

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕСУРС РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Ануров Ю.М., Федорченко Д.Г. (СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара),

Ножницкий Ю.А. (ЦИАМ, г. Москва),

Семенов А.П. (ВВИА им. Н.Е. Жуковского, г. Москва)

Теплозащитные покрытия (ТЗП), обеспечивая снижение температуры тела лопатки, увеличивая время прогрева лопатки при изменении режима работы двигателя и защищая поверхность металла от коррозионно-эрозионного воздействия агрессивной среды продуктов сгорания топлива являются одним из наиболее эффективных средств увеличения ресурса лопаток турбины и двигателя в целом.

Изменение эффективности охлаждения внешней поверхности стенки (только конвективного), связанное с применением ТЗП:

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta = (1 - \theta_0) \left(1 - \frac{1}{1 + Bi_n \theta_0} \right) \quad (1)$$

где, $Bi_n = \alpha_r \delta_n / \lambda_n$, δ и δ_n - толщины стенки и покрытия, λ и λ_n - теплопроводность стенки и покрытия.

Откуда видно, что функция $\Delta\theta$ при фиксированных значениях Bi_n изменяется немонотонно и имеет максимум (рис.1)

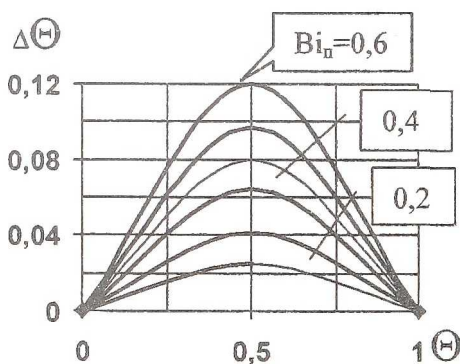


Рисунок 1- Зависимость увеличения эффективности охлаждения под ТЗП от эффективности охлаждения поверхности при отсутствии ТЗП

Из (1) следует, что обеспечиваемое ТЗП снижение температуры поверхности стенки зависит от уровня исходной без ТЗП эффективности охлаждения стенки и уровня параметра Bi_n , зависящего от интенсивности внешнего теплообмена и толщины покрытия.

Эффект снижения температуры лопатки, оцениваемый величиной $\Delta\theta$, оказывается большим на взлетных режимах и уменьшается при переходе к высотным крейсерским режимам, что обусловлено уменьшенным значением параметра Bi_n (рис.2).

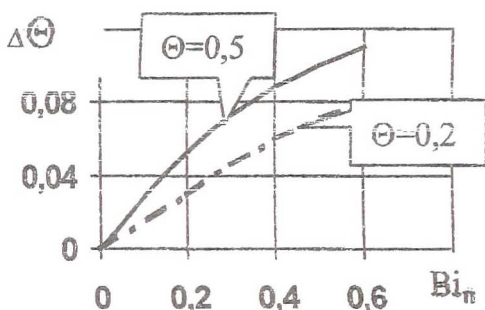


Рисунок 2- Влияние эксплуатационного режима и ступени турбины на увеличение эффективности охлаждения лопатки за счет применения ТЗП

Увеличение толщины покрытия, ведущее к росту параметра Bi_n и уменьшению температуры лопатки, одновременно приводит к увеличению массы ТЗП, нагружающей поперечные несущие сечения лопатки. Для оценки изменения долговечности лопатки, связанного с применением ТЗП, воспользуемся зависимостью, связывающей длительную прочность $\sigma_{дл}$ материалов лопаток, долговечность τ (час) и абсолютную температуру T стенки (К) :

$$\bar{\tau} = \left[\frac{1}{\bar{\sigma}_p} \left(\frac{A}{\sigma_p} \right)^{\frac{\Delta T}{T}} \right]^{\frac{1}{T_{Кс}}} \quad (2)$$

где $\bar{\tau} = \tau_n / \tau$, $\bar{\sigma}_p = \sigma_{pn} / \sigma_p$, индекс "п" относится к параметрам при наличии ТЗП.

