

С.А. Пячин, Н.Е. Аблесимов, Д.Л. Ягодзинский

## О ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ ЭЛЕКТРОДОВ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,  
Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

### Введение

Традиционным методом оценки эффективности массопереноса вещества с анода на катод при электроискровом легировании (ЭИЛ) является изучение зависимости изменения массы электродов от времени обработки. В ходе многочисленных экспериментов установлено, что в большинстве случаев в начальный момент времени ЭИЛ масса катода возрастает, а масса анода уменьшается [1, 2]. При этом по абсолютному значению убыль массы анода не совпадает с привесом катода, что объясняется тем, что часть вещества удаляется с поверхности обоих электродов в окружающую среду в виде продуктов эрозии. По истечении определенного времени обработки процесс увеличения массы катода замедляется, а затем начинает наблюдаться снижение массы катода. Такое поведение объясняется тем, что в разное время ЭИЛ осуществляется различное соотношение вкладов в массоперенос двух основных конкурирующих процессов: 1) увеличение массы катода из-за полярного переноса вещества; 2) разрушения покрытия за счет накопления в нем дефектов, образования хрупких оксидов и нитридов [3]. Вначале происходит преимущественный перенос вещества с анода на катод, а затем более интенсивно теряется масса покрытия в результате его разрушения.

В настоящее время имеется качественное объяснение процесса массопереноса при ЭИЛ, вопрос о теоретическом описании изменения массы электродов остается пока открытым. Это обстоятельство вызывает определенные трудности, поскольку для каждой новой электродной пары и режима обработки кинетические зависимости изменения массы электродов приходится находить экспериментально. Из вышесказанного вытекает цель данной работы, которая заключается в установлении количественного закона изменения массы катода и анода от времени при электроискровом легировании.

### Материалы и методика эксперимента

Для проведения экспериментов в качестве легирующих электродов (анодов) выбраны чистые переходные металлы IVB – VIБ групп (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W), а также Fe. Диаметр анодов – 2–5 мм; площадь сечения – 0,07 – 0,2 см<sup>2</sup>. Катоды представляли собой металлические пластины из тантала и стали 45. Танталу отдано предпочтение из-за его низкой температуры хладноломкости, отсутствия полиморфных превращений, что позволяет увеличить время обработки без значительного разрушения поверхности образцов и тем самым получать покрытия с большей толщиной. Размеры танталовых подложек – 10×10×1 мм, стальных – 10×10×3 мм<sup>3</sup>.

В качестве генераторов импульсов использовали промышленные электроустановки Элитрон-22А и Корона-1103. Для каждой из установок предварительно было выбрано по одному режиму, исходя из оптимальных условий легирования и качества поверхности образцов: удовлетворительной шероховатости обработанной поверхности, отсутствия интенсивного окисления и схватывания электродов. Для легирования использовали аппаратный режим работы № 4 установки Элитрон-22А: максимальный ток разряда – 10 А, напряжение в межэлектродном промежутке ~ 50 В, частота импульсов и механических колебаний – 100 Гц, средняя длительность импульса ~ 200 мкс; средняя энергия в импульсе – 0,06 Дж (в последующем – режим I). Вторым режимом обработки

поверхности (в последующем – режим II) являлся аппаратный режим работы № 6 установки Корона-1103: максимальный ток разряда – 180 А, напряжение в межэлектродном промежутке ~ 70 В, частота импульсов генератора – 910 Гц, частота механических колебаний вибратора – 100 Гц; средняя длительность импульса ~ 40 мкс; средняя энергия в импульсе – 0,08 Дж. Параметры электрических разрядов были измерены по временным разверткам тока и напряжения, полученным с помощью двухлучевого запоминающего осциллографа С8-14. Как видно, выделяемая в разряде энергия для рассматриваемых режимов приблизительно одинакова, но длительность импульсов различается примерно в 5 раз, а частота следования импульсов генератора – практически на порядок. Однако если учесть, что для режима II частота механических и электрических циклов не совпадает, истинная частота разрядов составляет примерно 300 – 400 Гц. Легирование тантала осуществлялось на режимах I и II, а стали 45 – только на режиме II. Обработку образцов заканчивали после того, как привес катода прекращался, и его масса начинала снижаться. Измерение массы электродов проводили через каждую минуту легирования с помощью весов ВЛДП-200г с точностью 0,1 мг. Полученные данные обрабатывались на ПЭВМ с помощью статистических методов, входящих в состав программного пакета «Excel» системы «Microsoft Office 98».

