

УДК 539.219.3

## Оценка коэффициентов взаимной диффузии переходных металлов при электроискровом легировании тантала

© 2004 С.А.Пячин, В.Г.Заводинский, А.А.Гниденко, Ю.А.Чебирык

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Хабаровск  
E-mail: pyachin@mail.ru; vzavod@mail.ru; gingecookie@mail.ru; chebiryak@mail.ru  
Поступила в редакцию 16 сентября 2003 г.*

Исследовано распределение переходных металлов по глубине в покрытиях, полученных на тантале методом электроискрового легирования. Установлено, что коэффициенты взаимной диффузии переходных металлов и тантала в условиях воздействия электрических разрядов составляют величину порядка  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с, что позволяет полагать, что проникновение легирующих элементов в подложку происходит, преимущественно, в жидкой фазе.

A depth distribution of transition metals in coatings on tantalum substrate produced by a method of electrospark alloying has been studied. It was found that interdiffusion coefficients for the transition metal-tantalum systems are equal  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s in the conditions of cyclic electrical discharges action. This allows one to propose a liquid-phase mechanism of alloying element diffusion into the substrate.

### Введение

Сплавы тантала с переходными металлами обладают высокими механическими свойствами, жаропрочностью, коррозионной устойчивостью и представляют особый интерес для авиационной, космической, химической промышленности и ядерной энергетики [1]. В некоторых случаях нет необходимости легировать весь объем тантала, а достаточно создать покрытие на его поверхности. Одним из методов получения покрытия, обладающего хорошей адгезией с металлами, является электроискровое легирование (ЭИЛ) [2]. Основным механизмом формирования покрытий при ЭИЛ является перенос материала анода, служащего источником легирующих элементов, на поверхность катода, представляющего подложку. В большинстве случаев распределение элементов в поверхностных слоях электродов после электроискрового леги-

рования носит ступенчатый характер с четким разделением области покрытия и переходной зоны [3-5]. Глубина проникновения металлов зависит от параметров взаимной диффузии вещества электродов и может достигать несколько десятков микрон.

Известно, что коэффициент диффузии  $D$  в металлах при импульсном воздействии концентрированных потоков энергии в несколько раз больше, чем при непрерывном изотермическом воздействии. Так, при импульсном нагружении коэффициент диффузии металлов может достигать таких высоких значений, как  $10^{-4}$ - $10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с [6],  $10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с [7], при лазерном облучении —  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с [8]. При плазменно-детонационной обработке коэффициент диффузии легких элементов (азот, кислород, углерод) в металлах имеет порядок  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с [9]. Увеличение подвижности атомов объясняется введением неравновесных вакансий, влиянием сдвиговой деформации и появлением расплавленных участков в поверх-

ностных слоях обрабатываемых материалов. Поэтому значительный интерес представляет определение диффузионных параметров металлов при электроискровом импульсном воздействии и их сравнение с коэффициентами диффузии при других видах обработки концентрированными потоками энергии, а также определение механизма массопереноса материала анода в поверхностных слоях катода при ЭИЛ.

### Материалы и методика исследования

Схема процесса электроискрового легирования представлена на рис. 1. Анод 1 совершает колебания в направлении, перпендикулярном поверхности катода 2, и одновременно перемещается вдоль нее. В точке касания электродов возникает искровой разряд 3, в результате воздействия которого на поверхности катода появляется оплавленная область 4, которая в большинстве случаев имеет форму лунки. При многократном воздействии электрических разрядов на катоде формируется измененный поверхностный слой 4.

