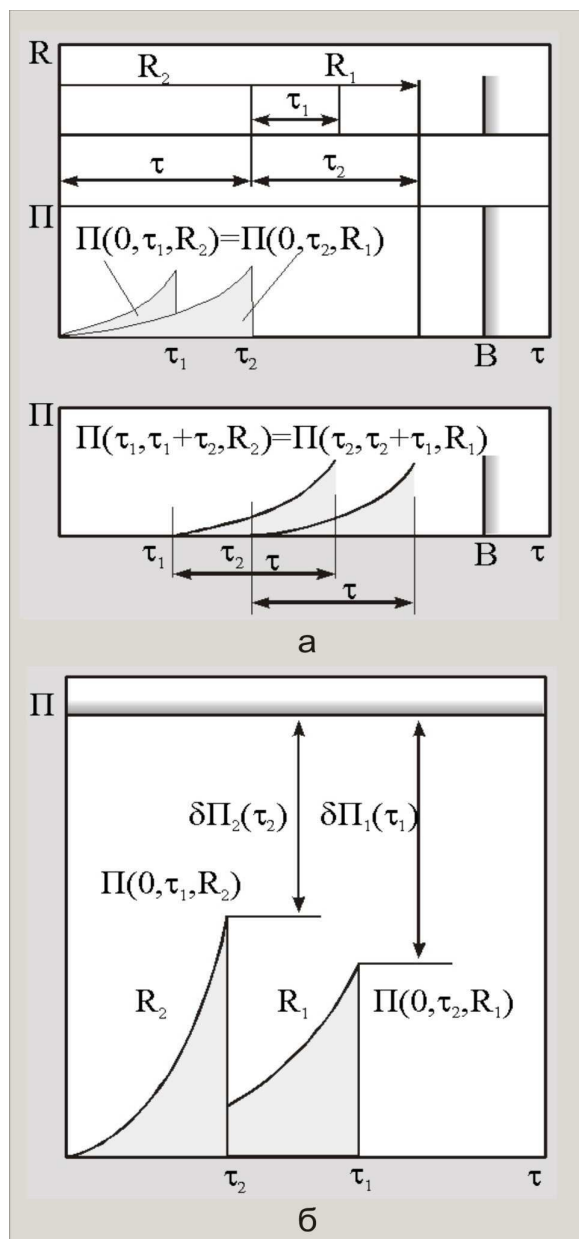


Рис. 1. Условия определения запаса ресурса ГТД

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

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

$$h_{\text{кор}} \text{ в } m_{\text{кор}}; \quad (5)$$

- состав поверхностного слоя лопатки:

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

• микроструктура (фазовый состав) поверхности слоя лопатки:

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

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

Таким образом:

$$\Pi_{\text{кор}} = [h_{\text{кор}}, \bar{C}_{\text{кор}}, \bar{\Phi}_{\text{кор}}]^T \quad (8)$$

$$\text{или } \Pi_{\text{кор}} = [m_{\text{кор}}, \bar{C}_{\text{кор}}, \bar{\Phi}_{\text{кор}}]^T \quad (9)$$

В соответствии с принципом независимого суммарного запаса ресурса изделия от режима испытания конечное состояние по коррозионной стойкости лопатки, соответствующее эксплуатационным условиям нагружения, может быть воспроизведено в испытаниях различными методами, включая как традиционно используемые методы ускоренных испытаний, так и применяя новые методы. В частности, в данной работе предлагается ускоренные испытания сопловых лопаток турбин ГТД проводить в виде последовательно реализуемых нагружений  $R_i$ :

- травление лопатки в электролите –  $R_{\text{тр}}$ ;
- электрохимическая обработка (ЭХО) –  $R_{\text{ЭХО}}$ ;
- высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов –  $R_{\text{ВТО}}$ :

$$R_{\text{исп}} \sim R_{\text{тр}} \rightarrow R_{\text{ЭХО}} \rightarrow R_{\text{ВТО}}. \quad (10)$$

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:

$$\bar{\Pi}_{\text{кор.исп}} = f(R_{\text{тр}}, R_{\text{ЭХО}}, R_{\text{ВТО}}) = \bar{\Pi}_{\text{кор.экс}} = f(\tau_{\text{экс}}, \bar{R}_{\text{экс}}), \quad (11)$$

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

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

$$h_{\text{кор.исп}} = f(R_{\text{тр}} \rightarrow R_{\text{ЭХО}}); \quad (12)$$

$$h_{\text{кор.исп}} = h_{\text{кор.экс}}; \bar{C}_{\text{кор.исп}} = \bar{C}_{\text{кор.экс}};$$

$$\text{I: } \begin{cases} h_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); \bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); \\ \bar{\Phi}_{\text{кор.исп}}^{(1)} = F(R_{\text{тр}}); R_{\text{тр}} = f(\bar{\mathcal{E}}_{\text{тр}}, T_{\text{тр}}, \tau_{\text{тр}}); \\ \bar{\mathcal{E}}_{\text{тр}} = [e_{\text{тр.1}}, \dots, e_{\text{тр.n}}]^T; \end{cases}$$

$$\text{II: } \begin{cases} h_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{ЭХО}}); \bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{ЭХО}}); \\ \bar{\Phi}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = F(R_{\text{ЭХО}}); \\ R_{\text{ЭХО}} \square \bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)} = f(\bar{\mathcal{E}}_{\text{ЭХО}}, J_{\text{ЭХО}}, T_{\text{ЭХО}}, \tau_{\text{ЭХО}}) \\ \bar{\mathcal{E}}_{\text{ЭХО}} = [e_{\text{ЭХО.1}}, \dots, e_{\text{ЭХО.l}}]^T, \end{cases}$$