### Результаты исследований

В ходе проведенных исследований установлено, что кинетические зависимости изменения массы электродов при ЭИЛ имеют типичный характер кривых, полученных в многочисленных экспериментах другими исследователями [4, 5]. В большинстве случаев масса катода в течение электроискровой обработки возрастает до точки максимума, а затем плавно спадает. Масса анода, наоборот, в течение всего времени ЭИЛ снижается, при этом скорость убыли массы анода уменьшается. В некоторых случаях (при ЭИЛ Ta, Zr и V на режиме II), когда время перехода зависимости массы катода от времени через максимум мало (менее 2 минут легирования поверхностью площадью 1 см<sup>2</sup>), наблюдается так называемый «обратный массоперенос», то есть повышение массы анода при снижении массы катода. Такое поведение характерно для легирования тантала цирконием и ванадием на режиме II. Для примера на рис. 1 представлены кривые изменения массы катода  $\Delta m_k(t) = m_k(t) - m_k(0)$  и анода  $\Delta m_a(t) = m_a(t) - m_a(0)$  для ЭИЛ ванадием (а), ниобием (б), танталом (в) и молибденом (г).

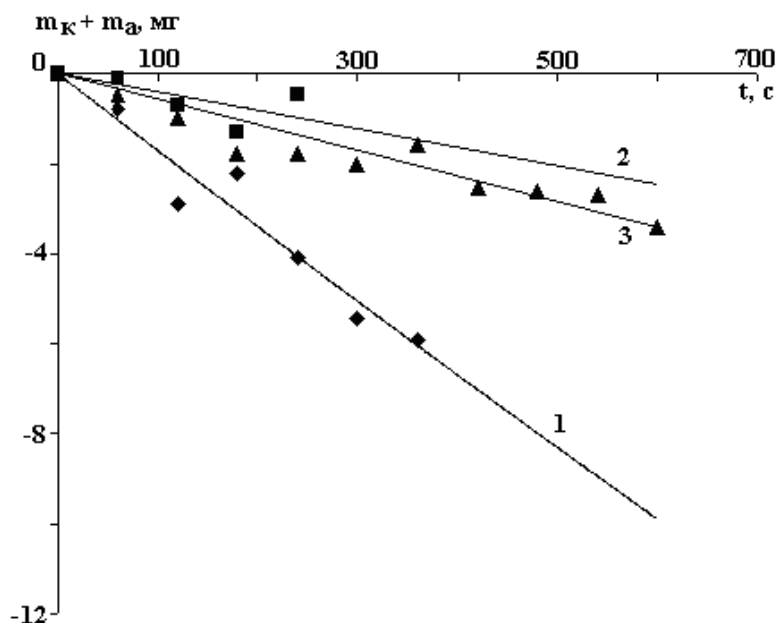


Рис.1. Изменение массы катода и анода при электроискровом легировании тантала и стали 45 переходными металлами. Анод: а – V; б – Nb; в – Ta; г – Mo. Графики: 1 –  $\Delta m_k$  (катод – Ta, режим I); 2 –  $\Delta m_a$  (катод – Ta, режим I); 3 –  $\Delta m_k$  (катод – Ta, режим II); 4 –  $\Delta m_a$  (катод – Ta, режим II); 5 –  $\Delta m_k$  (катод – сталь 45, режим II); 6 –  $\Delta m_a$  (катод – сталь 45, режим II)

Для количественного определения зависимостей  $\Delta m_k(t)$  и  $\Delta m_a(t)$  экспериментальные точки были аппроксимированы линиями, соответствующими полиному второй степени  $y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ . Несоответствие экспериментальных точек и аппроксимирующей кривой в большинстве случаев не