В качестве материала анода в экспериментах использовали переходные металлы Ti, V, Nb, Cr, Mo и W. Анод имел форму цилиндрического стержня диаметром 2-4 мм. Катодом во всех случаях являлись пластины из Ta размером 10×10×2 мм. Исходя из условия получения максимальной толщины покрытия, а также отсутствия интенсивного окисления и схватывания электродов, были выбраны два режима

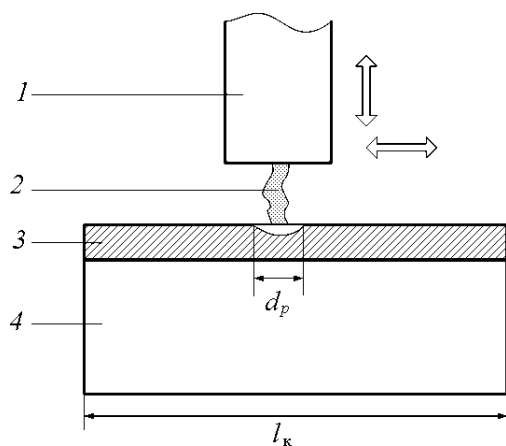


Рис. 1. Схема расположения электродов при электроискровом легировании: 1 — анод; 2 — электрический разряд; 3 — покрытие; 4 — катод;  $l_k$  — ширина катода;  $d_p$  — диаметр области воздействия разряда. Двухсторонние стрелки показывают направления движения анода.

проведения ЭИЛ: I — средняя энергия импульса  $\varepsilon \approx 0,06$  Дж, частота импульсов  $f = 100$  Гц, длительность импульса  $\tau_{\text{и}} \approx 200$  мкс; II — средняя энергия импульса  $\varepsilon \approx 0,08$  Дж, частота импульсов  $f = 300$  Гц, длительность импульса  $\tau_{\text{и}} \approx 50$  мкс. Профилограммы распределения легирующего металла и тантала по глубине покрытия были получены методом микрорентгеноспектрального анализа на установке МАР-3. Диаметр электронного зонда не превышал 5 мкм. За счет подготовки образцов методом косового шлифа разрешение электронно-зондового анализа удалось увеличить в 3-4 раза. Концентрацию металлов рассчитывали методом Белка с поправкой на атомный номер элемента и поглощение излучения [10]. Для каждого образца снимали около 10 профилей распределения элементов на различных участках косого шлифа в направлении, перпендикулярном поверхности катода. Полученные профили накладывали друг на друга путем совмещения диффузионных областей и находили средние значения концентрации на соответствующей глубине исследуемой зоны. Отклонение от среднего значения концентрации металлов составило менее 15%. Полученный среднестатистический профиль аппроксимировали полиномом, который затем использовали для оценки коэффициентов взаимной диффузии элементов методом Больцмана-Матано [11].

Основная трудность при определении коэффициентов взаимной диффузии при ЭИЛ была связана с нахождением времени протекания диффузии в исследуемой области, так как результирующая кривая концентрационного распределения металлов в покрытиях является результатом многократного воздействия электрических разрядов, сопровождающегося циклическим изменением температуры. Каждый цикл обработки протекает в две стадии: высокотемпературная — в период действия разряда, и низкотемпературная — во время паузы между разрядами. Эффективный (усредненный) коэффициент диффузии  $D_{\text{эф}}$  при неизменных условиях каждого цикла ЭИЛ можно определить как [12]

$$D_{\text{эф}} t = N (D_1 t_1 + D_2 t_2), \quad (1)$$

где  $N$  — общее количество циклов;  $D_1$  и  $D_2$  — коэффициенты диффузии во время высоко- и низкотемпературной стадий цикла ЭИЛ;  $t_1$ ,  $t_2$  — продолжительность высоко- и низкотемпературной стадий соответственно;  $t$  — общее время легирования. Количество циклов соответствует числу разрядов, попавших на поверхность катода в исследуемую область с размерами, совпадающими с диаметром электронного зонда  $d_0$ . Если площадь поверхности катода со стороны  $l_k$  обозначить как

$S_k = l_k^2$ , то для площади  $S_0$  участка, на котором определялась концентрация металлов ( $S_0 = 1/4\pi d_0^2$ ), и площади области воздействия одного разряда  $S_p = 1,4\pi d_p^2$  ( $d_p$  — диаметр этой области) общее число циклов  $N$  можно определить из условия

$$N = \begin{cases} \frac{N_\Sigma S_p}{S_k}, & \text{если } S_0 \leq S_p \\ \frac{N_\Sigma S_0}{S_k}, & \text{если } S_0 > S_p \end{cases}, \quad (2)$$

где  $N_\Sigma = ft$  — общее количество разрядов, прошедших за время легирования.

