

недомеленых часток, а також підвищити продуктивність по твердій фазі за рахунок великої інтенсивності розмелу на першому ступені.

Преваги даної конструкції РПА дозволили створити високоефективну компактну лінію для виробництва СМ продуктивністю 3000 кг/год по суспензії. Лінія виготовлена і встановлена на Бродівському молочному заводі, де успішно експлуатується в безперервному режимі з 2003 року.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. – М.: Медицина, 1983. – 160 с.

2. Марчевський В.М., Улітько Р.М., Семінський О.О. Млин пульсаційний. – Заявка №20031212977, МПК В01F7/02.

3. Марчевский В.Н., Семинский А.О. Разработка безотходной технологии и оборудования получения соевого молока // Сборник тезисов докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Экология. Человек. Общество”. – К.: ИВЦ “Видавництво “Політехніка”. – 2002. – С. 485-486.

Одержано 02.10.2004 р.

УДК 539.219:620.193.2

Тадля К.А., Круковский П.Г.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННОГО РЕСУРСА И РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГТУ

У роботі розглянуті методи, що використовують розрахунково-експериментальний підхід для оцінки ресурсу і середніх робочих температур захисних металевих покриттів МСrAlY. Приведено фізичну модель процесів окислення та дифузії основного окислюючого елементу покриття - алюмінію. Представлено результати розрахунків ресурсу і робочої температури покриттів.

В работе рассмотрены методы, использующие расчетно-экспериментальный подход для оценки ресурса и средних рабочих температур защитных металлических покрытий МСrAlY. Приведена физическая модель процессов окисления и диффузии основного окисляющего элемента покрытия - алюминия. Представлены результаты расчетов ресурса и рабочей температуры покрытий.

Considered in this paper are the methods that use calculation and experimental approach for МСrAlY coating life time and operation temperature estimation. Physical model of aluminium oxidizing and diffusion processes is presented. Coating life time and operation temperatures calculation results are proposed.

$C$  – концентрация, %;

$P$  – вектор искомых параметров модели;

$T$  – температура, °С;

$x$  – координата, мкм;

$\tau$  – время, ч.

**Индексы:**

$m$  – модель;

$\varepsilon$  – эксперимент.

#### Введение

Лопатки современных энергетических газотурбинных установок (ГТУ) подвержены высокотемпературному окислению и защищаются металлическими покрытиями типа МСrAlY. Покрытия

МСrAlY могут быть нанесены как отдельным покрытием так и быть промежуточным между внешним термобарьерным покрытием и основным сплавом лопатки. Ресурс таких покрытий в энергетических газовых турбинах составляет порядка

3-4 года и более. Коррозионный ресурс  $\text{MCrAlY}$  покрытий определяется временем диффузионного ухода основного оксидообразующего элемента алюминия (Al) из защитного покрытия, процентное содержание которого в покрытиях составляет от 6 до 12 %. Экспериментальный подход к определению ресурса практически не возможен из-за большой продолжительности и дороговизне, практическое применение существующих моделей, описывающих процессы высокотемпературного окисления и диффузии в покрытиях типа  $\text{MCrAlY}$  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 Al и другие неизвестные входные параметры модели на основе использования решений обратных задач.

Суть подхода в нашем случае состоит в выборе такой модели массообменных процессов и такого набора экспериментальных данных, которые в совокупности позволяют на основе решения обратных задач получить более адекватную модель и с ее помощью более точное долгосрочное прогнозирование массообменных процессов и 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 основ-

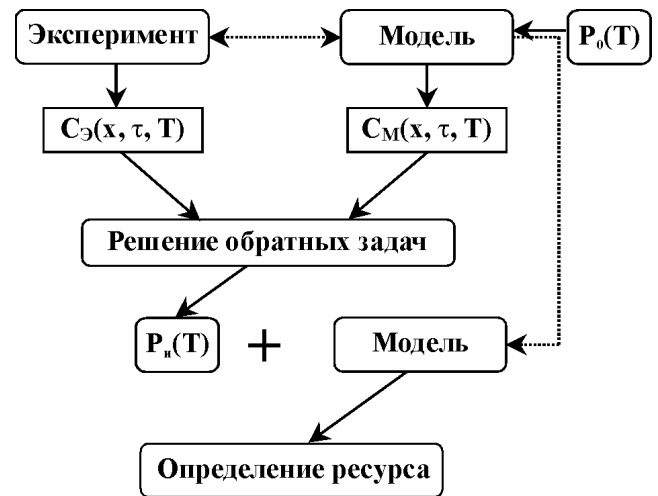


Рис. 1. Схема подхода по оценке ресурса покрытий.