превышает 10 % от абсолютного значения. Уравнения, описывающие изменение массы электродов, имеют вид

$$\begin{aligned}\Delta m_{\kappa} &= a_{\kappa 1} t + a_{\kappa 2} t^2 \\ \Delta m_a &= a_{a1} t + a_{a2} t^2,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $a_{\kappa 1}$ ,  $a_{\kappa 2}$  – коэффициенты уравнения для катода, а для  $a_{a1}$ ,  $a_{a2}$  – для анода. Из начальных условий  $\Delta m_{\kappa}(0) = 0$  и  $\Delta m_a(0) = 0$  вытекает, что  $a_{\kappa 0}$  и  $a_{a0}$  равны нулю. Коэффициенты уравнений определялись по методу наименьших квадратов и представлены в табл. 1 и 2. В таблицах показаны значения коэффициентов с учетом погрешности измерения массы и времени. В большинстве случаев  $a_{\kappa 1} > 0$ ,  $a_{\kappa 2} < 0$ ,  $a_{a1} < 0$ ,  $a_{a2} > 0$ . Коэффициенты  $a_{\kappa 1}$  и  $a_{a1}$  означают скорости привеса катода и эрозии анода соответственно в начальный момент легирования

$$a_{\kappa 1} = \left. \frac{d\Delta m_{\kappa}}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}; \quad a_{a1} = \left. \frac{d\Delta m_a}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}.\quad (2)$$

Коэффициенты  $a_{\kappa 2}$  и  $a_{a2}$  – константы замедления скорости изменения массы катода.

Сравнивая коэффициенты уравнений для разных режимов и различных пар электродов "переходной металл – тантал" и "переходной металл – сталь 45", можно заметить следующее. Коэффициенты  $a_{\kappa 1}$  близки для одной и той же пары электродов (Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo – Ta) для режимов I и II при ЭИЛ тантала. Начальная скорость убыли массы анода (коэффициент  $a_{a1}$ ) примерно равны для легирования на режиме II, несмотря на то, что материал катода разный. Соответствие данного параметра наблюдается для Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Mo, Fe. Таким образом, на скорость привеса катода в начале легирования основное влияние оказывает взаимодействие материалов электродов. Скорость убыли анода определяется параметрами режима электроискрового воздействия и теплофизическими свойствами металлов вне зависимости от материала катода, поскольку в начале ЭИЛ доля перенесенного вещества с катода на поверхность анода незначительна.

Коэффициент  $a_{\kappa 2}$  в большинстве случаев имеет одинаковые значения при использовании одной и той же пары электродов вне зависимости от режима, то есть замедление скорости привеса катода определяется, как и для параметра  $a_{\kappa 1}$ , взаимодействием металлов обоих электродов, образованием сплавов и вторичных структур. У ванадия из-за обратного массопереноса параметр  $a_{\kappa 2}$  имеет положительное значение. Для коэффициента  $a_{a2}$  явная зависимость не наблюдается.

Уравнения (1) можно представить в другом виде, если использовать пороговые значения времени  $t_{\kappa}$  и  $t_{na}$ , которые соответствуют точке максимума кинетической кривой для катода и точке минимума – для анода

$$\begin{aligned}\Delta m_{\kappa} &= a_{\kappa 1} t \left( 1 - \frac{t}{2t_{\kappa}} \right), \\ \Delta m_a &= a_{a1} t \left( 1 - \frac{t}{2t_{na}} \right),\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$t_{\kappa} = \frac{a_{\kappa 1}}{2a_{\kappa 2}}, \quad t_{na} = \frac{a_{a1}}{2a_{a2}}.\quad (4)$$

Чем меньше  $t_{\kappa}$ , тем быстрее протекает процесс разрушения покрытия на катоде, и масса катода быстрее достигает максимума. Из эксперимента установлено, что время  $t_{\kappa}$  меньше  $t_{na}$ . Если  $t/2t_{\kappa} \ll 1$ , то зависимости (3) приобретают линейный вид.