Из (2) при условии, что $\bar{\tau} > 1$, получаем критерий целесообразности применения ТЗП в форме

$$\frac{\Delta T}{T} \geq \frac{\lg \bar{\sigma}_p}{\lg(A/\sigma_p)}, \quad (3)$$

определяющий тот минимальный уровень уменьшения температуры лопатки под покрытием, выше которого применение ТЗП обеспечивает увеличение ее долговечности.

Очевидно, что для конкретной конструкции лопатки необходимо делать оценку изменения долговечности с применением многомерных моделей теплопередачи. При известных граничных условиях ее выполнение не представляет затруднений. Тем не менее на начальных этапах проектирования лопаток применение описанного подхода оказалось весьма полезным для обоснованного выбора толщины ТЗП.

Численным анализом эффективности использования ТЗП в рабочих лопатках турбины получено, что :

- эффект от применения ТЗП в снижении температуры лопатки зависит от уровня исходной (без ТЗП) эффективности конвективного охлаждения Θ и достигает максимальной величины в области $\Theta=37...50\%$ при толщине слоя керамики до 300 мкм;

- эффект снижения температуры лопатки зависит от плотности теплового потока и поэтому растет с увеличением давления и температуры газа ;

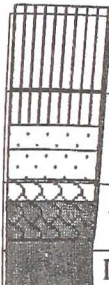
- при $\Theta < 20\%$ и $\Theta > 75\%$ ТЗП становится ущербным, поскольку снижение температуры и соответствующее увеличение предела длительной прочности материала лопатки не компенсирует нагружения лопатки массой покрытия.

Если вопросы оценки ресурса и эквивалентности стендовых испытаний и эксплуатации в настоящее время решены достаточно полно, то вопросы оценки работоспособности деталей в условиях интенсивного коррозионно - эрозийного воздействия скоростных газовых потоков требуют дополнительных научных исследований.

Структура двух типов теплозащитного покрытия, доведенного и широко используемого на фирме НК и перспективного, находящегося в стадии доводки, показана на рис.3 и 4.


Нанесение ТЗП осуществляется по парофазовой технологии на установке УЭ-175 путем испарения слитков металла или брикетов керамики электронным лучом с последующей конденсацией паров на разогретую в вакууме поверхность детали. Жаростойкие слои под керамикой могут наноситься конденсацией в вакууме, а также способом диффузионного насыщения или вакуумно-плазменной технологией высоких энергий (ВПТВЭ) на установке МАП.

Структура покрытия получается "столбчатой", где отдельные кристаллы керамики слабо связаны друг с другом, и тесно связаны только с поверхностью лопатки. Особенностью описанной конструкции ТЗП яв-



Керамика $ZrO_2-8\%Y_2O_3$	70-100 мкм	Конденсация в вакууме
Микрослой Ni-Cr-Ai-Y + $ZrO_2-8\%Y_2O_3$	40-60 мкм	Конденсация в вакууме
Подслой Ni-Cr-Ai-Y	20-40 мкм	Конденсация в вакууме
Подложка		Сплав типа ЖС

Рисунок 3. Конструкция и структура доведенного ТЗП



$ZrO_2-8\%Y_2O_3-Al_2O_3$	5-10 мкм	Конденсация в вакууме
Керамика $ZrO_2-8\%Y_2O_3$	100-250 мкм	Конденсация в вакууме
Ni-Cr-Ai-Y	20-40 мкм	Диффузионное насыщение
Подслой на основе Ni с добавками Al, Cr, Ta, Re	10-20 мкм	ВПТВЭ МАПІ
Подложка		Сплав типа ЖС

Рисунок 4. Конструкция и структура комбинированного ТЗП

ляется то, что на окончательно готовом покрытии отмечается структурная сетка или "блочность" с незначительным растрескиванием по границам блоков, что не является дефектом и не снижает работоспособности покрытия.

