

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-6>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/84TVN615.pdf>

DOI: 10.15862/84TVN615 (<http://dx.doi.org/10.15862/84TVN615>)

УДК 669.017

Васильев Евгений Викторович

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»

Россия, Тольятти¹

Младший научный сотрудник

E-mail: avellko@yandex.ru

Модель диффузионных процессов при наличии микрповреждений в покрытии оксида иттрия на хrome

¹ Россия, г. Тольятти, ул. Жилина, д. 1А, кв. 16

Аннотация. В настоящее время для повышения ресурса работы деталей тепловых двигателей, работающих при высоких температурах, широко используются жаростойкие сплавы с защитными керамическими и металлокерамическими покрытиями. В качестве защитных покрытий для таких сплавов могут использоваться многослойные покрытия на основе оксида или хромита иттрия с промежуточными пластичными слоями хрома. Однако при наличии микрповреждений в таком покрытии возможно газонасыщение хрома кислородом и азотом или образование пористости во время эксплуатации, что может привести к разрушению покрытия. Следовательно, для создания оптимальной технологии нанесения такого покрытия необходимо проведение математического моделирования процессов диффузии в покрытии и основе, а также их взаимодействия с окружающей средой во время эксплуатации. Однако аналитическое решение задачи диффузии кислорода и азота в многокомпонентных системах в настоящее время не известно. В данной работе рассмотрена модель микрповреждений в покрытии, в которой атмосферные газы – кислород и азот – поступают к подложке, и каждый такой источник можно рассмотреть как полусферу заданного радиуса и постоянной концентрации, расположенную в неограниченной однородной среде хрома. Получены некоторые закономерности диффузионных процессов в системах с оксидом иттрия Y_2O_3 . На базе теории диффузии в многокомпонентных системах предложена модель диффузионных процессов в металлокерамических жаростойких покрытиях. Предложенная модель взаимодействия покрытия со средой и основой раскрывает сущность диффузионных процессов образования защитных покрытий и их восстановления в процессе высокотемпературной эксплуатации.

Ключевые слова: диффузия; жаростойкое покрытие; оксид иттрия; хром.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Васильев Е.В. Модель диффузионных процессов при наличии микрповреждений в покрытии оксида иттрия на хrome // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/84TVN615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/84TVN615

Статья опубликована 25.11.2015.

Несмотря на то, что в настоящее время наиболее распространенными жаропрочными материалами для деталей газотурбинных двигателей являются никелевые суперсплавы на интерметаллидной основе с покрытиями системы Me-Cr-Al-Y [1-4], поиск альтернативных материалов и покрытий для высокотемпературного применения по-прежнему остается актуальным. Известны также работы по разработке перспективных покрытий на основе иттрия [5, 6] для сплавов хрома [7, 8], однако многие их свойства до сих пор остаются неизученными. В работе [9] показано, что наилучшими защитными свойствами керамики, содержащей Y, является хромит иттрия $YCrO_3$.

Для создания оптимальной технологии нанесения такого покрытия необходимо проведение математического моделирования процессов диффузии в покрытии и основе, а также их взаимодействие с насыщающей средой во время эксплуатации.

Известно [10], что коэффициенты диффузии кислорода и азота через защитный слой на много порядков больше, чем коэффициенты иттрия и хрома, поэтому можно пренебречь встречной диффузией иттрия и хрома. Аналитическое решение задачи диффузии кислорода и азота в многокомпонентных системах сейчас не известно. По-видимому, решение данной задачи возможно лишь численными методами. Поэтому в данной работе была поставлена цель - решить задачу, позволяющую получить основные закономерности диффузионных процессов в системе Y_2O_3 -Cr при наличии в покрытии микроповреждений (микротрещин).

Предположим, что на поверхности чистого хрома нанесен слой Y_2O_3 , который имеет микродефекты – цилиндрические каналы радиуса r_0 , расположенные перпендикулярно к поверхности хрома (рис. 1). На поверхности этих каналов будет существовать поток атомов кислорода, величина которого будет определяться коэффициентом поверхностной диффузии.