Для количественного описания переноса вещества часто используют коэффициент массопереноса  $K_M$ , который определяют в виде отношения изменения массы катода к изменению массы анода, то есть  $K_M = \Delta m_{\kappa} / \Delta m_a$  [2]. В настоящей работе в рамках данного описания коэффициент массопереноса предлагается представлять в виде отношения изменения массы катода к абсолютному значению изменения массы анода, а именно

Таблица 1. Параметры уравнений, описывающих изменение массы катода при ЭИЛ

Параметр	$a_{к1}, 10^{-3}$ мг/с			$a_{к2}, 10^{-5}$ мг/с <sup>2</sup>		
	Режим I, катод – Та	Режим II, катод – Та	Режим II, катод – сталь 45	Режим I, катод – Та	Режим II, катод – Та	Режим II, катод – сталь 45
Ti	22±4	16±2	15±2	-4±2	-4±0,5	-2±0,3
Zr	7±2	6±2	10±2	-6±2	-7±2	-1±0,6
Hf	24±3	31±2	37±1	-9±0,7	-10±0,5	-4±0,04
V	12±3	9±5	2±1	-3±0,8	-6±2	-0,6±0,02
Nb	12±4	15±5	7±2	-3±1	-5±2	-1±0,6
Ta	24±1	19±2	29±1	-2±0,1	-3±0,3	-2±0,08
Cr	14±2	15±3	36±2	-2±0,3	-3±0,6	-7±1
Mo	15±2	13±1	8±1	-2±0,2	-0,6±0,08	-3±1
W	17±2	29±1	13±1	-2±0,2	-1±0,05	-0,9±0,1
Fe	29±1	36±1	26±1	-1±0,02	-1±0,1	-6±0,1

Таблица 2. Параметры уравнений, описывающих изменение массы анода при ЭИЛ

Параметр	$a_{a1}, 10^{-3}$ мг/с			$a_{a2}, 10^{-5}$ мг/с <sup>2</sup>		
	Режим I, катод – Та	Режим II, катод – Та	Режим II, катод – сталь 45	Режим I, катод – Та	Режим II, катод – Та	Режим II, катод – сталь 45
Ti	-47±10	-31±6	-28±3	6±2	3±1	2±0,7
Zr	-15±7	-13±5	-16±3	-3±1	5±3	0,4±0,1
Hf	-94±20	-57±20	-56±5	20±5	0±0,5	0,4±0,1
V	-30±7	-19±10	-10±4	3±1	9±4	2±0,5
Nb	-19±3	-27±11	-24±3	4±1	5±2	2±0,5
Ta	-166±10	-47±7	-58±4	-2±0,5	-6±2	-3±0,4
Cr	-51±6	-50±8	-73±3	2±1	7±3	0,9±0,04
Mo	-53±6	-20±2	-16±2	3±1	0,4±0,1	0,2±0,05
W	-32±4	-35±2	-20±2	2±0,8	0,5±0,2	0,8±0,2
Fe	-43±3	-41±3	-39±2	1±0,1	0,8±0,3	0,1±0,05

$$K_M = \frac{\Delta m_k}{|\Delta m_a|} = \frac{a_{k1}}{|a_{a1}|} \frac{\left(1 - \frac{t}{2t_{nk}}\right)}{\left|1 - \frac{t}{2t_{na}}\right|}. \quad (5)$$

В таком виде можно описать три варианта, наблюдаемые при ЭИЛ: 1)  $\Delta m_k > 0, \Delta m_a < 0$ ; 2)  $\Delta m_k < 0, \Delta m_a < 0$ ; 3)  $\Delta m_k < 0, \Delta m_a > 0$ . Коэффициент  $K_M$  будет принимать следующие значения:

- 1)  $0 < K_M < 1$ , при преимущественном переносе вещества с анода на катод ( $|\Delta m_k| < |\Delta m_a|$ );
- 2)  $-1 < K_M < 0$ , при убыли массы обоих электродов;
- 3)  $K_M < -1$ , при преимущественном переносе вещества с катода на анод ( $|\Delta m_k| > |\Delta m_a|$ ).

