

Кинетика окисления образцов с обоими типами покрытий описывается законом, близким к параболе.

Повышение температуры испытаний до 1000°C (рис. 1, в) приводит к изменению характера кинетических кривых окисления силицированных и алитированных сплавов. В этом случае окисление силицированных образцов описывается вогнутой кривой, т. е. процесс происходит с возрастающей скоростью.

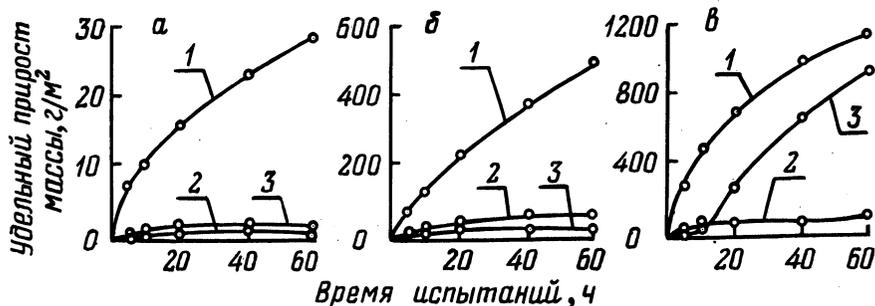


Рис. 1. Кинетика окисления сплава BT1-0 при 700°C (а); 850 (б); 1000°C (в) соответственно; 1, 2, 3 – соответственно необработанный сплав, силицированный, алитированный.

Алюминидные покрытия в начальный период окисляются по параболическому закону и имеют более высокую жаростойкость, чем силицидные. Но период параболического окисления мал, составляя для BT1-0 10 ч, OT4 – 20, BT14 – 40. При больших выдержках наблюдается резкое увеличение скорости окисления незащищенных образцов.

Легирующие элементы, содержащиеся в сплаве BT14, повышают жаростойкость алюминидных покрытий путем их легирования.

УДК 539.219.3

Л.Г.Ворошнин, докт.техн.наук,  
Е.М.Блох, инженер (БПИ)

### ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ЦЕМЕНТАЦИИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В работе разработана математическая модель диффузионных процессов в многокомпонентных двухфазных системах. При разработке математической модели процесса диффузионного насыщения используется модель элементарных сферических ячеек [1].

Состав частицы и граничащего с ней твердого раствора определяется изотермическим разрезом равновесной диаграммы состояния сплава. Рост включений рассматривается в сфере объемом  $1/N$ , где  $N$  – число включений в единице объема сплава. Распределение элементов в сплаве при насыщении многокомпонентного сплава описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений ( $i = 1 - k$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ (1 - V)C_i + \sum_{p=1}^f V_p C_{i,p}^I \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sum_{j=1}^k \tilde{D}_{i,j} \frac{\partial C_j}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где радиус частицы  $p$ -типа –  $R_p$ , плотность –  $N_p$ ,  $p = 1 - f$ ,  $N = \sum_{p=1}^f N_p$  – плотность частиц второй фазы,  $V_p = N_p \cdot 4/3\pi R_p^3$  – объемная доля частиц  $p$ -типа,  $V = \sum_{p=1}^f V_p$  – общая объемная доля второй фазы,  $C_i$  – средняя концентрация  $i$ -го элемента в твердом растворе,  $C_{i,p}^I$  – концентрация  $i$ -го элемента в частице  $p$ -сорта,  $C_i^{\text{общ}} = (1 - V)C_i + \sum_{p=1}^f V_p C_{i,p}^I$  – концентрация  $i$ -го элемента в сплаве. В уравнении (1) между плоскостями, параллельными насыщаемой поверхностью ( $x = 0$ ), диффузионный массоперенос осуществляется в твердом растворе. Рост частицы  $p$ -го типа описывается следующим уравнением:

$$(C_{i,p}^I - C_{i,p}^{\Gamma}) R_p \frac{\partial R_p}{\partial t} = \sum_{j=1}^k \tilde{D}_{i,j} \frac{C_i - C_i^{\Gamma}}{W_p}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

В уравнении (2) – концентрация в твердом растворе на границе с частицей

$$W_p = 1 - \frac{3(1 + R_p/R_*)R_p/R_*}{2[1 + R_p/R_* + (R_p/R_*)^2]}.$$

Величина  $W_p$  в (2) учитывает объемное содержание частиц второй фазы, которая отражается в ячеечной модели значением  $R_*$ . Величины  $C_{i,p}^I$ ,  $C_{i,p}^{\Gamma}$  рассчитываются из условий равновесия на границе частицы и твердого раствора, которое сводится к равенству химических потенциалов всех элементов в частице и твердом растворе:

$$\mu_i^I(C_{1,p}^I, \dots, C_{k,p}^I) = \mu_i^{\Gamma}(C_{1,p}^{\Gamma}, \dots, C_{k,p}^{\Gamma}), \quad i = 0 - k. \quad (4)$$