ные физические процессы, происходящие в исследуемой системе и определяющие ресурс покрытия. В нашем случае только модели второго типа могут быть использованы в таком подходе. Эта модель позволяет находить расчетные профили концентрации  $C_m$  для Al.

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  $P_n$  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.

Обычно используют более простую схему прогнозирования (рис. 1): модель + найденные из литературы параметры модели  $P_0 = \text{прогноз}$ .

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

1. Предварительные исследования. По схеме, описанной выше проводится определение параметров модели  $P_f(T)$ . В результате решение об-



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

ратных задач для различных температур строятся зависимости параметров  $P_f(T)$  от температуры.

2. Получение данных с натурального объекта (исследование лопатки газовой турбины). В качестве экспериментальных данных используются распределение концентрации Al по покрытию  $C_E$ , полученное 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 используется 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  $T_i$ , при которой значения параметров  $P_f(T)$  дадут близость

расчетных  $C_M$  и экспериментальных  $C_E$  распределений концентраций алюминия в анализируемом покрытии.

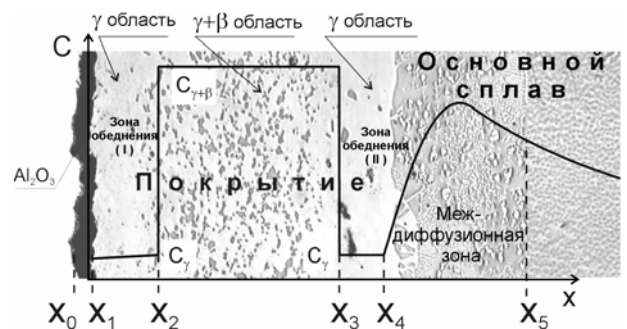
## 2. Физическая модель

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).

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;
- к границе  $x_4$  покрытие – основной сплав

За счет диффузионного ухода алюминия из  $\gamma + \beta$  двухфазной зоны покрытия происходит образование обедненных алюминием однофазных зон 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 (расходования)  $\beta$  фазы. Профиль концентрации алюминия в области покрытия типа MCrAlY 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  $x_1 < x < x_2$ ,



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

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  $x_4 < x < x_5$ , обогащённая 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, детально представлена в [2].

#### 4. Эксперимент

Полированные образцы с 200 – микронным NiCoCrAlY покрытием, содержащим 10% алюминия, имеющим  $\gamma$ -(Ni/Co, Cr)+ $\beta$ (NiAl) структуру выдерживались на воздухе при 900 и 950 °С 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. На рис. 4 приведены результаты после идентификации параметров модели для выдержки 1000ч.

На рис. 5 представлены результаты расчета коррозионного ресурса покрытий для температур

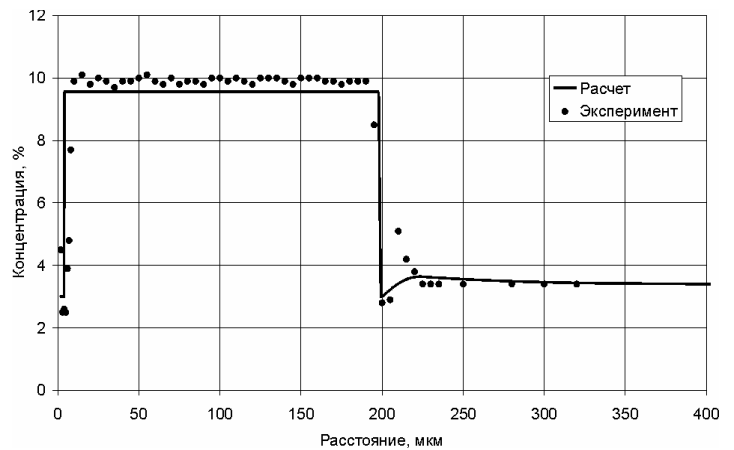


Рис. 4. Расчетное распределения концентрации Al после идентификации параметров модели в сравнении с экспериментальными данными для выдержки 1000 ч при температуре 900 °С.

