

контртелом из твердого сплава ВК-2 при скорости скольжения 2,09 м/с.

Образцы, насыщенные из смесей 2 и 3, превосходят по износостойкости образцы, насыщенные в обычной алюмотермической смеси 1 (рис. 1). Слой, полученный в смеси, содержащей серу 3, по своей износостойкости не уступает слою, полученному из смеси с карбидом бора 4, а по мере ужесточения условий испытания превосходит его. Кроме того, выкрашивание слоя в месте контакта образца с контртелом, часто наблюдавшееся при испытании образцов, насыщенных в традиционных смесях, на образцах, насыщенных в разработанных смесях, отсутствовало.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность интенсификации получения боридных покрытий в порошковых средах введением в смесь окислов и серы. Скорость насыщения при этом близка к скорости насыщения при жидкостном борировании.

Разработанные составы при их высокой технологичности позволяют получать качественные диффузионные слои, имеющие износостойкость на уровне и выше износостойкости слоев, получаемых из смеси с карбидом бора.

#### Л и т е р а т у р а

1. Об учете текстуры диффузионных покрытий при выборе температуры борирования / Л.С.Ляхович, Л.Н.Косачевский, А.Я.Кулик и др. - В сб.: Защитные покрытия на металлах. Киев: Наукова думка, 1973, вып. 7. с. 80-83. 2. А. с. 831859 (СССР). Состав для боротитанирования углеродистых сталей / Б.С.Кухарев, Г.В.Стасевич, С.Н.Левитан и др. - Оpubл. в Б. И., 1981. № 19.

УДК 539.219.3

Л.С.Ляхович, докт. техн. наук,  
В.А.Вейник, аспирант (БПИ),  
И.Н.Бурнышев, мл.науч.сотр. (БПИ)

#### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕТЬЕГО РОДА

В реальных процессах химико-термической обработки результаты насыщения будут зависеть как от скорости поверхностных реакций на границе металл - среда (внешние факторы), так и от диффузионных процессов непосредственно в металле (внутренние

факторы). Для определения факторов, лимитирующих процесс насыщения, может быть предложен следующий критерий:

$$K = X/D \cdot 1/\alpha,$$

где  $X$  – условная толщина слоя (выбирается близкой к толщине диффузионной зоны);  $D$  – коэффициент диффузии,  $\alpha$  – коэффициент массообмена. Критерий  $K$  равен отношению сопротивления переносу массы в теле ( $X/D$ ) к сопротивлению на границе раздела металл – среда ( $1/\alpha$ ).

Рассмотрим три возможных частных случая. Первый из них характеризуется большим сопротивлением на поверхности ( $1/\alpha$ ) и малым внутри тела ( $X/D$ ), что соответствует условию  $K \ll 1$ . Интенсифицировать процесс можно за счет уменьшения сопротивления на поверхности, т. е. путем создания более активных сред. Второй – промежуточный – случай характеризуется значениями критерия  $K \approx 1$ . В этих условиях сопротивление тела близко к сопротивлению на поверхности. Наконец, третий случай ( $K \gg 1$ ) характеризуется малым сопротивлением на поверхности ( $1/\alpha$ ). Для интенсификации процесса необходимо увеличивать внутреннюю характеристику тела – коэффициент диффузии.

Методика определения коэффициентов  $\alpha$  и  $D$  для случая массопереноса в однородном твердом растворе приведена в работах [1, 2]. Значительный интерес представляет разработка модели массопереноса при образовании и росте слоя новой фазы при условии, что концентрация на ее поверхности изменяется со временем, т. е. выполняются граничные условия третьего рода. Для решения этой задачи воспользуемся аналогичными примерами из приближенной теории теплопроводности [3].

Весь процесс расчленим на две стадии. Первая стадия описывает ход насыщения для однофазного твердого раствора (рис. 1, а). После достижения предельной растворимости диффундирующего элемента в твердом растворе на поверхности образуется новая фаза и начинается вторая стадия процесса (рис. 1, б). На рис. 1, а изображены кривые распределения концентрации в твердом растворе для двух моментов времени:  $t$  и  $t + dt$ . За время  $dt$  глубина диффузионной зоны выросла на величину  $d\zeta$ . Заштрихованная площадь представляет собой массу  $m$ , аккумулярованную плоским слоем за время  $t$ . Для простоты расчетов распределение концентрации приближенно описываем следующей параболой  $n$ -го порядка:

$$C = (C_{\Pi} - C_0) \left( \frac{\zeta - x}{\zeta} \right)^n + C_0, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация на расстоянии  $x$  от поверхности тела;  $C_0$  – начальная концентрация;  $\zeta$  – глубина зоны твердого рас-

тора;  $n_2$  - показатель параболы, он определяется из экспериментальной кривой распределения концентрации.