Важным условием надежной работы ТЗП является наличие высокоэффективной схемы конвективного охлаждения, когда на основных, а лучше на всех режимах работы двигателя, поверхностные слои детали испытывают напряжения сжатия. При этом границы между блоками замыкаются и не пропускают к микрослою горячий газ. Кроме того, в комбинированном покрытии на поверхность основной керамики наносится тонкий плотный слой керамики $ZrO_2-8\%Y_2O_3-Al_2O_3$ со свойствами сверхпластичности для предотвращения доступа газа к границам блоков.

На рис.5 представлены замеры вытяжки лопаток турбины ВД со штатным теплозащитным покрытием, подслоем, микрослоем и керамика которого получены конденсацией в вакууме, и комбинированным покрытием, где подслой - диффузионный, а керамика - конденсат[3]. Кроме покрытия проверялись лопатки со смерчевым охлаждением в зоне гладких каналов, не охваченных вихревой матрицей.

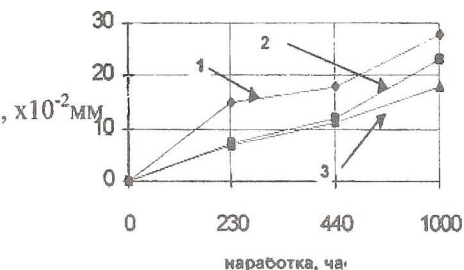


Рисунок 5 - Вытяжка пера Δ :
 1 - лопатки со штатным ТЗП,
 2 - лопатки со штатным ТЗП и улучшенным охлаждением,
 3 - лопатки с комбинированным ТЗП

По результатам испытаний на базе выполненных обмеров (рис.5) можно сделать следующие выводы:

- лопатки с улучшенным охлаждением имеют наименьшую вытяжку, что свидетельствует об уменьшении температуры стенки пера;
- лопатки с комбинированным покрытием имеют вытяжку меньшую, чем лопатки с чисто конденсированным покрытием, при одной и той же толщине керамического слоя, что свидетельствует о том, что конденсированные подслои и микрослои нагружают несущее сечение пера, а диффузионный слой участвует в поле центробежных сил как несущий.

Процесс нанесения ТЗП довольно трудоемкий, однако сложности нанесения ТЗП окупаются значительным повышением долговечности защищаемой детали.

Проведенные длительные эквивалентно-циклические испытания двигателей, в составе рабочего колеса турбины которого находились рабочие лопатки со штатным ТЗП и рабочие лопатки с идентичным жаростойким покрытием, но без керамического слоя, показали весьма существенное влияние керамики на скорость расходования алюминия из поверхностных слоев. Так в жаростойких покрытиях лопаток без керамического слоя содержание алюминия снизилось на 25%, а в лопатках со штатным ТЗП только на 4% [2]. Кроме того, результаты проведенных испытаний однотипных рабочих лопаток турбины с жаростойким покрытием в системе установки каскада ВД газогенератора и полноразмерного газотурбинного двигателя (условия работы лопаток во всех случаях были одинаковыми по температуре, напряженности, химическому составу и скорости омывающих продуктов сгорания топлива и отличались только давлением

газа в турбине) показали, что при повышении давления процессы окисления идут интенсивнее, см. рис. 6.

На основании приведенных на рис.6 экспериментальных данных, аналитическая зависимость при многорежимном процессе окисления между толщиной оксидной пленки - h , температурой - T и временем окисления - τ можно записать в виде:

$$h_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left(K_0 \times \exp \left[\frac{-Q_0}{RT_i} \right] \times \tau_i \times K_i \times P^n \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

где m , K_0 - константы зависящие от материала и коррозионной среды; Q_0 - условная энергия активации; R - газовая постоянная, индекс i - характеризует режим работы детали, K_i , n - эмпирические коэффициенты; P - давление газа.

