

лезе и, как следствие, заторможенностью процесса его рассасывания при повышенных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломыцев П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с. 2. Влияние редкоземельных металлов и магния на жаростойкость сплава Х20Н80/С.Н. Гражданкин, З.М. Калинина, З.Ф. Гусева и др. – В сб.: Редкоземельные металлы и сплавы. М.: Наука, 1971. – 113 с.

УДК 536.219.3

Б.Б. ХИНА, Г.М. ЛЕВЧЕНКО, канд.техн.наук,
А.В. НИКОНЧИК (БПИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ В МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ*

Для анализа основных закономерностей процессов химико-термической обработки и создания АСУТП необходимы математические модели, описывающие формирование фаз при диффузионном насыщении металлов и сплавов. Целью настоящей работы является исследование закономерностей роста сплошного слоя интерметаллидной фазы, образующегося при взаимной диффузии в бинарной системе. Сложность анализа процессов формирования многофазных диффузионных слоев обусловлена, во-первых, экспериментально наблюдаемым отклонением концентраций элементов на границе раздела фаз от равновесных значений; во-вторых, несоответствием фазового состава диффузионного слоя изотермическому сечению диаграммы фазового равновесия данной металлической системы [1] и, в-третьих, наличием в ряде случаев параболического закона утолщения фазы. Подобные факты говорят о необходимости учета не только диффузионного переноса атомов, но и кинетики процессов на межфазных границах. При постановке диффузионной задачи Стефана, описывающей изменение концентраций атомов в каждой из фаз и движение границ раздела фаз, предполагается, что лимитирующей стадией роста является диффузионный массоперенос. Этот случай соответствует плоским границам фаз, равновесным значениям концентраций на границах и параболическому закону роста фаз. В работах [1,2] баланс диффузионных потоков на плоской межфазной границе выражается через отклонения граничных концентраций от равновесных значений. Для общего случая, когда фазовый состав диффузионного слоя может отклоняться от равновесной диаграммы состояния, рассматривается образование новой фазы – интерметаллида 2 на границе раздела исходных фаз 1 и 3, имеющей произвольную форму [3]. На границах фаз имеют место следующие процессы: переход атомов из одной фазы в другую со скоростью s_{ij} , $i \neq j$; кооперированный переход атомов, т.е. перестройка кристаллической решетки одной фазы в другую [4], происходящий со скоростью p_{ij} ;

* Работа выполнена под руководством д-ра техн.наук Л.Г. Ворошнина и канд.физ.-мат. наук Б.М. Хусида.

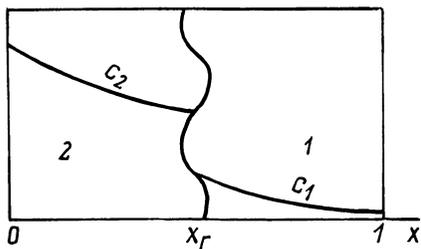


Рис. 1. Схема диффузионной пары.

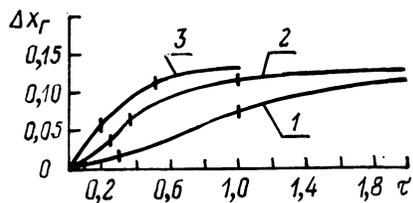


Рис. 2. Зависимость смещения границы фаз Δx_f от безразмерного времени τ :
 1 - D_{ij} ; p_{ij} ; $s_{ij} = 1$; 1: 1; 2 - D_{ij} ; p_{ij} ; $s_{ij} = 1:3:6$; 3 - D_{ij} ; p_{ij} ; $s_{ij} = 1$; 5: 30.

образование новых зародышей фазы 2 на участках, где находятся в контакте фазы 1 и 3. Диффузионный массоперенос в данной бинарной системе А-В рассматривается с учетом ориентационного соответствия на границах фаз, которое часто наблюдается при образовании интерметаллидных соединений в диффузионном слое. Наличие упругих деформаций вблизи границ фаз приводит к появлению матрицы коэффициентов взаимной диффузии D , недиагональные члены которой связывают поток атомов в i -й фазе с градиентом концентрации в j -й фазе, $i \neq j$ и обращаются в нуль в объеме каждой фазы. Для частного случая, когда в контакте находятся фазы 1 и 2 (рис. 1), задача, поставленная в [3], примет вид:

$$\frac{\partial y_2}{\partial t} + (p_{12} - p_{21}) \frac{\partial y_2}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial (y_1 c_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[y_1 \left(D_{11} \frac{\partial c_1}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial c_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial y_1}{\partial x} \left[c_2 (p_{21} + s_{21}) - c_1 (p_{12} + s_{12}) \right];$$

$$\frac{\partial (y_2 c_2)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[y_2 \left(D_{21} \frac{\partial c_1}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial c_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial y_2}{\partial x} \left[c_2 (p_{21} + s_{21}) - c_1 (p_{12} + s_{12}) \right],$$