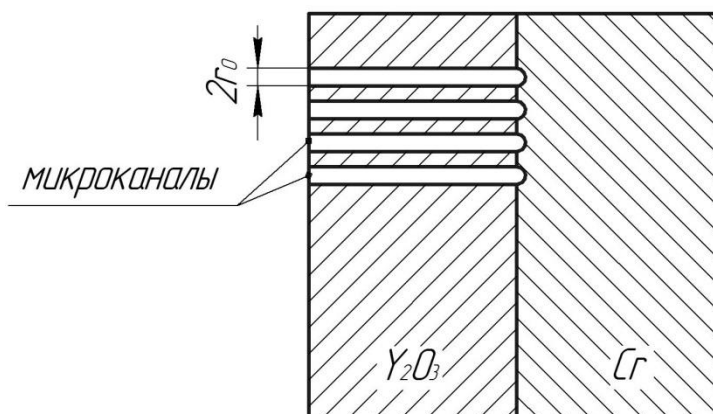


Рис. 1. Модель микроповреждений в покрытии

Известно, что коэффициенты поверхностной диффузии на несколько порядков больше коэффициентов объемной диффузии, и поэтому можно предположить, что на границе цилиндрического канала с хромом быстро установится постоянная концентрация кислорода C . Тогда каждую из полусфер микроскопического канала на поверхности хрома можно рассматривать как источник кислорода с постоянной концентрацией, кислород из этого источника будет диффундировать как непосредственно в хром – поток I_1 , так и через слой Y_2O_3 в Cr – поток I_2 (рис. 2). Пренебрегая диффузионным потоком I_2 по сравнению с I_1 , то есть пренебрегая потоком хрома через границу Y_2O_3 с Cr мы сводим нашу задачу на начальном этапе насыщения к сферическому источнику радиуса r_0 постоянной концентрации C , расположенному в неограниченной однородной среде хрома.

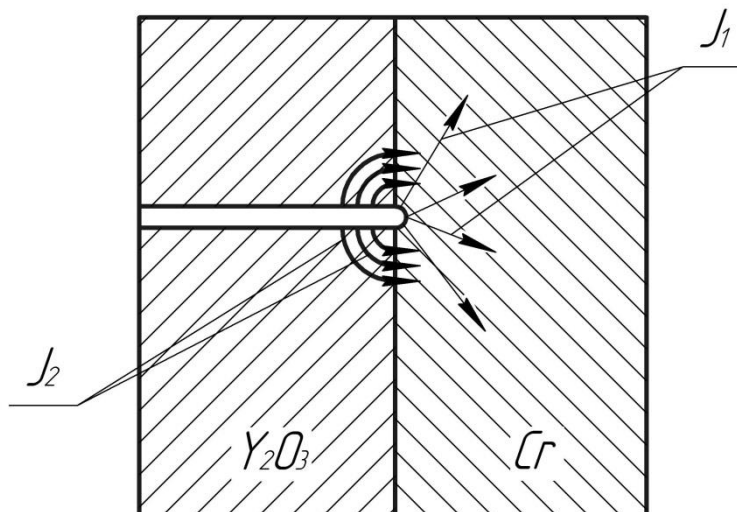


Рис. 2. Диффузионные потоки в покрытии с микроповреждением

В этом случае кислород будет диффундировать в эту среду и создавать сферическую диффузионную зону. Ввиду сферической симметрии поставленной задачи, концентрация диффундирующего вещества зависит лишь от расстояния от источника r и не зависит от Θ и φ , т.е. существуют только радиальные потоки вещества и отсутствуют азимутальные и номерные потоки. При диффузии кислорода из источника радиуса r_0 возникает полусферическая зона.

Далее задача может быть сформулирована и решена при двух различных условиях.

1. Принимая, что коэффициент диффузии кислорода в хrome много больше, чем коэффициент диффузии хрома, можно рассматривать диффузию кислорода из сферического источника радиусом r_0 с постоянной концентрацией \bar{C} и постоянным коэффициентом диффузии и считать, что концентрация кислорода в хrome уменьшается с увеличением r непрерывно от \bar{C} до нуля. За толщину образующегося слоя Cr_2O_3 в этом случае принимается расстояние, на котором концентрация кислорода равна 0,6 атомной или 0,21 весовой. В этом случае задача математически формулируются следующим образом. Требуется решить уравнение диффузии:

$$\frac{dC(r_0, t)}{dt} = D_1 \left[\frac{d^2 C(r, t)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dC(r, t)}{dr} \right], \quad (1)$$

где D_1 – коэффициент диффузии насыщающего элемента,

$C(r, t)$ – концентрация насыщающего элемента на расстоянии r в момент времени t ,