Разрушение оксидных пленок наиболее интенсивно происходит при термоциклировании. Это же утверждение справедливо, как показывает опыт доводки теплозащитных покрытий лопаток турбины ГТД, и для керамических слоев многослойных ТЗП.

На процесс температурного деформирования керамического слоя в термоцикле нагружения лопатки накладываются деформации, связанные с газовыми и центробежными силами, действующими на лопатку



Рисунок 6 - Зависимость степени окисляемости покрытия от давления газа

Расчеты напряжений отрыва, действующих на фрагмент растрескавшегося керамического слоя ТЗП, выполненные методом конечных элементов (МКЭ) показывают, что составляющая суммарных напряжений отрыва от градиента температур по его толщине не зависит от линейных размеров фрагмента, определяется только перепадом температур и толщиной слоя и концентрируется по границе фрагмента.

Напряженность покрытия в направлении касательной к контуру поперечного сечения определяется разностью между средней температурой покрытия и температурой поверхности металла.

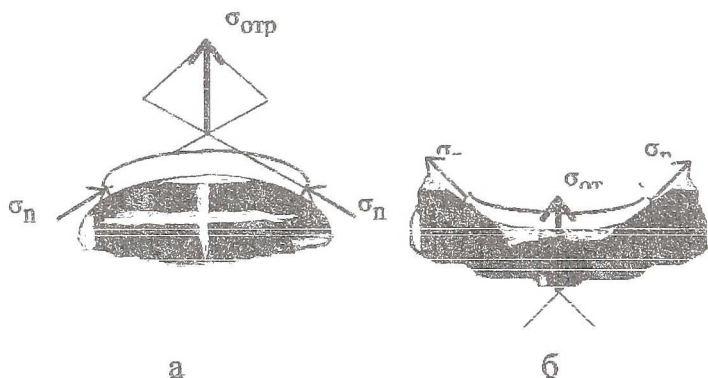


Рисунок 7-Схема образования напряжений отрыва керамического слоя:
 а - в покрытии напряжения сжатия, контур выпуклый,
 б - в покрытии напряжения растяжения, контур вогнутый

Напряжения отрыва, вызванные средней напряженностью покрытия в направлении касательной к профилю, стремятся оторвать покрытие от лопатки если они отрицательны и контур выпуклый, см. рис.7а, или, если они положительные, а контур профиля вогнутый, см. рис.7б.

Лопатки, отливаемые с монокристаллической структурой обладают анизотропией свойств упругости, прочности, пластичности и ползучести в направлениях кристаллографических осей. Поэтому расчеты деформаций монокристаллических лопаток должны проводиться с учетом анизотропии указанных свойств.

Таким образом, работоспособность керамического покрытия определяют общая напряженность (деформация) покрытия, вызванная деформациями самой лопатки, температурой и разностью коэффициентов линейного расширения покрытия и материала лопатки и напряжениями отрыва покрытия от лопатки.

Как показывает опыт доводки ТЗП, уровень общих деформаций в керамическом слое покрытия остывшей лопатки может составлять до 0,3%, при работе двигателя до 0,46%, уровень напряжений отрыва покрытия в остывшей лопатке до 46МПа, при работе двигателя до 10МПа.

Преобладающим механизмом разрушения керамических слоев теплозащитных покрытий лопаток ГТД является отслаивание керамического слоя по границе металл-керамика вследствие термомеханического циклического нагружения, интенсифицированного окислением металлического подслоя связки между керамикой и поверхностью лопатки.

В соответствии с основными повреждающими факторами, ресурс керамических покрытий может быть определен по критерию окисления металлического подслоя (по аналогии с истощением длительной прочностью) и по истощению малоциклового долговечности самого керамического слоя (по аналогии с истощением малоциклового долговечности основного материала лопатки).

Ресурс ТЗП по критерию окисления жаростойкого металлического подслоя может быть определен как время до образования критической толщины окисления - когда отслаивание керамического слоя ТЗП происходит за один цикл нагружения.