Для исследуемых в работе образцов наблюдались все три случая. На рис. 2 изображены значения коэффициентов массопереноса при ЭИЛ для тех же вариантов, как и на рис. 1. В начальный момент времени, когда  $t \ll 2t_{na}$ , графики, описывающие  $K_M$ , представляют собой нисходящие прямые линии, то есть отношение  $\Delta m_k$  к  $|\Delta m_a|$  с течением времени легирования уменьшается с постоянной скоростью. В начале коэффициент массопереноса лежит в области  $0 < K_M < 1$ , а затем по мере увеличения времени ЭИЛ постепенно переходит во вторую область ( $-1 < K_M < 0$ ) и если есть обратный массоперенос, в третью область ( $K_M < -1$ ) (см. рис. 2, а).

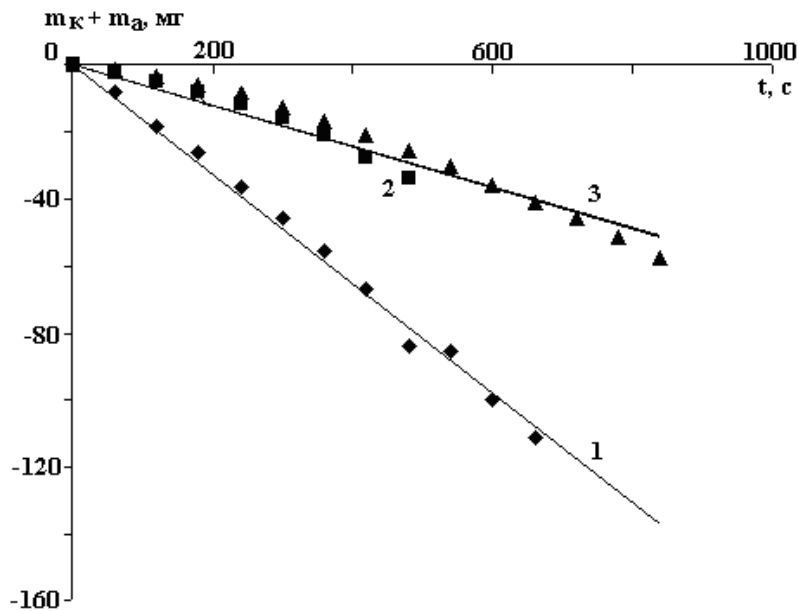


Рис. 2. Коэффициенты массопереноса при ЭИЛ тантала и стали 45 переходными металлами. Анод: а – V; б – Nb; в – Ta; г – Mo. Графики: 1 –  $K_M$  (катод – Ta, режим I); 2 –  $K_M$  (катод – Ta, режим II); 3 –  $K_M$  (катод – сталь 45, режим II)

В ходе ЭИЛ величина  $K_M$  изменяясь, может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Поэтому коэффициент массопереноса при таком описании нельзя представлять в виде отношения одной физической, химической или механической характеристики катода к аналогичной характеристике анода, как это делается, например, в работе [2]. В действительности необходимо, чтобы выражение для  $K_M$  содержало такую комбинацию параметров, которая изменялась бы со временем и могла бы менять знак. Недостаток выражения (5) состоит в том, что оно имеет ограниченную область применения, поскольку коэффициент  $K_M$  не определен в момент времени  $t = 2t_{na}$ .

#### Обсуждение результатов

Решение поставленной в работе задачи количественного описания кинетики массопереноса сводится к отысканию выражений для коэффициентов  $a_{k1}, a_{k2}, a_{a1}, a_{a2}$ , либо  $a_{k1}, a_{a1}, t_{nk}, t_{na}$ , что сделать достаточно сложно, поскольку данные коэффициенты являются значениями четырех многопараметрических функций, которые зависят от различных параметров: частоты разрядов, энергии и длительности электрических импульсов, различных свойств материалов анода и катода, состояния межэлек-

тродной среды и т.п. Выбор конкретной формулы для расчета коэффициентов во многом зависит от теоретической модели, используемой для описания процессов, протекающих при ЭИЛ. Рассмотрим следующее представление. В общем виде суммарное изменение массы катода  $\Delta m_k$  и анода  $\Delta m_a$  можно записать

$$\begin{aligned}\Delta m_k &= M_k^+ - M_k^- \\ \Delta m_a &= M_a^+ - M_a^-\end{aligned}\quad (6)$$