при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{cases} C(r_0, t) = \bar{C} \\ C(\infty, t) = 0 \\ C(r, 0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\left. \frac{dC(r, t)}{dr} \right|_{r=\infty} = 0 \quad r \geq r_0 \quad (3)$$

2. Принимая, что коэффициент диффузии кислорода в Cr_2O_3 много больше коэффициента самодиффузии хрома [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], считаем, что

кислород из источника радиуса r_0 с постоянной концентрацией \bar{C} диффундирует через сферический слой Cr_2O_3 и на границе с хромом образует Cr_2O_3 , то есть концентрация кислорода на границе растущего слоя Cr_2O_3 с Cr уменьшается с концентрации \tilde{C} , равной 0,6 атомной или 0,21 весовой, до нуля. В этом случае математически задача формулируется следующим образом: требуется решить уравнение диффузии (1) с начальными и граничными условиями (2, 3) и добавляются условия:

$$C(r, t) = C_0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{dr_1}{dt} = -\frac{D}{\tilde{C}} \cdot \frac{dC}{dr} \right|_{r=r_1} \quad (5)$$

где r_1 – радиус слоя Cr_2O_3 .

Найдем решение уравнения (4) с начальными и граничными условиями (2–4).

Положим в уравнении (1)

$$V = C \cdot r \quad (6)$$

Тогда

$$C = \frac{V}{r}; \quad \frac{dC}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dV}{dt}; \quad \frac{dC}{dr} = \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} - \frac{V}{r^2}$$

$$\frac{d^2C}{dr^2} = \frac{1}{r} \frac{d^2V}{dr^2} - \frac{2}{r^2} \frac{dV}{dr} + \frac{2V}{r^3} \quad (7)$$

и поставим в (1)

$$\frac{1}{r} \frac{dV}{dt} = D_1 \left[\frac{1}{r} \frac{d^2V}{dr^2} - \frac{2}{r^2} \frac{dV}{dr} + \frac{2V}{r^3} + \frac{2}{r^2} \frac{dV}{dr} - \frac{2V}{r^3} \right] = D_1 \frac{1}{r} \frac{d^2V}{dr^2} \quad \text{или} \quad \frac{dV}{dt} = D_1 \frac{d^2V}{dr^2} \quad (8)$$

со следующими начальными и граничными условиями

$$\left. \begin{array}{l} V(r_0, t) = \bar{C}r_0 \\ V(\infty, t) = 0 \\ V(r, 0) = 0 \end{array} \right\}_{r > r_0} \quad (9),$$

где r_0 – радиус канала.

Введем новую переменную $x = r - r_0$. Получим уравнение

$$\frac{dV}{dt} = D_1 \frac{d^2V}{dx^2} \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} V(0, t) = \bar{C}r_0 \\ V(\infty, t) = 0 \\ V(x, 0) = 0 \end{array} \right\}$$

Используя подстановку $\lambda = \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}$, получим

$$-2\lambda \frac{dC}{d\lambda} = \frac{d^2C}{d\lambda^2} \quad (11)$$

Решением данной задачи на начальном этапе насыщения, является выражение

$$C(r,t) = \frac{\bar{C}r_0}{r} \operatorname{erfc} \frac{r-r_0}{2\sqrt{D_1t}} \quad (12)$$

Так как диффузионный слой имеет полусферическую форму, а образование Cr_2O_3 идет с увеличением объема, то на начальном этапе насыщения возникнут растягивающие напряжения на границе Y_2O_3 с хромом на участках, расположенных между микроканалами, которые могут привести к нарушению сплошности защитного слоя Y_2O_3 .

Предположим, что в слое Y_2O_3 имеется большое количество микропор и микротрещин. Тогда на границе Y_2O_3 с хромом установится постоянная концентрация кислорода, который будет диффундировать в хром, создавая растущий слой Cr_2O_3 .