В нашем случае  $l_k = 10$  мм,  $d_0 \approx 2$  мкм. Для определения  $d_p$  была проведена серия дополнительных экспериментов, в которых размер области воздействия разряда измеряли с помощью микроскопа МБС-10 как диаметр эрозионного следа, возникающего от искрового разряда при однократном касании электродом поверхности тантала. Было установлено, что для режима I ЭИЛ  $d_p = 210 \pm 20$  мкм, а для режима II —  $360 \pm 50$  мкм. Таким образом,  $d_0 \ll d_p$ , поэтому число циклов  $N$  вычисляли как

$$N = \frac{S_p}{S_k} ft. \quad (3)$$

Полученные значения  $N$  приведены в табл. 1. Как видно, количество циклов  $N$  для разных пар электродов составляет 3-18 в режиме I и 13-235 — в режиме II. При общем времени электроискровой обработки 10 мин, суммарное время активного протекания диффузии в исследуемой области при ЭИЛ не превышало 11 мс. Длительность одного цикла в среднем для режима I составляла 26 с, а для режима II — 3 с. Таким образом, промежуток времени между разрядами, попавшими в исследуемую область, во много раз превышает длительность разряда:

$$\begin{aligned} t_2/t_1 &\approx (1-2) \cdot 10^5 \text{ для режима I,} \\ t_2/t_1 &\approx (4-7) \cdot 10^4 \text{ для режима II.} \end{aligned} \quad (4)$$

Таблица 1

Количество циклов протекания диффузии в области сечением 20 мкм<sup>2</sup> при электроискровом легировании тантала

Материал анода	$N$ ( $\epsilon \approx 0,06$ Дж; $f = 100$ Гц; $\tau_n \approx 200$ мкс)	
	$N$ ( $\epsilon \approx 0,08$ Дж; $f = 300$ Гц; $\tau_n \approx 50$ мкс)	
Ti	7±2	53±16
V	5±2	19±6
Nb	6±2	36±11
Cr	10±3	70±21
Mo	14±4	182±53
W	14±4	177±52

При воздействии низковольтных электрических разрядов температура в поверхностных слоях электродов близка к температуре плавления, о чем свидетельствует образование оплавленного поверхностного слоя на катоде после ЭИЛ. Можно предположить, что температура катода в области воздействия разряда на первой стадии цикла повышается до температуры плавления металлов (~1500-3000°C), а на второй стадии, во время паузы между разрядами, снижается до исходного значения, то есть практически до комнатной температуры. Известно, что при температуре плавления коэффициенты диффузии  $D$  для большинства металлов примерно одинаковы и составляют  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [13], а при низких (20-50°C) температурах их значения гораздо меньше —  $\sim 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с. Поэтому с учетом (4) можно считать, что  $D_1 t_1 \gg D_2 t_2$ , а коэффициент диффузии  $D \approx D_{эф} \approx D_1$ . Для определения коэффициентов взаимной диффузии методом Больцмана-Матано время диффузии считали равным  $t = N\tau_n$ , где число циклов  $N$  определяли из (3).