где  $M_k^+$ ,  $M_a^+$  – функции от времени, описывающие увеличения массы катода и анода, соответственно;  $M_k^-$ ,  $M_a^-$  – функции от времени, описывающие уменьшение массы катода и анода. Привес электродов обусловлен переносом вещества с противоположного электрода и взаимодействием материала с элементами окружающей среды. В случае, когда легирование происходит на воздухе, этими элементами являются азот и кислород, что подтверждается наличием оксидов и нитридов в поверхностных слоях, образуемых на электродах при ЭИЛ чистыми металлами. Уменьшение массы обусловлено разрушением поверхности электродов за счет испарения, выброса жидких капель, хрупкого скола и т.п. С учетом того, что

$$\begin{aligned}M_k^+ &= m_{a \rightarrow k} + m_{вк}, \\ M_k^- &= m_{k \rightarrow a} + m_{рк}, \\ M_a^+ &= m_{k \rightarrow a} + m_{ва}, \\ M_a^- &= m_{a \rightarrow k} + m_{ра},\end{aligned}\quad (7)$$

уравнения (6) будут иметь вид

$$\begin{aligned}\Delta m_k &= m_{a \rightarrow k} + m_{вк} - m_{k \rightarrow a} - m_{рк}, \\ \Delta m_a &= m_{k \rightarrow a} + m_{ва} - m_{a \rightarrow k} - m_{ра},\end{aligned}\quad (8)$$

где  $m_{a \rightarrow k}$  – масса вещества, перенесенная с анода на катод;  $m_{k \rightarrow a}$  – масса вещества, перенесенная с катода на анод;  $m_{вк}$ ,  $m_{ва}$  – изменение массы катода и анода соответственно за счет взаимодействия с элементами окружающей среды;  $m_{рк}$ ,  $m_{ра}$  – масса вещества, удаленного в окружающую среду с поверхности катода и анода соответственно, и не участвующего в массопереносе. Уравнение (8) не имеет решения, поскольку число неизвестных больше, чем число уравнений. Это говорит о том, что при проведении опытов по изучению кинетики массопереноса при ЭИЛ помимо измерения массы катода и анода необходимо одновременно определять вклады еще четырех величин  $m_{вк}$ ,  $m_{ва}$ ,  $m_{рк}$ ,  $m_{ра}$ . Изменение массы катода и анода за счет взаимодействия с элементами окружающей среды можно эмпирически определить, если знать изменение концентрации этих элементов в поверхностных слоях электродов с течением времени легирования. Массу вещества, удаляемую в окружающую среду с поверхности катода и анода в ходе ЭИЛ, можно измерить, исследуя продукты эрозии. Только в этом случае удастся определить истинную величину переноса вещества с одного электрода на другой.

Эксперименты показали, что  $\Delta m_k(t)$  и  $\Delta m_a(t)$  зависят от времени как квадратичная функция. Таким образом, каждый член выражения (8) может являться полиномом второй степени. Если сложить  $\Delta m_k$  и  $\Delta m_a$ , получим следующее выражение:

$$\Delta m_k + \Delta m_a = m_{вк} + m_{ва} - m_{рк} - m_{ра}. \quad (9)$$

Графики, представленные на (рис. 3) описывающие сумму величин (9), представляют собой, как правило, спадающие прямые линии, то есть в течение всего времени легирования суммарное разрушение поверхности электродов происходит примерно с постоянной скоростью и превалирует по абсолютному значению  $m_{вк}$  и  $m_{ва}$ . Отсюда вытекает, что величины  $m_{рк}$ ,  $m_{ра}$  есть линейные зависимости от времени, а члены  $a_{kl}$  и  $a_{al}$ , входящие в выражения (1), обусловлены скоростью разрушения электродов под воздействием электрических разрядов.