где  $h_{\text{кор.исп}}^{(1)}, h_{\text{кор.исп}}^{(2)}$  – толщина коррозионного слоя после травления и ЭХО;  $\bar{\mathcal{E}}_{\text{тр}}, \bar{\mathcal{E}}_{\text{ЭХО}}$  – электролиты, включающие  $e_{\text{тр.1}}, \dots, e_{\text{тр.n}}$  и  $e_{\text{ЭХО.1}}, \dots, e_{\text{ЭХО.l}}$  компонент (соли для приготовления раствора электролита);  $\bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(1)}, \bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(2)}$  – 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 микроструктуре (фазовому составу):

$$\bar{\Phi}_{\text{кор.исп}} = \bar{\Phi}_{\text{кор.экс}};$$

$$h_{\text{кор.исп}}^{(3)} = \text{idem} = h_{\text{кор.исп}}^{(1)} + h_{\text{кор.исп}}^{(2)};$$

$$\bar{C}_{\text{кор.исп}}^{(3)} = \text{idem} = \bar{C}_{\text{кор.экс}}; \quad (13)$$

$$\bar{\Phi}_{\text{кор.исп}} = F(R_{\text{ВТО}});$$

$$R_{\text{ВТО}} = f[\text{соли}, T_{\text{ВТО}}, \tau_{\text{ВТО.1}}, \tau_{\text{ВТО.2}}, \tau_{\text{ВТО.3}}],$$

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.

Повреждаемость рабочих лопаток турбины, в отличие от сопловых, в эксплуатационных условиях определяется суммированием повреждаемости от действия статического  $\Pi_{\text{ст}}$ , вибрационного (многоциклового)  $\Pi_{\text{уст}}$ , повторно-статического (малочастотного)  $\Pi_{\text{мпу}}$  и коррозионного  $\Pi_{\text{кор}}$  нагружений:

$$P_{\Sigma} = P_{CT} + P_{MЦУ} + P_{УСТ} + P_{КОР} \quad (14)$$

Поэтому метод, предназначенный для испытания сопловых лопаток, можно модернизировать применительно к рабочим лопаткам турбины. При этом испытания лопатки необходимо проводить, чередуя химико-термическое  $R_{Х-Т}$  и механическое  $R_{Мех}$  нагружения (рис.2):

$$R_{исп} \sim (R_{Х-Т} \rightarrow R_{Мех}) \rightarrow \dots \rightarrow (R_{Х-Т} \rightarrow R_{Мех}), \quad (15)$$

где  $R_{Х-Т} \sim R_{Тр} \rightarrow R_{ЭХО} \rightarrow R_{ВТО}$

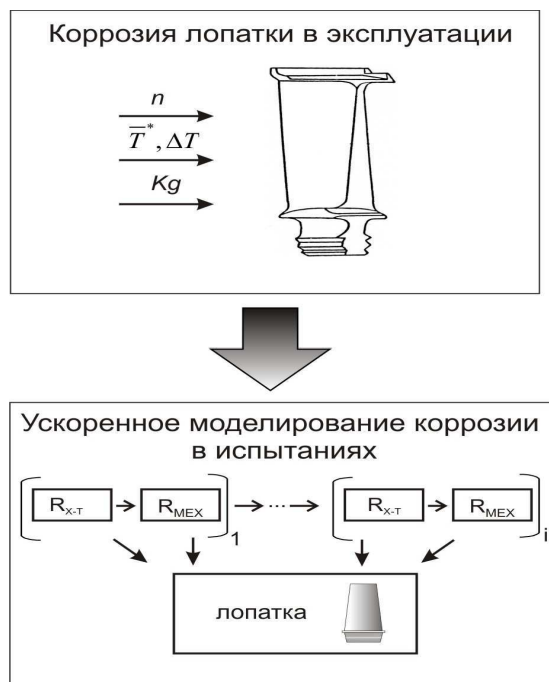


Рис. 2. Порядок ускоренного моделирования коррозии при испытаниях

Таким образом, повышение достоверности испытаний рабочих лопаток турбины достигается за счет многократной цикличе-

ской обработки путем предварительной химической обработки в электролите и термодинамического воздействия на элемент газовым потоком с агрессивной атмосферой  $CO_2$  и  $SO_2$ . При этом сначала проводят химическую обработку в электролите, затем электрохимическую анодную обработку, далее механическое нагружение, включающее статическое, повторно-статическое и многоцикловое нагружение. После чего цикл повторяется до тех пор, пока не будет воспроизведена эксплуатационная повреждаемость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

### Список литературы

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976, 216 с.
2. Гишваров А.С. Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем. Уфа, Гилем, 2000, 338 с.
3. Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И. и др.- Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния. К.: Наук. Думка, 1985.-280 с.
4. Ускоренное моделирование высокотемпературной газовой коррозии лопаток турбины ГТД // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сб. тр. межд. научн. техн. конф. - Самара, 2003, с. 455-461.

## INCREASE OF EFFICIENCY OF ACCELERATED CORROSION TESTS OF NOZZLE VANES OF A TURBINE ENGINE

© 2006 A.S. Gishvarov, M.N. Davydov

USATU

In the given activity the method of modelling of the high-temperature gas corrosion is considered, based on purposeful complex effect and allowing to receive results, close to real operation conditions, for shorter time in comparison with duration of operation.