

УДК 539.219:620.193.2

П.Г. КРУКОВСКИЙ<sup>1</sup>, К.А. ТАДЛЯ<sup>1</sup>, А.И. РЫБНИКОВ<sup>2</sup>, И.И. КРЮКОВ<sup>2</sup>,  
Н.В. МОЖАЙСКАЯ<sup>2</sup>, В. КОЛАРИК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики, Украина

<sup>2</sup>Центральный котлотурбинный институт им. И.И. Ползунова, Россия

<sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Germany

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕСУРСА И СРЕДНИХ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГТД

В работе рассмотрены методы, использующие расчетно-экспериментальный подход для определения ресурса, остаточного ресурса и средних рабочих температур защитных металлических покрытий типа  $M\text{CrAlY}$ . Приведена физическая модель процессов окисления и диффузии основного оксидообразующего элемента покрытия – алюминия. Представлены результаты расчетов ресурса и средней рабочей температуры покрытия в определенном срезе лопатки газовой турбины.

**лопатки газовых турбин, защитные покрытия, ресурс, рабочая температура, моделирование, диффузия**

### Введение

Для защиты от высокотемпературного окисления лопатки современных газовых турбин защищаются металлическими покрытиями типа  $M\text{CrAlY}$ , где  $M$  – металл ( $\text{Ni}$  – никель и/или  $\text{Co}$  – кобальт),  $\text{Cr}$  – хром,  $\text{Al}$  – алюминий,  $\text{Y}$  – иттрий, являются основными элементами, входящими в сплав покрытия. Покрытия  $M\text{CrAlY}$  могут наноситься как отдельным покрытием, так и быть промежуточным между внешним термобарьерным покрытием и основным сплавом лопатки.

Ресурс таких покрытий в энергетических газовых турбинах составляет порядка 30000 ч (~3 – 4 года) и более. Ресурс покрытий типа  $M\text{CrAlY}$  определяется временем диффузионного ухода основного оксидообразующего элемента алюминия ( $\text{Al}$ ) из защитного покрытия, начальное содержание которого в покрытиях составляет от 6 до 12%. Экспериментальный подход к определению ресурса практически невозможен из-за большой продолжительности и дороговизне эксперимента. Практическое применение существующих моделей, описывающих процессы высокотемпературного окисления и диффузии в покрытиях типа  $M\text{CrAlY}$ , для долгосрочного прогнозирования часто затруднительно или невозможно

из-за отсутствия достоверных значений входных параметров модели, например, коэффициентов диффузии. В литературе имеются сведения о коэффициентах диффузии элементов только для простых композиций сплавов (двойные или тройные сплавы), в то время, как применяемые на практике сплавы более сложные. В наиболее близкой по составу основных элементов сплава работе [1] имеются сведения о коэффициенте диффузии алюминия, но только для тройного сплава  $\text{NiCrAl}$ .

### 1. Методы определения ресурса и средних рабочих температур защитных покрытий лопаток ГТУ

Предлагаемые в данной работе методы по определению ресурса и средней рабочей температуры используют расчетно-экспериментальный подход [2], который позволяет найти эффективный коэффициент диффузии  $\text{Al}$  и другие неизвестные входные параметры модели на основе использования методов решения обратных задач по данным краткосрочных экспериментов.

Суть подхода в нашем случае состоит в выборе таких параметров модели массообменных процессов в системе покрытие – основной сплав и такого на-

бора экспериментальных данных, которые в совокупности позволяют на основе решения обратных задач получить более адекватную модель и с ее помощью провести более точное долгосрочное прогнозирование массообменных процессов и связанного с ними ресурса металлических покрытий при заданном критерии ресурса.

Схема подхода (рис. 1) для прогнозирования массообменных процессов сводится к следующему:

1. Построение (выбор) математической модели, которая достаточно хорошо описывает основные физические процессы, происходящие в исследуемой системе и определяющие ресурс покрытия. В нашем случае это модели, основанные на описании диффузионных процессов в виде уравнений в частных производных. Такая модель позволяет находить расчетные профили концентрации  $C_M$  для алюминия (Al).