### Экспериментальные результаты

Исследования показали, что в поверхностных слоях покрытий существуют две области, в которых распределение компонентов различно: область равномерного распределения (смешивания) металлов и диффузионная (переходная) зона, что характерно для большинства электроискровых покрытий [3-5]. На рис.2 в качестве примера пред-

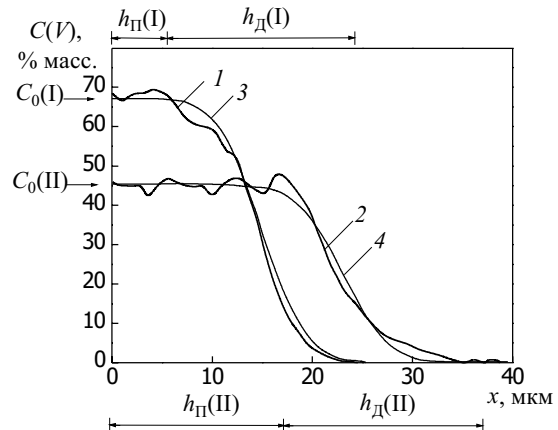


Рис.2. Концентрационные профили распределения ванадия по глубине покрытия, полученного методом ЭИЛ на тантале: 1 — экспериментальный режим I; 2 — экспериментальный режим II; 3 — расчетный режим I; 4 — расчетный режим II.  $C_0(I)$ ,  $C_0(II)$  — концентрация ванадия в области перемешивания;  $h_p(I)$ ,  $h_p(II)$  — толщина области перемешивания;  $h_d(I)$ ,  $h_d(II)$  — толщина диффузионной зоны в режиме I и II соответственно. Концентрационные профили тантала не показаны.

ставлены типичные концентрационные профили распределения ванадия после электроискровой обработки при режимах I и II. Появление в верхних слоях покрытия области с однородным распределением легирующей примеси, в которой концентрация легирующего элемента и материала подложки по глубине практически не меняется, свидетельствует об интенсивном перемешивании материалов анода и катода при их плавлении под действием электрических разрядов. Переходная область покрытия образуется за счет взаимной диффузии материалов примеси и подложки. Средние значения концентрации легирующего элемента в области равномерного распределения, толщина зоны перемешивания и толщина диффузионной зоны приведены в табл.2.

Таблица 2

Средние значения концентрации легирующего металла  $C_0$  в покрытии, толщины покрытия  $h_{п}$  и толщины диффузионной зоны  $h_{д}$

Материал анода	Режим I*			Режим II**		
	$C_0$ , масс.%	$h_{п}$ , мкм	$h_{д}$ , мкм	$C_0$ , масс.%	$h_{п}$ , мкм	$h_{д}$ , мкм
Ti	34	9	9	40	16	17
V	67	6	15	45	17	15
Nb	49	4	7	34	12	17
Cr	74	7	21	75	11	8
Mo	73	0	47	85	27	20
W	69	4	20	54	10	8

\* $\epsilon \approx 0,06$  Дж;  $f=100$  Гц;  $\tau_{и} \approx 200$  мкс;

\*\* $\epsilon \approx 0,08$  Дж;  $f=300$  Гц;  $\tau_{и} \approx 50$  мкс.