Для однорежимного двигателя время до образования критического окисления - ресурса металлического подслоя ТЗП может быть определен на основании зависимости как.

(5)

$$\tau_p = \frac{h_p^m}{\left(K_1 \times \exp \left[-\frac{Q_1}{RT} \right] \times K_2 \times P^n \right)^m}$$

где h_p - критическая толщина окисленного слоя, при которой отслоение керамического слоя происходит за один цикл нагружения (выхода двигателя на максимальный режим).

Для многорежимных двигателей ресурс ТЗП по критерию окисления металлического подслоя может быть определен на основании гипотезы линейного суммирования повреждений.

$$\tau_3 = \left[1 / \sum_{i=1}^l \left(C_i / \tau_{p_i} \right)^{1/m} \right]^m, \quad (6)$$

где τ_3 - эквивалентное время до истощения ресурса при данной раскладке режимов работы изделия - ресурс.

Коэффициент запаса по долговечности в часах определится как:

$$K_r = \frac{\tau_3}{\tau_z}, \quad (7)$$

где τ_z - ресурс изделия, на котором установлена рассматриваемая деталь с керамическим теплозащитным покрытием.

Для многорежимных двигателей, когда в процессе одного эксплуатационного цикла могут иметь место несколько частичных изменений режима работы, величину циклической наработки необходимо определять на основе методов суммирования повреждений и эквивалентного приве-

дения всех видов эксплуатационных циклов к единому. В качестве единого эквивалентного цикла нагружения целесообразно принять цикл запуска с последующим выходом двигателя на максимальный режим.

Эквивалентная циклическая наработка с учетом всех видов эксплуатационных циклов может быть определена как:

$$N_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J N_j \times \eta_j = \sum_{j=1}^J \left(\frac{\Delta \varepsilon_f \times \eta_j}{\Delta \varepsilon'_0 - (\Delta \varepsilon'_0 - \Delta \varepsilon_f \times \eta_j) \times \Pi_{\tau}} \right)^b, \quad (8)$$

где J - количество видов эксплуатационных циклов; N_j - количество циклов j -го вида; η_j - коэффициент приведения.

Величина коэффициентов приведения зависит от величин деформаций в начале и конце циклов нагружения $\Delta \varepsilon_f/\min$, $\Delta \varepsilon_f/\max$ и может быть определена с помощью методов эквивалентного приведения циклов, например [5], или с использованием обобщенного принципа Мазинга.

Коэффициент запаса по циклической долговечности определится как

$$K_N = \frac{N}{N_{\Sigma}}, \quad (9)$$

где N_{Σ} - эксплуатационное число циклов выхода двигателя на максимальный режим.

Коэффициент запаса по разрушающим деформациям покрытия в начале ресурса:

$$K_{\varepsilon_0} = \frac{\Delta \varepsilon'_f}{\Delta \varepsilon_f}, \quad (10)$$

в конце ресурса изделия:

$$K_{\varepsilon} = K_{\varepsilon_0} (1 - \Pi_{\tau}) + \Pi_{\tau}. \quad (11)$$

Работоспособность теплозащитных покрытий определяется способностью жаростойкого подслоя сопротивляться окислению, а керамического слоя - термомеханической малоциклового усталости. Интенсивность истощения малоциклового долговечности характеризуется общей напряженностью (деформацией) покрытия, вызванной деформациями

само́й детали и напряжениями отрыва керамического слоя покрытия. Количественное истощение работоспособности ТЗП может быть оценено степенью окисленности металлического подслоя - величиной накопленного "статического" повреждения

$$\Pi_{\tau} = \sum_{i=1}^I \frac{h_i}{h_p}$$

величиной истощения малоцикло́вой долговечности самого керамического слоя ТЗП

$$\Pi_N = \sum_{j=1}^J \frac{N_j}{N_{\text{н}}}$$

и величиной истощения малоцикло́вой долговечности по напряжениям отрыва керамического слоя от детали

$$\Pi_z = \sum_{r=1}^R \frac{Z_r}{Z_{\text{н}}}$$

где K_{τ} , K_N , K_z - нормируемые коэффициенты запаса.