В первом приближении вкладом  $m_{вк}$  и  $m_{ва}$  в изменение массы электродов можно пренебречь, поскольку если атомная масса оксидов и нитридов металлов незначительно больше, чем атомная масса самих металлов. Таким образом, вид уравнений упрощается

$$\begin{aligned}\Delta m_k &\approx m_{пер} - m_{рк} \\ \Delta m_a &\approx -m_{пер} - m_{ра}\end{aligned}\quad (10)$$

где  $m_{пер} = m_{a \rightarrow к} - m_{к \rightarrow а}$  – истинная величина массы, перенесенной с анода на катод. В итоге получаем, что квадратичная зависимость изменения массы электродов от времени обусловлена прежде всего характером изменения  $m_{пер}$ . Эта величина зависит от количества расплавленного под действием электрического разряда вещества и от эффекта схватывания контактирующих поверхностей. Влияние схватывания электродов на эрозию анода наиболее подробно описано в работе [6], в которой показано, что переходные металлы IV группы проявляют наибольшую склонность к схватыванию, уровень которого понижается при переходе к металлам VI группы. Данный факт подтверждается результатами наших исследований. Если сравнить коэффициент  $a_{к2}$  при легировании тантала, то видно, что  $a_{к2}$  понижается при переходе металлов от IV к VI группе.

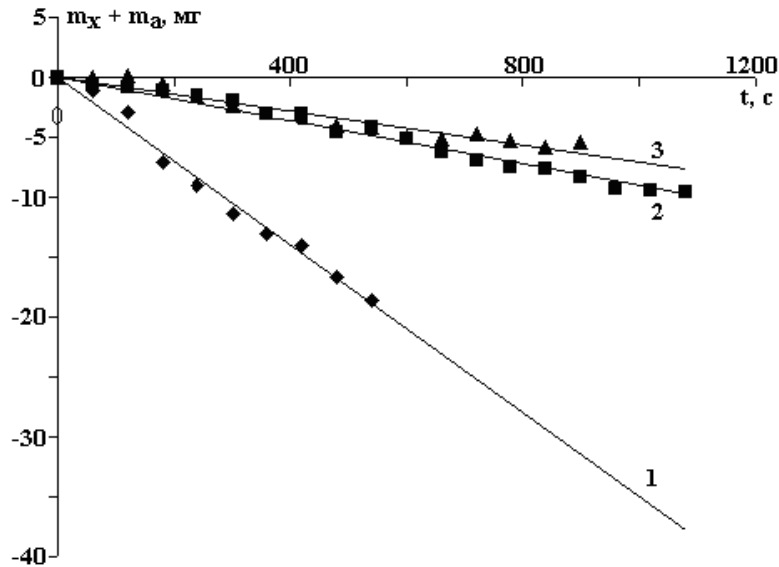


Рис. 3. Сумма изменений массы катода и анода ( $\Delta m_k + \Delta m_a$ ) во времени ЭИЛ тантала и стали 45 переходными металлами. Анод: а – V; б – Nb; в – Ta; г – Mo. Графики: 1 – (катод – Ta, режим I); 2 – (катод – Ta, режим II); 3 – (катод – сталь 45, режим II)

На перенос вещества с одного электрода на другой также большое значение имеет растворимость материалов, из которых изготовлены электроды. Среди перечисленных металлов тантал образует ограниченные твердые растворы только с Cr и Fe, с остальными – неограниченные твердые растворы. Железо с большинством используемых в работе металлов образует ограниченные растворы, за исключением V и Cr. Сравнивая кинетические кривые, можно сделать следующее заключение. Если металлы, из которых изготовлены катод и анод, образуют ограниченные твердые растворы (ОР), то порог хрупкого разрушения катода наступает позже, чем при легировании на том же режиме с использованием в качестве электродов металлов, образующих неограниченные твердые растворы (НР). То есть коэффициент  $a_{к2}(\text{ОР}) < a_{к2}(\text{НР})$ .