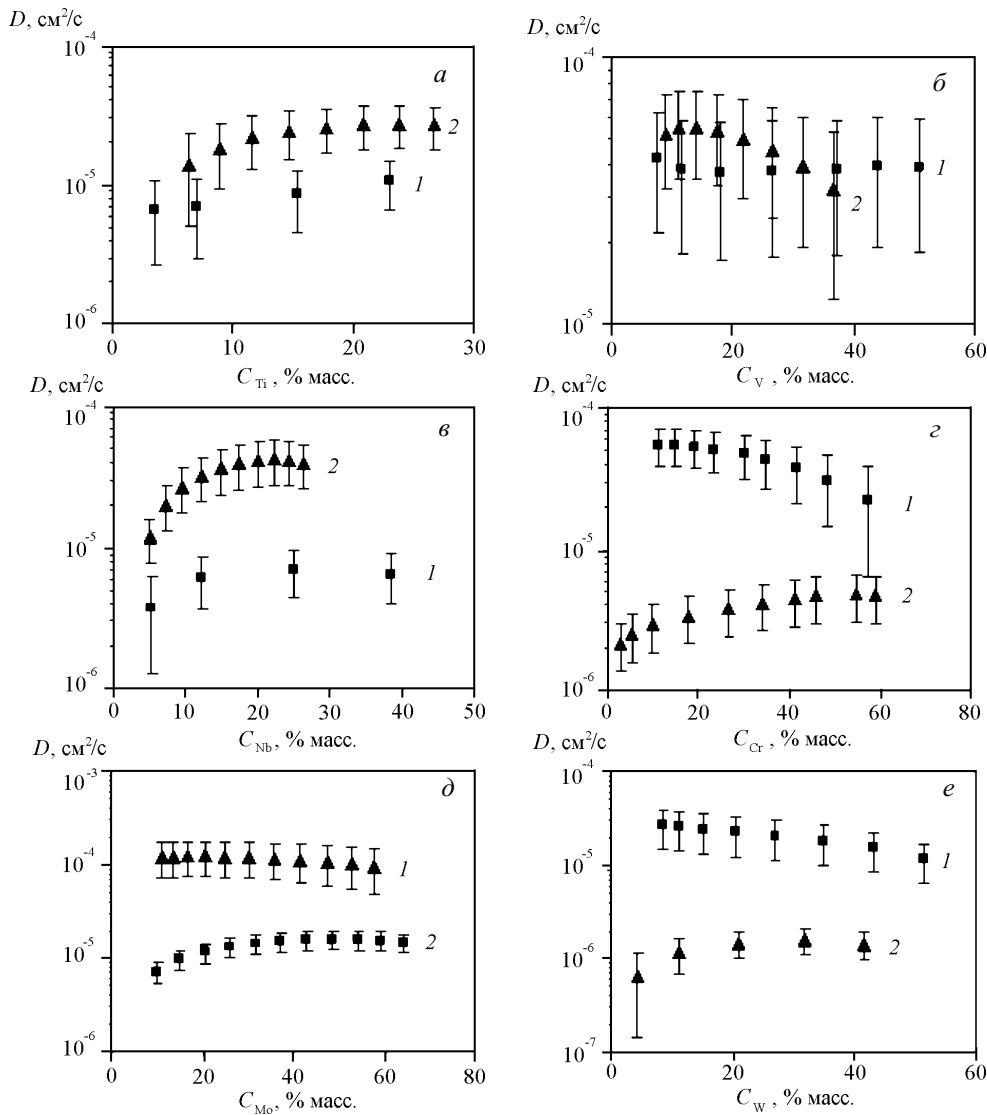


Рис.3. Зависимости коэффициента взаимной диффузии при ЭИЛ для системы переходной металл – тантал от концентрации легирующего металла: а — Ti; б — V; в — Nb; г — Cr; д — Mo; е — W. 1 — режим I; 2 — режим II.

Концентрация металла анода в верхних слоях покрытий, полученных на тантале при различных режимах ЭИЛ и одинаковом аноде, различается не более чем на 15 масс.%, за исключением ванадия, для которого это различие составляет около 20 масс.%. Толщина зоны смешивания для всех пар электродов после ЭИЛ в режиме I меньше, чем в режиме II. Размеры диффузионных зон также различаются, но, в основном, лежат в диапазоне 8-20 мкм. Покрытия из Mo и W (режим I) имеют только диффузионную область, что свидетельствует о более высокой скорости растворения данных металлов в тантале. Из сравнения площадей под концентрационными профилями можно заметить, что общее количество перенесенного с анода на катод материала для каждой пары электродов в режиме II выше, чем в режиме I, что свидетельствует о более высокой эффективности высокочастотного режима электроискрового воздействия при одинаковой энергии импульса.

Оценка коэффициентов взаимной диффузии показывает (рис.3), что для исследованных систем они различаются незначительно и составляют  $\sim 10^{-6}$ - $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с, что близко к коэффициенту диффузии в жидких металлах [13]. При электроискровом легировании титаном и ниобием в режиме II коэффициенты взаимной диффузии выше, чем в режиме I (рис.3а, в), а при ЭИЛ металлами VI группы (Cr, Mo, W) — наоборот (рис.3г-е), что можно объяснить различием температур материала, в котором протекает диффузия. При ЭИЛ тантала ванадием значения коэффициентов взаимной диффузии в обоих режимах примерно одинаковы (рис.3б).