где $y_1, y_2 = 1 - y_1$ - доли фаз в поперечном сечении; c_1, c_2 - концентрации атомов А. В предельном случае, когда значение $s_{ij} \gg p_{ij}$, т.е. в отношении перехода атомов быстро устанавливается равновесие, получается модель, описанная в работе [2], при $p_{ij} \gg s_{ij}$ - модель [1], а если $s_{ij} \gg p_{ij} \gg D_{ij}$ - задача Стефана.

Численное решение данной системы уравнений проводили на ЭВМ ЕС-1022 с использованием метода конечно-разностной аппроксимации. Рассматривалась задача с граничными условиями второго рода - диффузионный отжиг биметаллической пластинки, при котором фаза 2 превращается в фазу 1 (рис. 1). В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета для неполного распада фазы 2. На кривой 1 (рис. 2), соответствующей случаю близких скорос-

тей диффузии, фазового превращения и перехода атомов через границу фаз, выделяются четыре участка: инкубационный и начальный периоды — здесь лимитирующей стадией является переход атомов через границу фаз; линейный период, когда лимитирующей стадией является фазовое превращение; и участок экспоненциального приближения границы фаз к равновесному положению. На кривой 2 (рис. 2) видны также четыре участка: начальный период; короткий линейный участок; параболический участок, когда лимитирующей стадией движения границы является диффузионный подвод атомов; и экспоненциальное приближение к равновесию. Для кривой 3 (рис. 2), когда скорость процессов на межфазных границах значительно превосходит скорость диффузии, участок линейной зависимости смещения границы от времени быстро сменяется параболическим.

Результаты расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. — М.: Наука, 1979. — 344 с. 2. Жуховицкий А.А., Нечаев Ю.С., Шехтер Л.Н. Диффузия в многофазных системах. — Изв. АН ССР. Металлы, 1976, № 2, с. 109–112. 3. Ворошнин Л.Г., Хусид Б.М., Хина Б.Б. Кинетика образования поверхностных слоев интерметаллидов при диффузионном насыщении. — В кн.: Восьмое Всесоюз. совещание по кинетике и механизму химических реакций в твердом теле. Черногловка: ИХФ АН СССР, 1982, с. 197–199. 4. Кристьян Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. — М.: Мир, 1978. — 808 с.

УДК 621.785.5:519.28

Г.Ф. ПРОТАСЕВИЧ, канд.техн.наук,
В.Я. ЧЕЛЬЦОВ, В.А. БАРАБАСЬ,
Е.Х. БАРАБАСЬ (БПИ)

ЖИДКОСТНОЕ БОРИРОВАНИЕ ЧУГУНОВ

В настоящей работе жидкостному борированию в расплаве "бура + карбид бора" и в расплаве буры с наложением тока электролиза подвергали 3 вида чугунов: серый, ковкий, высокопрочный — перлитно-ферритного класса. На I этапе было решено построить модели описания процесса формирования борированного слоя на всех указанных видах чугунов с помощью методов полного и дробного факторного экспериментов.

При реализации данной части эксперимента технологические факторы меняли в следующих интервалах:

- электролизное борирование: температура борирования (X_1) — 850–950 °С, время процесса (X_2) — 150–250 мин, плотность тока электролиза (X_3) — 0,2–0,4 А/см²;
- безэлектролизное: температура (X_1) — 900–1000 °С, время (X_2) — 150–300 мин, количество В₄С в расплаве (X_3) — 25–40 %, размер частиц В₄С (X_4) — 6–10 номера согласно ГОСТ.

Таким образом, для электролизного борирования применяли полный факторный эксперимент, для безэлектролизного реализовывали полуреплику: I, ab, ac, ad, bc, bd, cd, abcd.