Предположим, что коэффициент диффузии D_1 кислорода в слое Cr_2O_3 отличается от коэффициента диффузии D_2 кислорода в хrome, а на границе Cr_2O_3 происходит скачкообразное изменение концентрации кислорода, а затем концентрация кислорода постепенно уменьшается до постоянного значения C_0 . В этом случае решение данной задачи сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = D_1 \frac{d^2C_1}{dx^2} \\ \frac{dC_2}{dt} = D_2 \frac{d^2C_2}{dx^2} \end{cases} \quad (13)$$

со следующими начальными и краевыми условиями:

$$\begin{cases} C_1(x,0) = C_0 \\ C_1(x=0,t) = \bar{C} \\ C_1(x=x_r,t) = \underline{C}_1 \end{cases} \quad \begin{cases} C_2(x,0) = C_0 \\ C_2(x=x_2,t) = \bar{C}_2 \\ C_2(\infty,t) = C_0 \end{cases} \quad (14)$$

где C_1 и C_2 - концентрация насыщающего вещества в 1-ой и 2-ой фазах, причем нумерация фаз идет от поверхности образца;

\bar{C} - постоянная концентрация насыщающего вещества на поверхности;

\underline{C}_1 - концентрация насыщающего вещества в 1-й фазе на межфазной границе, которая имеет координату x_r ;

\bar{C}_2 - концентрация насыщающего вещества во 2-й фазе на межфазной границе;

C_0 - начальная концентрация насыщающего вещества в объеме образца;

D_1 и D_2 - коэффициенты диффузии насыщающего вещества в 1-й (Cr_2O_3) и 2-й (Cr) фазах.

Рассмотрим баланс потоков насыщающего вещества на межфазной границе. За время Δt к межфазной границе через единичную площадку со стороны первой фазы поступает вещество, количество которого выражается уравнением $\Delta Q = J_1 \Delta t$, где J_1 - поток насыщающего вещества в 1-й фазе. Используя уравнение Фика, можно написать, что

$$\Delta Q_1 = J_1 \Delta t = D_1 \left(\frac{dC_1}{dx} \right)_{x=x_r} \cdot \Delta t \quad (15)$$

За это же время от межфазной границы во вторую фазу диффундирует вещество, количество которого определяется аналогичным уравнением:

$$\Delta Q_2 = D_2 \left(\frac{dC_2}{dx} \right)_{x=x_r} \cdot \Delta t \quad (16)$$

Таким образом на межфазной границе оседает вещество в количестве, равном

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \quad (17)$$

за счет чего граница перемещается на величину Δx .

Уравнение (17) баланса вещества на границе с учетом уравнений (15) и (16) примет вид

$$(\underline{C}_1 - \overline{C}_2) \Delta x = -D_1 \left(\frac{dC_1}{dx} \right)_{x=x_r} \cdot \Delta t + D_2 \left(\frac{dC_2}{dx} \right)_{x=x_r} \cdot \Delta t$$

Поделив обе части этого уравнения на Δt при $\Delta t \rightarrow 0$ получим

$$(\underline{C}_1 - \overline{C}_2) \frac{dx_r}{dt} = -D_1 \left(\frac{dC_1}{dx} \right)_{x=x_r} + D_2 \left(\frac{dC_2}{dx} \right)_{x=x_r} \quad (18)$$

Введем новую безразмерную переменную

$$\lambda = \frac{x}{x_r} \quad (19)$$

и тогда уравнения (11), (12) и (18) примут вид

$$-x \frac{dx_r}{dt} \cdot \frac{dC_1}{d\lambda} = D_1 \frac{d^2 C_1}{dx^2} \quad (20)$$

$$-x \frac{dx_r}{dt} \cdot \frac{dC_2}{d\lambda} = D_2 \frac{d^2 C_2}{dx^2} \quad (21)$$

$$(\underline{C}_1 - \overline{C}_2) \frac{dx_r}{dt} = \frac{1}{x_r} \cdot \left[-D_1 \left(\frac{dC_1}{d\lambda} \right)_{\lambda=1} + D_2 \left(\frac{dC_2}{d\lambda} \right)_{\lambda=1} \right] \quad (22)$$

Выражая величину dx_r/dt из уравнения (12) и подставляя в уравнения (20) и (21), получим:

$$-2a^2 \lambda \frac{dC_1}{d\lambda} = D_1 \frac{d^2 C_1}{d\lambda^2} \quad (23)$$

$$-2a^2 \lambda \frac{dC_2}{d\lambda} = D_2 \frac{d^2 C_2}{d\lambda^2}, \quad (24)$$

где $a^2 = -\frac{1}{2(\underline{C}_1 - \overline{C}_2)} \cdot \left[-D_1 \left(\frac{dC_1}{d\lambda} \right)_{\lambda=1} + D_2 \left(\frac{dC_2}{d\lambda} \right)_{\lambda=1} \right]$, (25)