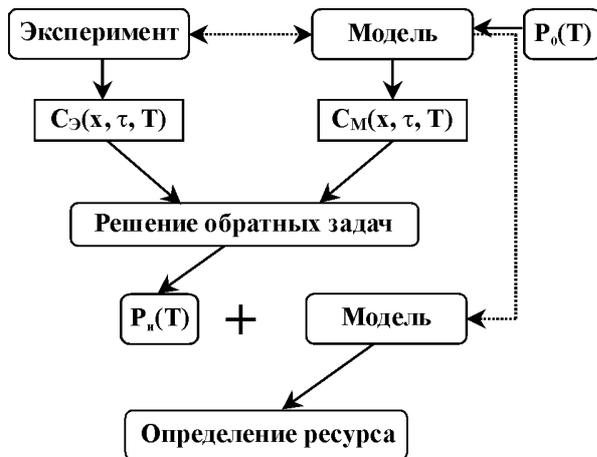


Рис. 1. Схема расчетно-экспериментального подхода (метода) по оценке ресурса покрытий

2. Проведение краткосрочных экспериментальных исследований для определения законов образования окисной пленки и распределений (профилей) концентраций Al в покрытии и основном сплаве ( $C_Э$ ) для разных температур и различных моментов времени (выдержек образцов покрытий в печах).

3. Идентификация неизвестных параметров  $P_и$  модели по данным эксперимента на основе решения обратных задач.

4. Долгосрочное прогнозирование массообменных процессов и ресурса покрытий на основе выбранной в п. 1 модели с найденными в п. 3 параметрами массообмена.

Схема методики для определения средней рабочей температуры и остаточного ресурса покрытия приведена на рис. 2 и сводится к следующему:



Рис. 2. Схема метода для определения остаточного ресурса и средней рабочей температуры защитных покрытий лопаток газовых турбин

1. Предварительные исследования: По схеме, описанной выше, проводится определение параметров модели  $P_и(T)$ . В результате решение обратных задач для различных температур строятся зависимости параметров  $P_и(T)$  от температуры.

2. Получение данных с натурального объекта (исследование лопатки газовой турбины после наработки). В качестве экспериментальных данных используются локальные распределения концентрации Al в покрытии  $C_Э$ , полученные либо с помощью рентгеноспектрального микроанализа, либо методами неразрушающего контроля после отработки покрытия на лопатке газовой турбины определенного количества часов. Возможно также использование другой экспериментальной информации о протекавших диффузионных процессах, например положение границ зон обезлегирования.

3. Определение рабочей температуры и остаточного ресурса покрытия. Для расчетов использу-

ется та же модель, что и в п. 1. Выбирается температура начального приближения из области, исследованной в п. 1. По этой температуре определяется вектор начальных параметров. Вектор начальных параметров используется в модели для получения расчетных значений распределения концентрации алюминия. В качестве экспериментальных данных используются данные п. 2. Далее проводится решение обратной задачи по определению такой температуры покрытия  $T_i$ , для которой соответствующие этой температуре значения параметров  $P_{ii}(T)$  и модель дадут близость расчетных  $C_M$  и экспериментальных  $C_E$  распределений концентраций алюминия в анализируемом покрытии.

## 2. Физическая модель

Физическая модель диффузионного перераспределения алюминия в системе “окисел – покрытие – основной сплав”, полученная на основе анализа результатов экспериментальных исследований покрытий типа  $NiCoCrAlY$ , имеет следующее описание (рис. 3).

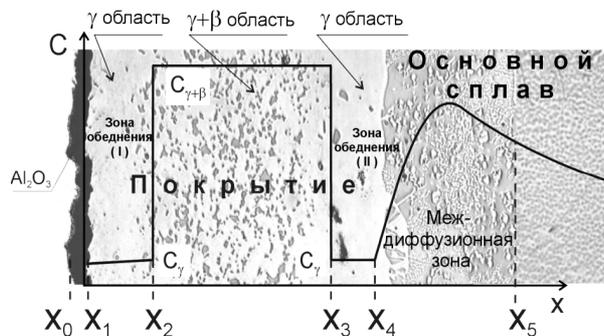


Рис. 3. Типичное распределение концентрации алюминия в покрытии типа  $MCrAlY$  и основном сплаве

Окисел образуется соединением алюминия и кислорода, который абсорбируется из газовой среды и посредством диффузии через слой окисла  $x_1-x_0$  поступает к границе  $x_1$  окисел – покрытие.