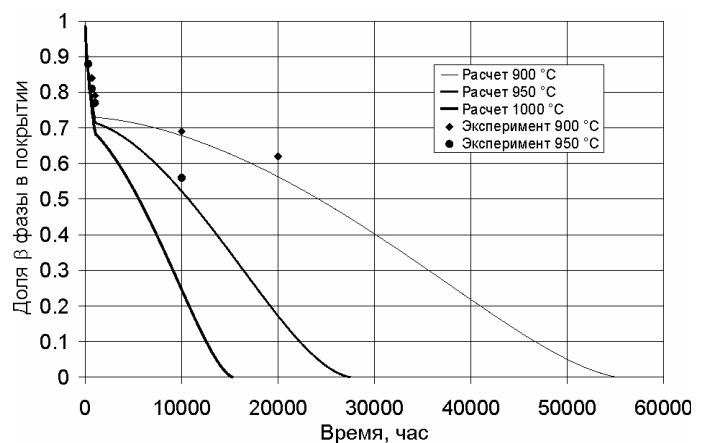
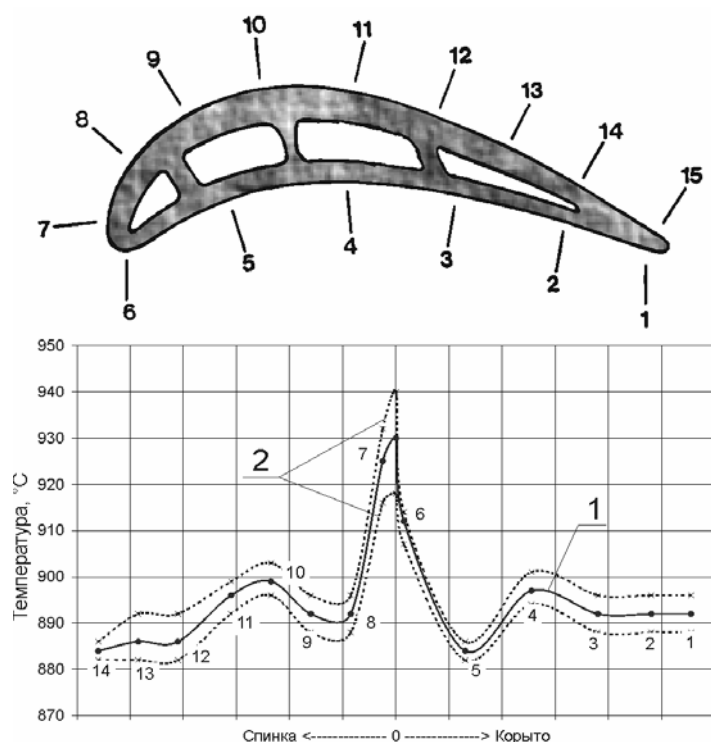


Рис. 5. Падение во времени содержания  $\beta$  фазы в покрытии.

900, 950 и 1000 °С. В качестве критерия ресурса покрытий типа 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 °С.

Оценка средних рабочих температур покрытия по сечению лопатки проводилась по вышеизложенному методу. Исследовалась рабочая лопатка. Предварительно проводились экспериментальные исследования покрытия, нанесенного на лопатку газовой турбины в местах, указанных на рис. 6. В



**Рис. 6. Распределение рабочих температур по контуру лопатки после отработки 26400 ч в турбине. Пронумерованные точки соответствуют пронумерованным позициям на лопатке. 1 – расчет; 2 – диапазон ошибок измерений.**

результате были получены данные о положении границ зон обезлегиривания ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ), которые использовались в решении обратных задач для определения рабочих температур покрытия. Стоит отметить, что остаточный коррозионный ресурс

покрытия для данной лопатки превышает 25 тыс. часов представлены результаты для сечений лопаток, которые существенно отличаются по высоте, что привело к тому, что уровень температур лопаток с разных ступеней практически одинаков.

### Заключение

Представлены методы, которые позволяют проводить анализ ресурса, остаточного ресурса и средней рабочей температуры защитных покрытий типа MCrAlY лопаток газовых турбин. Показанные результаты, полученные при помощи изложенных методов, показали достаточно хорошее согласование с экспериментальными данными. Представлены также результаты определения средней рабочей температуры защитного покрытия, полученные для лопатки после отработки 26400 ч.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *J.A. Nesbitt, R.W. Heckel.* 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 pp 2075-2086.
2. *Круковский П.Г., Тадля К.А.* Расчетно-экспериментальный подход к анализу ресурса и температуры защитных покрытий лопаток газовых турбин// *Пром. Теплотехника.*- 2003.- Т. 23.- № 4.- С. 41-50.

*Получено 02.10.004 г.*