а граничные и начальные условия запишутся в виде:

$$\begin{cases} C_1(0) = \overline{C} \\ C_1(1) = \underline{C}_1 \end{cases} \quad \begin{cases} C_2(1) = \overline{C}_2 \\ C_2(\infty) = C_0 \end{cases} \quad (26)$$

Интегрируя уравнения (23) и (24), получим:

$$C_1(x, t) = \frac{A \sqrt{\pi D_1}}{2a} \operatorname{erf} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_1}} + B \quad (27)$$

$$C_2(x,t) = \frac{P\sqrt{\pi D_2}}{2a} \operatorname{erf} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_2}} + Q \quad (28)$$

где A, B, P, Q – постоянные интегрирования.

Используя начальные и граничные условия, получим для C₁:

$$C_1(0) = B = \bar{C}$$

$$C_1(1) = \frac{A\sqrt{\pi D_1}}{2a} \operatorname{erf} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_1}} + B = \underline{C_1}$$

Отсюда

$$\frac{A\sqrt{\pi D_1}}{2a} = -\frac{\bar{C} - C_1}{\operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_1}}} \quad (29)$$

$$C_1(x,t) = \bar{C} - \frac{\bar{C} - C_1}{\operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_1}}} \operatorname{erf} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_1}} \quad (30)$$

Аналогично для C₂ имеем:

$$C_2(1) = \frac{P\sqrt{\pi D_2}}{2a} \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}} + Q = \bar{C}_2$$

$$C_2(\infty) = \frac{P\sqrt{\pi D_2}}{2a} \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}} + Q = C_0$$

Отсюда

$$C_2(x,t) = \frac{1}{1 - \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}}} \left\{ \bar{C}_2 \operatorname{erfc} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_2}} + C_0 \left[\operatorname{erf} \frac{\lambda a}{\sqrt{D_2}} - \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}} \right] \right\} \quad (31)$$

Из формул (30) и (31) получим

$$\left(\frac{dC_1}{d\lambda} \right)_{\lambda=1} = -\frac{\bar{C} - C_1}{\operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_1}}} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{D_1}\right) \quad (32)$$

$$\left(\frac{dC_2}{d\lambda} \right) = -\frac{\bar{C}_2 - C_0}{1 - \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}}} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{D_2}\right) \quad (33)$$

И подставляя соотношения (32) и (33) в уравнение (25) получим уравнение для a, которое имеет вид:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi(C_1 - C_2)}} \left[\frac{\sqrt{D_1}(\bar{C} - C_1)}{\operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_1}}} \exp\left(-\frac{a^2}{D_1}\right) - \frac{\sqrt{D_2}(\bar{C}_2 - C_0)}{1 - \operatorname{erf} \frac{a}{\sqrt{D_2}}} \exp\left(-\frac{a^2}{D_1}\right) \right] \quad (34)$$

Подставляя (25) в (22), получим, что $\frac{dx_r}{dt} = \frac{2a^2}{x_r}$, откуда:

$$x_r = 2a \sqrt{t + \frac{b}{4a^2}} \quad (35)$$

Решая полученное уравнение относительно a при единичных определенных значениях концентраций и коэффициентов диффузии, можно найти численное значение величины a . Таким образом можно отметить, что полученная формула позволяет определить движение межфазной границы, причем параметр a определяется аналитически по формуле (34), в то время как в других моделях эта зависимость была принята необоснованно, а параметр a нельзя было определить заранее. Предложенная модель взаимодействия покрытия со средой и основой раскрывает сущность диффузионных реакций образования защитных покрытий и их восстановления в процессе высокотемпературной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. 632 с.
2. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С., Хагеля У.К. Пер. с англ. В 2-х книгах Кн. 2. / Под ред. Шалина Р.Е. - М.: Metallurgia, 1995. 334 с.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
4. Goral M. The Microstructure and Oxidation Resistance of Aluminide MeCrAlY-Modified Coatings Obtained by Slurry Method on Rene 80 Superalloy // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2012. – Т. 11. – С. 719-723.
5. Oryshich, I.V., Poryadchenko, N.E. (2004). Methods of Protecting VKh-2K Alloy from High-Temperature Gas and Salt Corrosion. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 43(5-6), 305-310.
6. Гончаров В.С., Гончаров М.В., Васильев Е.В. Влияние технологических параметров нанесения иттрий содержащих покрытий на их структуру и свойства // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. №2. С. 179-185.
7. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. Нью-Йорк–Лондон–Сидней–Торонто, 1972. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1976. 568 с., ил.
8. Салли А., Брендз Э. Хром.- Изд. 2-е переработ. и доп. Перев. с англ. М.: Metallurgia, 1971. 360 с.
9. Гончаров В.С., Васильев Е.В. Жаростойкие покрытия на основе иттрия // Вектор науки тольяттинского государственного университета. 2013. №3 (25). С. 136-139.
10. Гончаров В.С. Федоров А.В., Федоров В.В. Универсальный численный метод расчета параметров взаимодействия в реальных диффузионных покрытиях и сварочных соединениях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. №12(24). С. 46-50.