С изменением концентрации легирующего металла величина  $D$ , как правило, меняется незначительно, не более чем в два раза. Средние значения коэффициентов диффузии для различных пар металлов, определенные методом Больцмана-Матана на основе анализа переходной области концентрационных профилей в электроискровых покрытиях, приведены в табл.3. Известно, что для рассматриваемых пар металлов коэффициенты взаимной диффузии, протекающей при изотермическом отжиге в твердой фазе, имеют значения порядка  $10^{-13}$ - $10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с [11], то есть рассчитанные для условий электроискрового легирования значения  $D$  более чем на 4 порядка превышают значения, характерные для изотермического нагрева. Сравнение полученных результатов с литературными данными по диффузии металлов при воздействии различных видов концентрированных потоков энергии [6-9] показывает их близость. Таким образом, можно утверждать, что экспериментально установленный

Таблица 3

Средние значения коэффициентов диффузии металлов “ $D$ ”, определенные по экспериментальным данным, и  $D$  (расч.), подобранные в расчетах диффузионной модели

Материал анода	Режим I*		Режим II**	
	$\bar{D}$ , см <sup>2</sup> /с	$D$ (расч.), см <sup>2</sup> /с	$\bar{D}$ , см <sup>2</sup> /с	$D$ (расч.), см <sup>2</sup> /с
Ti	$(9,1 \pm 3,5) \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$(2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
V	$(3,9 \pm 1,7) \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$(4,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$
Nb	$(5,9 \pm 2,5) \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$(3,3 \pm 1,2) \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Cr	$(4,4 \pm 1,6) \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$(3,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$
Mo	$(1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$(1,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
W	$(2,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$

\* $\varepsilon \approx 0,06$  Дж;  $f = 100$  Гц;  $\tau_{\text{и}} \approx 200$  мкс;

\*\* $\varepsilon \approx 0,08$  Дж;  $f = 300$  Гц;  $\tau_{\text{и}} \approx 50$  мкс.

эффект увеличения коэффициентов диффузии при ЭИЛ согласуется с представлениями об увеличении подвижности атомов при импульсном энергетическом воздействии на металлы.

Можно предположить, что обнаруженный эффект ускорения диффузии при ЭИЛ обусловлен наличием жидкой фазы, образующейся на поверхности катода во время разряда. Возможно также, что определенное влияние оказывают и конвективные потоки, возникающие в ванне расплавленного металла, как это происходит, например, при лазерном воздействии [14]. Именно действием этих потоков можно объяснить существование области перемешивания в верхних слоях покрытия с равномерным распределением элементов по глубине.

### Численное моделирование взаимной диффузии при ЭИЛ

Метод Больцмана-Матана предназначен для определения коэффициентов диффузии по экспериментальным концентрационным профилям распределения легирующих элементов при значительном изменении их концентрации в условиях непрерывно протекающего процесса диффузии [11]. Однако электроискровое воздействие носит импульсный характер, поэтому представляет интерес сравнить экспериментально определенные этим методом значения  $D$  с результатами численного решения уравнения диффузии металлов с учетом цикличности процесса ЭИЛ. Сопоставление кривых распределения металлов в электроискровых покрытиях (рис.2) с профилями, полученными на основе различных математических моделей диффузии [15], указывает на аналогию ЭИЛ с диффузией в бесконечное тело из источника с ограниченным количеством вещества. При расчетах значение коэффициента диффузии подбиралось из условия получения наилучшего

совпадения экспериментальных и теоретических кривых распределения.