Из системы уравнений (2) и (4) определяются скорость роста частицы  $p$ -сорта и ее состав, в зависимости от среднего состава твердого раствора  $C_i$ ,  $i = 1 - k$ . После исключения из системы уравнений (2) и (4) величины  $W_p R_p \partial R_p / \partial t$  получаем уравнения, не зависящие от радиуса частицы. Таким образом

$$C_{i,1}^r = \dots = C_{i,f}^r \quad C_i^r; \quad C_{i,1}^I = \dots = C_{i,f}^I \quad C_i^I; \quad W_1 R_1 \frac{\partial R_1}{\partial t} = \\ = \dots = W_f R_f \frac{\partial R_f}{\partial t}.$$

В трехкомпонентных сплавах при расчетах диффузионных процессов вместо общих условий термодинамического равновесия (5) удобнее использовать кривые растворимости и уравнения

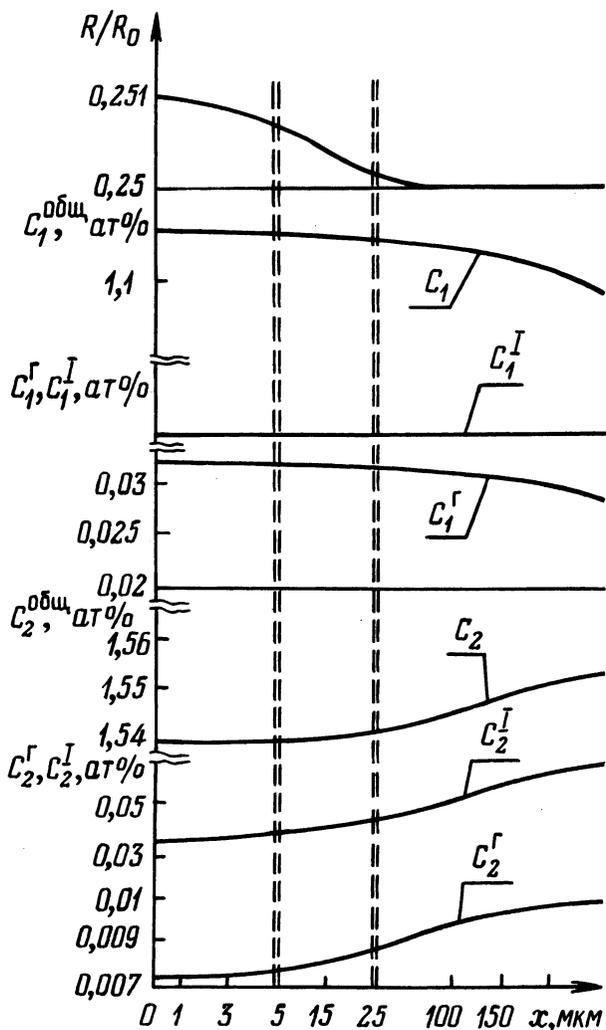


Рис. 1. Изменение концентраций элементов и радиуса частиц цемента в диффузионной зоне.

для конод в двухфазной области, которые экспериментально определены для многих систем:

$f^I(C_1^I, C_2^I) = 0, f(C_1^I, C_2^I) = 0, C_2^I - C_2^I = \gamma(C_1^I, C_1^I),$  (5)  
 где  $f, f^I$  - кривые растворимости для твердого раствора и второй фазы;  $\gamma$  - тангенс угла наклона коноды.

Для сплавов Fe—Cr—C в двухфазной области аустенит - легированный цементит кривые растворимости являются практически прямыми линиями (индекс 1 - углерод, 2 - хром)  $\alpha_1 C_1^I + \alpha_2 C_2^I = 1, \beta_1 C_1^I + \beta_2 C_2^I = 1$ . Угол наклона коноды определяется выражением  $\gamma = \gamma^*/(C_2^* C_2^I)$ , где  $\gamma^*$  - предельное значение тангенса наклона коноды;  $C_2^*$  - предельное значение концентрации хрома в аустените для двухфазной области. К уравнениям (1), (2), (4), описывающим диффузионное насыщение, следует добавить граничные и начальные условия:

$$-\sum_{j=1}^k D_{i,j} \left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=0} = \sum_{j=1}^k V_{i,j} (C_j^I - C_j) \Big|_{x=0},$$

$$-\sum_{j=1}^k D_{i,j} \left. \frac{\partial C_j}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow 0; \quad C_i \Big|_{t=0} = C_i^{\text{нач}}(x),$$

где  $C_i^{\text{нач}}(x)$  - начальное распределение  $i$ -го элемента в твердом растворе;  $V_{i,j}$  - коэффициенты массопередачи на поверхности.

Для уравнения (2) необходимо задать начальное распределение радиусов частиц в сплаве:

$$R_p \Big|_{t=0} = R_p^{\text{нач}}(x), \quad p = 1 - f.$$

Для численного решения задачи используется неявная консервативная конечно-разностная схема, построенная интегро-интерполяционным методом [2]. Нелинейные разностные уравнения решаются методом простой итерации [2]. Линеаризованные уравнения для концентраций решаются с помощью трехточечной прогонки. Общая блок-схема программы аналогична блок-схеме программы для численного решения уравнений диффузии в многокомпонентном твердом растворе, приведенной в [3]. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты численного расчета для сплава Fe—Cr—C.

### Л и т е р а т у р а

1. Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. - М.: Металлургия, 1969. - 256 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977. - 320 с.
3. Ворошнин Л.Г., Хусид Б.М. Диффузионный массоперенос в многокомпонентных системах. - Минск: Наука и техника, 1979. - 254 с.