Диффузия алюминия из покрытия происходит в двух направлениях – к границе  $x_1$  окисел – покрытие и к границе  $x_4$  покрытие – основной сплав.

За счет диффузионного ухода алюминия из  $\gamma + \beta$  двухфазной зоны покрытия происходит образование обедненных алюминием однофазных зон обеднения с пониженным содержанием алюминия ( $\gamma$  фаза) как со стороны окисла, так и со стороны основного сплава (зоны обеднения I и II, рис. 2). Весь алюминий, уходящий из покрытия, уходит из  $\gamma + \beta$  – двухфазной зоны покрытия за счет исчезновения (расхождения)  $\beta$  фазы. Профиль концентрации алюминия в области покрытия типа  $MeCrAlY$  имеет вид ступенчатой кривой, а в области основного сплава кривой с максимумом в междиффузионной зоне.

Можно выделить шесть основных зон: окисел  $x_0 < x < x_1$ ; область  $x_1 < x < x_2$ , обедненная алюминием, где присутствует только одна  $\gamma$  фаза; двухфазная область  $x_2 < x < x_3$ , в которой одновременно присутствуют  $\gamma$  и  $\beta$  фазы; зона  $x_3 < x < x_4$  в области покрытия, также обедненная Al с  $\gamma$  фазой; междиффузионная зона в основном сплаве  $x_4 < x < x_5$ , обогащенная Al и зона  $x > x_5$  основного сплава, куда диффундирует алюминий из междиффузионной зоны. Накопление алюминия в междиффузионной зоне во времени происходит за счет образования различных фаз (например  $\gamma + \beta$  – и  $\gamma + \gamma'$  – фаз) вследствие разного количественного состава и соответствующего ему термодинамическому равновесию элементов в покрытии и основном сплаве. Накопленный в междиффузионной зоне алюминий частично диффундирует в основной сплав и обратно в покрытие.

В рассмотренной модели все границы, кроме границы  $x_4$  (граница раздела покрытия и основного сплава), являются подвижными. Границы  $x_2$  и  $x_3$  движутся друг к другу вследствие уменьшения содержания  $\beta$  фазы в  $\gamma + \beta$  – двухфазной зоне покрытия  $x_2 < x < x_3$ , из которой диффундирует алюминий. Концентрации общего содержания алюминия  $C$  и  $\beta$  фазы  $C_\beta$  в  $\gamma + \beta$  двухфазной зоне  $x_2 < x < x_3$  уменьшаются во времени. Математическая модель, описывающая изложенные выше процессы, более детально представлена в [2].

#### 4. Эксперимент

Полированные образцы с 200-микронным  $\text{MCrAlY}$  покрытием, содержащим 10% алюминия, имеющим  $\gamma\text{-(Ni/Co, Cr)}+\beta\text{(NiAl)}$  структуру выдерживались на воздухе при 900 и 950 °C до 20000 ч. Покрытие наносилось на сплав IN738 по вакуумно-плазменной технологии (LPPS). После выдержек проводились металлографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ образцов.

#### 5. Результаты

Идентификация параметров модели проводилась с использованием выдержек 300 и 1000 часов (рис. 4).