С учетом основных положений теории формирования электроискровых покрытий [2], диффузионная задача формулировалась на основе предположения, что при соприкосновении вибрирующих электродов между ними начинает протекать электрический ток, основная мощность которого выделяется в области контакта. Это приводит к плавлению электродов с образованием жидкого мостика, состоящего из расплавленного материала катода и анода. По мере удаления электродов друг от друга за счет тепловыделения этот мостик продолжает разогреваться вплоть до момента его взрывообразного разрушения и возникновения искрового разряда. Во время взрыва образуются продукты эрозии материала электродов, преимущественно анода, в виде капель жидкого металла и паров металлов, которые тонким слоем осаждаются на поверхность анода и катода. Во время протекания электрического разряда температура области воздействия разряда достаточна для сохранения жидкой фазы, поэтому осаждаемый материал диффундирует с поверхности в объем подложки. Так как электроискровое воздействие повторяется многократно, то диффузионное проникновение легирующего элемента происходит в каждом новом цикле и за время каждого  $j$ -го цикла концентрации легирующего металла  $C_j$  меняется. Вполне разумно полагать, что в промежутках времени между разрядами перераспределения элементов в покрытии не происходит, так как температура, а, следовательно, и скорость диффузии в этот период намного меньше. Также можно допустить, что коэффициент взаимной диффузии не зависит от концентрации элементов и постоянен в течение всего процесса диффузии.

Для описания предложенного механизма было использовано одномерное уравнение диффузии материала из тонкого слоя толщиной  $h$  в полубесконечное твердое тело

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2}, \quad (j = 1, \dots, N). \quad (5)$$

Начальные условия для первого цикла

$$C_1(x, 0) = \begin{cases} C_0, & \text{если } 0 \leq x \leq h \\ 0, & \text{если } x > h \end{cases},$$

где  $C_0$  — начальная концентрация легирующего металла в слое, сформированном из осажденного материала. Для последующих циклов начальные условия определяются распределением концентрации металлов в конце предыдущего цикла со сдвигом на толщину вновь осажденного слоя

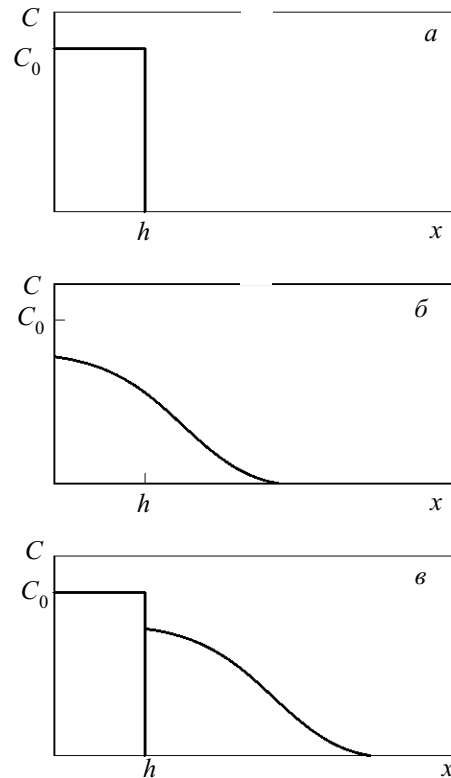


Рис.4. Схема изменения концентрационного распределения легирующего металла по глубине при циклическом нанесении покрытий во время ЭИЛ:  $a$  — начало 1 цикла;  $b$  — конец 1 цикла;  $v$  — начало 2 цикла.  $h$  — толщина пленки из распыленного материала;  $C_0$  — начальная концентрация легирующего металла.

$$C_j(x, 0) = \begin{cases} C_0, & \text{если } 0 \leq x \leq h \\ C_{j-1}(x-h), & \text{если } x \geq h \end{cases}, \quad j \geq 2.$$