Рассмотрим уравнение баланса массы, проходящей через поверхность тела. Масса, вошедшая в тело по закону массоотда-

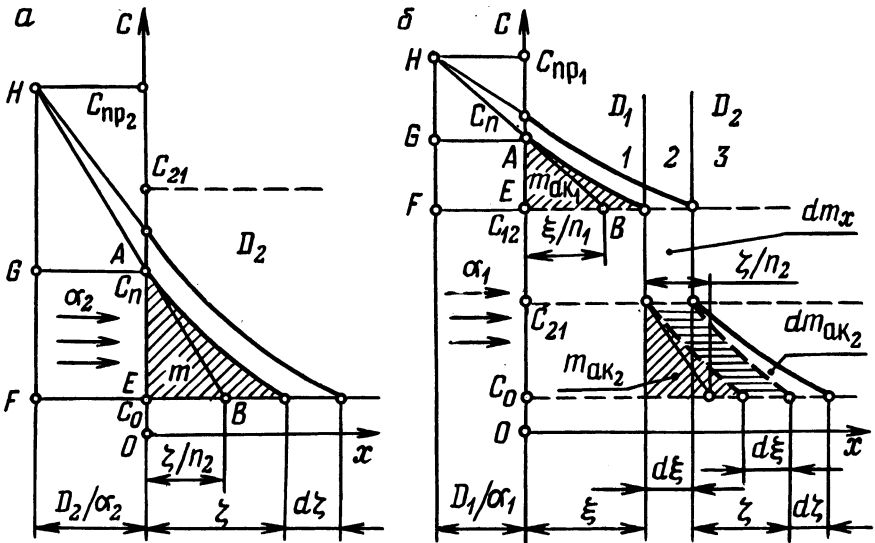


Рис. 1. Схема к выводу расчетных формул: а - первая стадия; б - вторая стадия.

чи, равна массе, проходящей внутрь тела по закону диффузии Фика. Имеем

$$\alpha_2 (C_{\text{пр}2} - C_{\text{п}}) F dt = D_2 \frac{C_{\text{п}} - C_0}{\xi} n_2 F dt, \quad (2)$$

где  $D_2$  - коэффициент диффузии в основном металле;  $C_{\text{пр}}$  - равновесная концентрация;  $C_{\text{п}}$  - концентрация на поверхности.

Из уравнения (2) получаем

$$\xi = \frac{D_2}{\alpha_2} n_2 \frac{C_{\text{п}} - C_0}{C_{\text{пр}2} - C_{\text{п}}}. \quad (3)$$

Масса продиффундировавшего вещества находится путем интегрирования уравнения (1):

$$m = \frac{1}{n_2 + 1} F \xi (C_{\text{п}} - C_0). \quad (4)$$

Из подобия треугольников ABE и HBF следует, что

$$\frac{C_{\text{п}} - C_0}{C_{\text{пр}2} - C_0} = \frac{1}{1 + \frac{n_2}{\xi} \frac{D_2}{\alpha_2}}. \quad (5)$$

Подставляем  $(C_{\Pi} - C_0)$  из (5) в (4), тогда будем иметь

$$m = \frac{1}{n_2 + 1} F \zeta \frac{C_{\text{пр}2} - C_0}{1 + \frac{n_2}{\zeta} \frac{D_2}{\alpha_2}}. \quad (6)$$

Связь между  $t$  и  $\zeta$  находим из уравнений (2) и (6), предварительно проинтегрировав (6). Найденное уравнение интегрируем и в результате получаем

$$D_2 t = \frac{\zeta^2}{2n_2(n_2 + 1)} + \frac{\zeta}{n_2 + 1} \frac{D_2}{\alpha_2} - \frac{n_2}{n_2 + 1} \left(\frac{D_2}{\alpha_2}\right)^2 \ln\left(1 + \frac{\zeta}{n_2 \left(\frac{D_2}{\alpha_2}\right)}\right). \quad (7)$$

Первая стадия заканчивается в момент  $t_1$ , когда концентрация на поверхности достигает значения  $C_{\Pi} = C_{21}$  (рис. 1, а), а  $\zeta = \zeta_1$  и  $m = m_1$ . Выведенные уравнения позволяют упростить расчет параметров насыщения по сравнению с методикой работы [1].