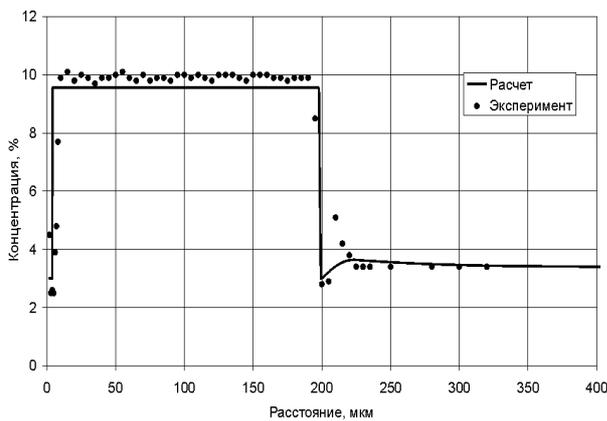


Рис. 4. Расчетное распределение концентрации Al после идентификации параметров модели и экспериментальные данные для выдержки 1000 ч при температуре 900 °C

Результаты прогноза сравнивались с результатами эксперимента для выдержек 10000 и 20000 ч (рис. 5).

На рис. 6 представлены результаты расчета ресурса покрытий для трех температур. В качестве критерия ресурса покрытий типа  $\text{MCrAlY}$  принято считать время исчезновения  $\beta$  фазы. Из результатов видно, что достаточным для энергетических газовых турбин ресурсом (3 года) обладает покрытие при толщине 200 микрон при температурах ниже 950 °C.

Оценка средних рабочих температур покрытия по сечению лопатки проводилась по вышеизложенному методу.

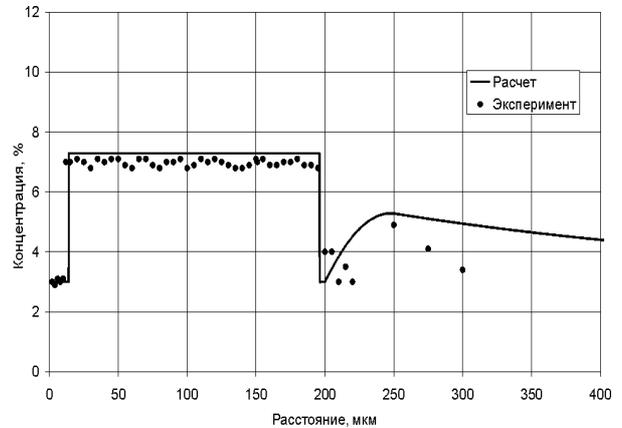


Рис. 5. Расчетные распределения концентрации алюминия после идентификации параметров модели и экспериментальными данными для выдержки 20000 ч при температуре 900 °C

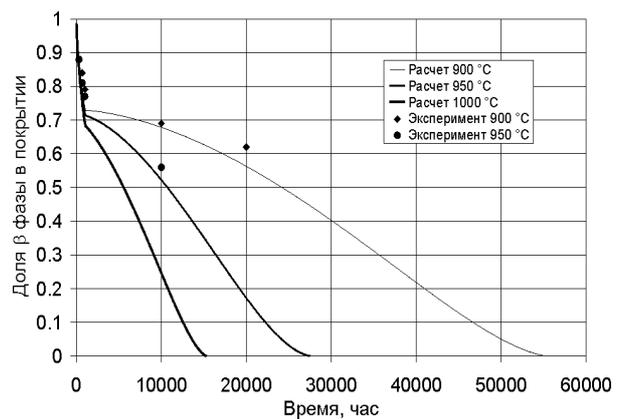


Рис. 6. Падение во времени содержания  $\beta$  фазы в покрытии

Исследовались две рабочие лопатки с двух последовательных ступеней турбины. Предварительно проводились экспериментальные исследования покрытия, нанесенного на лопатки газовой турбины в местах, указанных на рис. 7 и 8. В результате были получены данные о положении границ зон обезлигирования ( $x_1, x_2, x_3$  и  $x_4$  на рис. 3), которые использовались в решении обратных задач для определения рабочих температур покрытия. Стоит отметить, что представлены результаты для сечений лопаток, которые существенно отличаются по высоте, что

привело к тому, что уровень температур лопаток с разных ступеней практически одинаков.