На рис.4 схематично представлено изменение концентрации легирующего металла при циклическом нанесении покрытий во время ЭИЛ. В качестве  $C_0$  принимали значения концентрации металлов в поверхностных слоях покрытия (табл.2). Толщина слоя  $h$  считается постоянной для каждого цикла и определялись отдельно для каждого случая на основе уравнения баланса вещества из экспериментальных зависимостей  $C(x)$

$$h = \frac{\int_0^{\infty} C(x) dx}{C_0 N}.$$

Ур-е (5) решали численно методом разностных схем. Значения коэффициента взаимной диффузии  $D$  подбирали из условия минимума квадратов разностей концентраций расчетной и экспериментальных кривых  $C(x)$ . На рис.2 в качестве примера

показаны расчетные концентрационные профили для ванадия после циклической диффузии в танталовую подложку при электроискровой обработке. Как видно, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и теоретических кривых, однако экспериментальные значения коэффициентов взаимной диффузии для разных систем, определенные методом Больцано-Матано, несколько меньше расчетных (табл.3), что вполне объяснимо, учитывая использованные в модели приближенные оценки числа циклов  $N$  и толщины пленки  $h$ .

Предлагаемая модель диффузии, протекающей при многократном электроискровом воздействии, может использоваться для прогноза распределения элементов по глубине покрытия, формируемого на металлах при ЭИЛ.

### Выводы

Анализ экспериментальных данных позволяет предположить, что взаимная диффузия металлов при импульсном воздействии электрических разрядов (электроискровом легировании) с энергией около 0,1 Дж и длительностью 40-200 мкс преимущественно протекает в жидкой фазе со значениями коэффициента диффузии порядка  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с.

Результаты расчетной модели циклической диффузии показывают, что метод Больцмана-Матано оценки диффузионных параметров металлов обеспечивает достаточную точность и в циклических условиях протекания диффузии.

### Литература

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г., Елютин А.В., Захаров А.М. Ниобий и тантал. М.: Металлургия, 1990, 296 с.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ. Владивосток: Дальнаука, 1995, 323 с.
3. Верхотуров А.Д., Анфимов И.С. Распределение вещества электродов в их рабочих поверхностях после

электроискрового легирования стали переходными металлами. ФХОМ, 1978, №3, с.93-98.

4. Ревуцкий В.М., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Мазанко В.Ф., Фальченко В.М., Душенко В.Ф. Исследование распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов. Электронная обработка материалов, 1981, №6, с.32-35.
5. Соловьев В.В., Астапова Е.С., Агапатов В.А. Изменение структуры стали 45 при электроискровом легировании сплавом ВК6. ФХОМ, 2002, №6, с.73-76.
6. Лариков Л.Н., Фальченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении. ДАН СССР, 1975, т.221, №5, с.1073-1076.
7. Герцрикен Д.С., Кривко В.П., Лариков Л.Н., Полоцкий И.Г., Прокопенко Г.И., Фальченко В.М. Ускорение диффузионных процессов в железе при многократном ударном нагружении. ФХОМ, 1979, №4, с.154-156.
8. Гуревич М.Е., Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е., Фальченко В.М. Влияние лазерного излучения на подвижность атомов железа. ФХОМ, 1977, №2, с.7-9.
9. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П., Кшнякин В.С., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В. Упрочнение и массоперенос при импульсной плазменно-детонационной обработке сталей. ФХОМ, 2002, №2, с.40-48.
10. Электронно-зондовый микроанализ. Ред. И.Б.Боровский. М.: Мир, 1974, 263 с.
11. Лариков Л.Н., Исайчев В.И. Структура металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах. Киев: Наукова думка, 1987, 512 с.
12. Лариков Л.Н., Фальченко В.М. К вопросу о механизме ускорения диффузии при многократном фазовом переходе. В кн.: Диффузионные процессы в металлах. Киев: Наукова думка, 1968, с.61-66.
13. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховский А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. М.: Металлургия, 1974, 280 с.
14. Углов А.А., Смурнов А.А., Тагиров К.И., Лашин А.М., Гуськов А.Г. Термокапиллярный массоперенос при легировании металлов. ФХОМ, 1988, №6, с.24-29.
15. Райченко А.И. Математическая теория диффузии в приложениях. Киев: Наукова думка, 1981, 396 с.