Практически оценку эквивалентности стендовых испытаний и эксплуатации целесообразно проводить отдельно по каждому критерию истощения ресурса ТЗП [6]. В этом случае эквивалентная наработка в эксплуатации по критерию окисления жаростойкого подслоя ТЗП по результатам стендовых испытаний может быть определена по формуле:

$$\text{ЭКСПЛ} = \frac{\left[\sum_{i=1}^I \left(K_0 \times \exp \left[\frac{-Q_0}{RT_i} \right] \times \tau_i \times K_1 \times P_i^n \right)^{1/m} \right]^m_{\text{ЭЦИ}}}{\left[\sum_{j=1}^J \left(K_0 \times \exp \left[\frac{-Q_0}{RT_j} \right] \times C_j \times K_1 \times P_j^n \right)^{1/m} \right]^m_{\text{ЭКСП}} \times K} \quad (12)$$

Циклическая долговечность при форсированных испытаниях определяется:

$$Z_{\text{цикл}} = \frac{f(\Delta\sigma_{\text{ЭКСПЛ}})}{f(\Delta\sigma_{\text{ЭЦИ}}) \times K_z} \quad (13)$$

где $\Delta\sigma_{\text{ЭКСПЛ}}$, $\Delta\sigma_{\text{ЭЦИ}}$ - соответственно размахи напряжений отрыва в циклах эквивалентных испытаний и эксплуатации.

Величина эквивалентной циклической наработки в часах эксплуатации определяется через продолжительность среднего эксплуатационного цикла:

$$\tau_{N_{\text{экспл}}} = N_{\text{экспл}} \times \tau_{\text{с.э.}} ; \quad \tau_{Z_{\text{экспл}}} = Z_{\text{экспл}} \times \tau_{\text{с.э.}} \quad (14)$$

где $\tau_{\text{с.э.}}$ - продолжительность осредненного эксплуатационного цикла, определяется на основе анализа статистики эксплуатации рассматриваемого двигателя, или двигателя прототипа установленного на летательном аппарате аналогичного назначения.

Следует заметить, что в данной постановке задачи об оценке ресурса покрытия геометрия и конструкция детали может быть произвольной, может варьироваться в разумных пределах толщина покрытия и отдельных его слоев, могут быть произвольными условия нагружения, но технология нанесения покрытия, определяющая его прочностные и адгезионные свойства и в связи с этим, как показал опыт доводки покрытия, в значительной степени его ресурс, должна соответствовать технологии его нанесения на испытываемой детали.

Список литературы

1. Клименко В. Н., Нагога Г. П., Сапожников В. М. Исследование эффективности теплозащитных покрытий на охлаждаемых лопатках газовых турбин. В кн.: Высокотемпературные газовые турбины (Материалы 5 - й межотраслевой конференции 28 - 30 января 1986 г.) Труды ЦИАМ N 1198. М.: ЦИАМ, 1987 с. 30 - 33.
2. Семенов А.П., Ануров Ю.М., Гаврилов Н.Г., Абраимов Н.В. Особенности конструирования рабочих лопаток турбины с теплозащитными покрытиями. В кн.: Защитные покрытия (научно методические материалы). М. ВВИА им. Жуковского. 1990. с. 129-134.
3. Никитин Н.И. Расчет жаростойкости металлов. М.: Metallургия. 1976. 207с.
4. Гецов Л.Б. Детали газовых турбин. Ленинград.: Машиностроение, 1982. 296с.
5. Цейтлин В.И., Федорченко Д.Г. Оценка циклической долговечности деталей, работающих при сложных программах нагружения. - Пробл. прочности, 1983, N 2, с.13-19.
6. Кузнецов Н. Д., Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1976, - 216с.