Вторая стадия процесса характеризуется образованием пересыщенного твердого раствора новой фазы и ее ростом. Образующаяся фаза имеет область гомогенности. Как видно из рис. 1, б, за время  $dt$  новая фаза выросла на величину  $d\xi$ , а зона твердого раствора - на величину  $d\zeta$ . Рассмотрим уравнение баланса массы. Масса  $dm$  входит в поверхность по закону массоотдачи. Она частично аккумулируется в зоне 1 ( $dm_{\text{ак}1}$ ), частично вступает в реакцию в зоне 3 на границе раздела фаз ( $dm_X$ ) и частично аккумулируется в зоне 2 ( $dm_{\text{ак}2}$ ), т. е.

$$dm = dm_{\text{ак}1} + dm_X + dm_{\text{ак}2}, \quad (8)$$

где

$$dm = \alpha_1 (C_{\text{пр}1} - C_{\Pi}) F dt; \quad m_{\text{ак}1} = \frac{1}{n_1 + 1} F \xi (C_{\Pi} - C_{12}^*);$$

$$dm_X = (C_{12} - C_0) F d\xi; \quad dm_{\text{ак}2} = \frac{1}{n_1 + 1} F (C_{21} - C_0) d\zeta.$$

Отсюда после несложных преобразований получаем следующее окончательное решение:

$$D_1 (t - t_1) = a \xi^2 + b \xi - c \ln\left(1 + \frac{\xi}{n_1 \frac{D_1}{\alpha_1}}\right) + d(\zeta - \zeta_1), \quad (9)$$

где

$$a = \frac{1}{2n_1} \left( \frac{1}{n_1 + 1} + \frac{C_{12} - C_0}{C_{\text{пр}1} - C_{12}} \right); \quad b = a 2n_1 \frac{D_1}{\alpha_1};$$

$$c = \frac{n_1}{n_1 + 1} \left( \frac{D_1}{\alpha_1} \right)^2; d = \frac{1}{n_2 + 1} \frac{C_{21} - C_0}{C_{np1} - C_{12}} \left( \frac{D_1}{\alpha_1} + \frac{\xi_{ср}}{n_1} \right).$$

По данной методике были рассчитаны значения коэффициентов  $D_1$  и  $\alpha_1$  и критерия  $K$  в условиях насыщения технического титана ВТ1-0 при температуре  $1000^\circ\text{C}$  и времени насыщения 4 ч в смеси состава: 60% Si + 30% Cu + 7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 3%  $\text{AlF}_3$ .

Коэффициент диффузии кремния в фазе  $\text{TiSi}_2$   $D_1 = 2,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ . Коэффициент массообмена среды с поверхностью фазы  $\text{TiSi}_2$   $\alpha_1 = 1,99 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$ . Принимая  $X = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , получаем  $K = 4$ , что соответствует третьему частному случаю, следовательно, лимитирующими являются процессы диффузии в теле.

### Л и т е р а т у р а

1. Попов А.А. Теоретические основы химико-термической обработки стали. - М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1962. - 120 с.
2. Термическая обработка в машиностроении. Справочник / Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рахштадта. - М.: Машиностроение, 1980. - 788 с.
3. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 184 с.

УДК 546.77.281

Л.С.Ляхович, докт.техн.наук,  
Э.Д.Шербаков, канд.техн.наук,  
В.Г.Борисов, ассистент (БПИ)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРСТОЙКИХ Cr—Al—Si ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЯХ 20X13 И 08X18N10T\*

Получение диффузионных слоев максимальной жаростойкости для данных конкретных условий испытаний является экстремальной задачей, которую можно решать с помощью методов математического планирования экспериментов.

На рис. 1 приведены результаты испытаний на жаростойкость диффузионных слоев системы Cr—Al—Si на сталях 20X13 и 08X18N10T, представленные в виде диаграмм "Состав насыщающей смеси - уровень жаростойкости". Для однокомпонентного насыщения использовали порошковые смеси на основе ферро-

\* В работе принимали участие С.С.Алисейко и С.В.Вишневская.