Рецензент: Статья рецензирована членами редколлегии журнала.

Vasil'ev Evgeniy Viktorovich
Togliatti State University
Russia, Togliatti
E-mail: avellko@yandex.ru

Model of diffusion processes in yttrium oxide coating with microdamages onto chromium

Abstract. At the present time for increasing the service life of the heat engines parts, operated at high temperatures, heat-resistant alloys with protective ceramic and metal-ceramic coatings are widely used. As such protective coatings for these alloys multilayer coatings of yttrium oxide or yttrium chromite with chromium intermediate plastic layers can be used. However, the presence of microdamages in the coating may lead to absorption of nitrogen or oxygen or formation of porosity during operation, which may lead to failure. Therefore, it is necessary to model diffusion processes in the coating and substrate, as well as their interaction with environment during operation to create the optimal application technology for this kind of coatings. However, the analytical solution for the diffusion of oxygen and nitrogen in multicomponent systems are not currently known. In this paper we consider a model of microdamages in coating, where the atmospheric gases - oxygen and nitrogen - enter the substrate and each source can be regarded as the hemisphere with constant concentration disposed in an infinite homogeneous chromium. Some patterns of diffusion processes in systems with yttrium oxide Y_2O_3 have been obtained. On the basis of the diffusion theory in multicomponent systems, a model of diffusion processes in cermet heat-resistant coatings has been proposed. This model of interaction between coating, substrate and environment reveals the essence of diffusion processes of protective coatings formation and their recovery during high-temperature operation.

Keywords: diffusion; heat resistant coating; yttrium oxide; chromium.

REFERENCES

1. Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley. – М.: MISIS, 2001. 632 s.
2. Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok / Pod red. Simsa Ch.T., Stoloffa N.S., Xagelya U.K. Per. s angl. V 2-kh knigam Kn. 2. / Pod red. Shalina R.E. - М.: Metallurgiya, 1995. 334 s.
3. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskiy S.A., Lutsenko A.N. Ionno-plazmennye zashchitnye pokrytiya dlya lopatok gazoturbinnnykh dvigateley // Metally. 2007. №5. S. 23–34.
4. Goral M. The Microstructure and Oxidation Resistance of Aluminide MeCrAlY-Modified Coatings Obtained by Slurry Method on Rene 80 Superalloy // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2012. – T. 11. – S. 719-723.
5. Oryshich, I.V., Poryadchenko, N.E. (2004). Methods of Protecting VKh-2K Alloy from High-Temperature Gas and Salt Corrosion. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 43(5-6), 305-310.
6. Goncharov V.S., Goncharov M.V., Vasil'ev E.V. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov naneseniya itriy soderzhashchikh pokrytiy na ikh strukturu i svoystva // Fizika metallov i metallovedenie. 2014. T. 115. №2. S. 179-185.
7. Sims Ch., Khagel' V. Zharoprochnye splavy. N'yu-York–London–Sidney–Toronto, 1972. Per. s angl. M., «Metallurgiya», 1976. 568 s., il.
8. Salli A., Brendz E. Khrom.- Izd. 2-e pererabot. i dop. Perv. s angl. M.: Metallurgiya, 1971. 360 s.
9. Goncharov V.S., Vasil'ev E.V. Zharostoykie pokrytiya na osnove itriya // Vektor nauki tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. №3 (25). S. 136-139.
10. Goncharov V.S. Fedorov A.V., Fedorov V.V. Universal'nyy chislennyy metod rascheta parametrov vzaimodeystviya v real'nykh diffuzionnykh pokrytyakh i svarochnykh soedineniyakh // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2006. №12(24). S. 46-50.