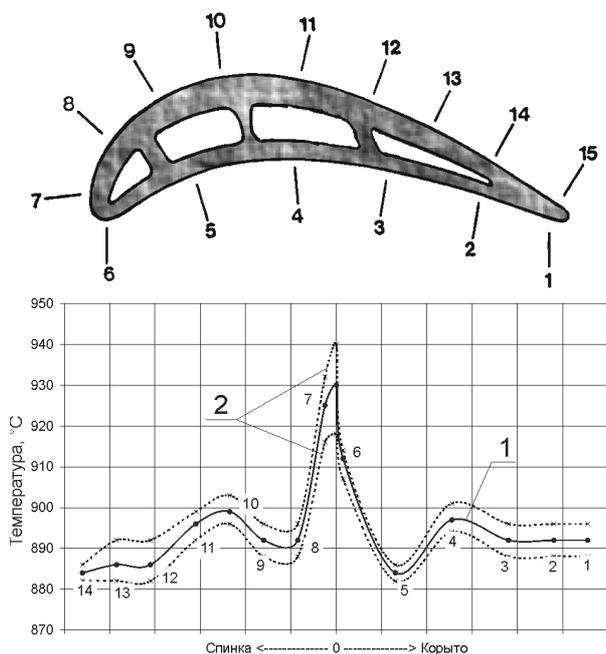


Рис. 7. Распределение рабочих температур по контуру лопатки первой ступени после отработки 26400 ч. Пронумерованные точки соответствуют пронумерованным позициям на лопатке. Кривая 1 – расчет, кривые 2 – диапазон ошибок измерений

### Заключение

Представлены методы, которые позволяют проводить анализ ресурса, остаточного ресурса и средней рабочей температуры защитных покрытий типа  $M\text{CrAlY}$  на лопатках газовых турбин.

Полученные при помощи изложенных методов результаты показали достаточно хорошее согласование с экспериментальными данными.

Представлены также результаты определения средних локальных рабочих температур в защитных покрытиях, полученные для лопаток двух различных ступеней после отработки ими 26400 ч.

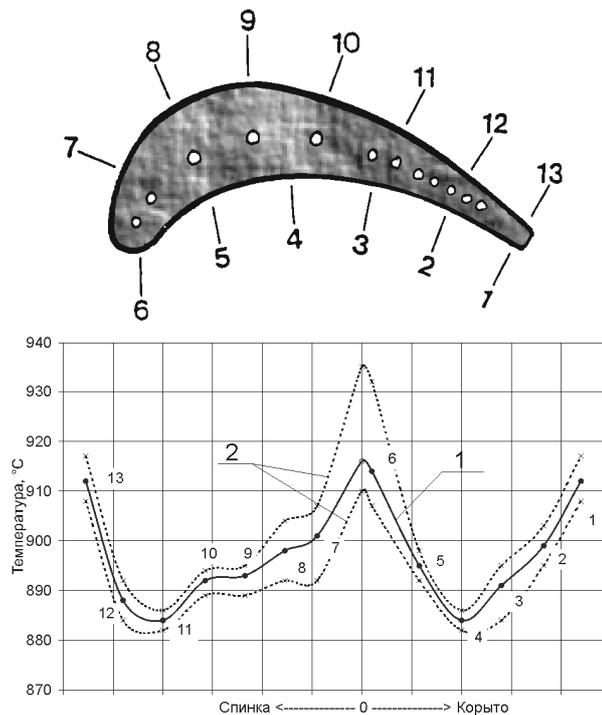


Рис. 8. Распределение рабочих температур по контуру лопатки второй ступени после отработки 26400 ч. Пронумерованные точки соответствуют пронумерованным позициям на лопатке. Кривая 1 – расчет, кривые 2 – диапазон ошибок измерений

### Литература

1. Nesbitt J.A., Heckel R.W. Interdiffusion in Ni-Rich, Ni-Cr-Al Alloys at 1100 and 1200 °C: Part II. Diffusion Coefficients and Predicted Concentration Profiles // *Met. Trans.* 18A December. – P. 2075 – 2086.
2. Круковский П.Г., Тадля К.А. Расчетно-экспериментальный подход к анализу ресурса и температуры защитных покрытий лопаток газовых турбин // *Промышленная теплотехника.* – 2003. – Т. 23, № 4. – С. 41 – 50.

Поступила в редакцию 12.04.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук, член-корр. НАН Украины В.Н. Клименко, вице-президент ОАО ХК «Рассвет-энерго», Киев.