Учитывая вышесказанное, квадратичную зависимость  $m_{пер}$  от времени можно объяснить следующим образом. В начальный момент ЭИЛ вещество преимущественно переносится с анода на катод за счет смещения точки максимального разогрева в сторону анода, направленности сверху вниз электрического и гравитационного полей. По мере протекания легирования происходит изменение состава поверхностных слоев электродов в сторону увеличения концентрации элемента противоположного электрода, что установлено в работе [7]. Этот процесс осуществляется тем быстрее, чем выше растворимость и схватываемость металл-электродов с образованием мостика из расплавленного металла. За счет этого в ходе ЭИЛ происходит выравнивание состава поверхностных слоев анода и катода, а следовательно, и их свойств. Чем выше плотность металла катода по сравнению с материалом анода, тем вероятней наблюдать «обратный массоперенос». Особенно хорошо это заметно для случая легирования на режиме II тантала и стали 45 металлами Ti, Zr, V, Nb, Cr. Эффект схватывания должен приводить к уменьшению количества электрических разрядов, поэтому скорость пере-

носа уменьшается и становится сравнимой со скоростью эрозии. В результате этого на кинетических кривых для катода наблюдаем максимум.

Для более детального теоретического расчета количества перенесенного вещества с одного электрода на другой можно попытаться использовать решение задачи плавления и испарения металлов под действием на их поверхность источника тепла с мощностью, равной мощности электрического разряда. Для оценки вклада взаимодействующего с элементами окружающей среды вещества необходимы знания химической кинетики реакций окисления и азотирования переходных металлов в условиях циклического изменения температуры. Эрозию материала или предел накопления внутренних напряжений в покрытии можно определить с помощью параметров, описывающих стойкость материала внешним термомеханическим нагрузкам. Задача эта достаточно сложная и вряд ли выполнимая в рамках одной работы. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в этой области.

Надо также отметить, что наше представление относится к описанию процесса массопереноса при ЭИЛ в течение времени  $t < 2t_{na}$  и позволяет:

- систематизировать данные по изменению массы электродов при электроискровой обработке;
- прогнозировать поведение функций  $\Delta m_k(t)$  и  $\Delta m_a(t)$  по нескольким начальным точкам и тем самым сэкономить время на проведение опытов;
- уменьшить диапазон поиска конкретных формул для коэффициентов уравнений (1).

#### **Выводы**

Исследование изменения массы электродов от времени электроискрового легирования показало, что эта зависимость описывается полиномом второй степени. Начальная скорость переноса вещества с анода на катод примерно одинаково для одних и тех же пар электродов. При легировании переходными металлами тантала и стали 45 на одном режиме скорость убыли массы анода совпадает в большинстве случаев. При этом существенную роль на коэффициенты уравнений оказывают схватывание и растворимость металлов, из которых изготовлены электроды. Рассмотренный способ описания кинетических зависимостей может быть полезен для систематизации данных по ЭИЛ при использовании различных пар электродов и режимов обработки.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ. Владивосток, 1995.
3. Парканский Н.Я., Кац М.С., Гольдинер М.Г., Гитлевич А.Е. Кинетика разрушений покрытий при ЭИЛ // Электронная обработка материалов. 1982. № 3. С. 20–23.
4. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Куриленко Л.Н., Половцев Л.П. Кинетика обратного массопереноса при электроискровом легировании и формирование вторичной структуры на аноде // Физика и химия обработки материалов. 1986. № 4. С. 65–68.
5. Верхотуров А.Д. Особенности эрозии переходных металлов при ЭИЛ // Электронная обработка материалов. 1981. № 6. С. 18–21.
6. Верхотуров А.Д. Влияние схватывания электродов на эрозию анода в процессе электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. 1984. № 6. С. 22–26.
7. Верхотуров А.Д., Анфимов И.С. Распределение вещества электродов в их рабочих поверхностях после электроискрового легирования стали переходными металлами IV–VI групп // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 3. С. 93–98.

*Поступила 27.05.2002.*

#### **Summary**

In the article the results of exploration of kinetics of mass transfer are introduced at electrospark deposition of tantalum and steel 45 by transition metals of IVB – VIB groups and iron. It is fixed, that the initial velocity of increase in weight of the cathode is approximately identical the same steam of welding rods on used treatment schedules. The kinetic dependencies of variation of weight of welding rods with adequate accuracy are described by polynomial of the second extent. The given way of the specification statement of kinetic dependencies can be useful to systematization of the data of mass transfer on electrospark deposition.