

Электроэрозионный ряд металлов для электроискрового легирования на основе решения задачи теплопроводности

А. А. Бурков, В. К. Хе*, А. Ю. Быщера

Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
г. Хабаровск, 680042, Россия,
*e-mail: khevlad@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023

После доработки 06.03.2024

Принята к публикации 11.03.2024

Экспериментально определена электрическая эрозия металлов: Zn, Al, Zr, Ti, V, Fe, Ni, Co, Cr, Nb, Mo, Cu, W. Впервые использовалась смесь гранул из перечисленных металлов, взятых в равных мольных соотношениях, которая выступала в качестве нелокализованного электрода, для электроискрового легирования стали 35. Предложена математическая модель расчета объема расплава металлов в условиях электрического разряда при электроискровом легировании на основе решения задачи теплового поля на электродах с использованием их теплофизических констант. Показано, что действующий источник тепла при разряде на порядок уже, чем эрозионная зона, и на три порядка мощнее, чем это предполагалось ранее. Рассчитаны объемы плавления на металлах за один разряд и построен соответствующий ряд электроэрозионной стойкости исследованных металлов. Показано, что разработанный теоретический ряд электроэрозионной стойкости металлов лучше соответствует экспериментальным данным по сравнению с литературными.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электроэрозионный ряд металлов, электрическая эрозия, уравнение теплопроводности, математическое моделирование

УДК 621.762

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.2.01>

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что объем эродированного материала на единицу энергии электрического разряда для различных металлов может отличаться более чем в десять раз. Ряды электроэрозионной стойкости (ЭЭС) металлов предлагались Б.Н. Золотых, С.П. Миткевичем, Л.С. Палатником, Н.И. Лазаренко, К. Альбински, Г.В. Самсоновым и А.Д. Верхотуровым (табл. 1). Б.Н. Золотых закономерно предположил, что ЭЭС металла анода возрастает при увеличении его температуры плавления и полной удельной теплоты плавления [1]. Такой подход в целом удовлетворительно описывал эксперимент, но наблюдались серьезные отклонения. С.П. Миткевич установил, что ЭЭС анода возрастает с ростом теплоты сублимации, которая для металлов примерно равна энергии связи [2]. Данный подход хорошо описывал эксперимент по эрозии анода для ограниченного набора переходных металлов [3]. Очевидно, что однозначная функциональная связь между ЭЭС металла и какой-либо одной теплофизической константой материала электрода невозможна, поскольку эрозия зависит не только от температуры плавления, но и от теплоемкости и теплопроводности металла. Впоследствии Л.С. Палатник предложил количественный

критерий ЭЭС металлов с учетом комплекса их теплофизических характеристик:

$$K = C_p \lambda T^2, \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура. Вместе с тем экспериментальные данные по объему лунок на поверхности переходных металлов, полученные Л.С. Палатником [4], не полностью соответствовали приведенной модели (табл. 1). Более того, Н.И. Лазаренко предложила ряд ЭЭС металлов на основе экспериментальных исследований электрической эрозии в водороде [5], который расходится с данными Л.С. Палатника. К. Альбински сформулировал критерий эрозионной стойкости S рабочих электродов, который определяется теплофизическими и механическими свойствами материала [6]:

$$S = 42,68 \frac{T_{пл.} \times \lambda}{E \times \alpha} (1 - \mu), \quad (2)$$

где E – модуль упругости, кГ/мм²; $T_{пл.}$ – температура плавления, °С; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент термического расширения, К⁻¹; μ – коэффициент Пуассона. Г.В. Самсонов предложил модель на основе электронного строения атома металла. В частности, он установил ряды ЭЭС металлов в

Таблица 1. Электроэрозионный ряд металлов согласно эксперименту и моделям по объему

Ряд металлов по возрастанию ЭЭС														
Б.Н. Золотых (эксперимент)														
Sn	Bi	Pb	Zn	Al	Cu	Co	Ni	Fe	Ti	Zr	V	Cr	Mo	W
С.П. Миткевич и Р.А. Волченкова (эксперимент)														
Ti		V		Zr		Nb		Ta		Mo		W		
Л.С. Палатник (модель)														
Zn	Ti	Zr	V	Al	Nb	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	Cu	W		
Л.С. Палатник (эксперимент)														
Zn	Ni	Co	Fe	Zr	Ti	V	Nb	Cr	Mo	W				
Н.И. Лазаренко (эксперимент)														
Pb	Zn	Cd	Co	Pd	Ag	Fe	Mo	Cu	Pt	Ni	W			
К. Альбински (модель)														
Ni	Co	Ti	Fe	V	Ta	Cr	Nb	Mo	Cu	W	Ag			
Г.В. Самсонов (эксперимент)														
Zn	Ti	V	Zr	Ni	Co	Fe	Nb	Cr	Ta	Mo	W			
А.Д. Верхотуров (эксперимент)														
Zn	Zr	Ni	Ti	Co	Fe	V	Cr	Nb	Ta	Mo	W	Cu	Ag	

зависимости от статистического веса атомов со стабильными d^5 -конфигурациями, которые хорошо описывают экспериментальные данные по эрозии анода при электроискровом легировании (ЭИЛ) в аргоне (табл. 1). Недостатком данного подхода является то, что он предсказывает эрозию только d -металлов, и даже среди них не применим к цинку и серебру [7]. А.Д. Верхотуров продолжил эти работы и пришел к выводу, что ЭЭС металла зависит от комплекса теплофизических характеристик, структуры и прочности электрода, режимов ЭИЛ и среды, в которой проводится обработка. На основе данных из работ А.Д. Верхотурова по электрической эрозии металлов в аргоне также был построен ряд ЭЭС металлов.

Из табл. 1 хорошо видно, что наибольшей ЭЭС в основном обладают вольфрам и медь, поэтому вопрос выбора материала анода для электроэрозионной размерной обработки (ЭЭРО) очевиден применительно к перечню обрабатываемых материалов. Для выбора электродной пары в ЭИЛ достаточно критерия Палатника, тем более что покрытия из чистых металлов сильно уступают по эксплуатационным свойствам покрытиям, полученным с помощью композиционных электродных материалов. Таким образом, вопрос электроэрозионной стойкости металлов возникал с момента разработки ЭИЛ и электроэрозионной размерной обработки, но однозначного ряда ЭЭС металлов не было сформулировано.

В новой технологии электроискрового легирования нелокализованным электродом (ЭИЛНЭ) электроэрозионная стойкость металлов имеет важное значение, поскольку можно наносить высокоэнтропийные и аморфные покрытия,

используя анодные смеси (АС) из чистых металлов. При этом концентрация металла в покрытии зависит от его концентрации в АС и эрозионной стойкости. Поэтому данная работа посвящена уточнению ряда ЭЭС металлов применительно к ЭИЛНЭ. Для этого была приготовлена АС с эквимольярным соотношением гранул из 13 наиболее перспективных металлов-компонентов высокоэнтропийного покрытия. Такой экспериментальный подход к построению ряда ЭЭС металлов более перспективен по сравнению с традиционным ЭИЛ, поскольку не зависит от материала катода, так как гранулы всех металлов одновременно находятся в АС в равных условиях и могут одновременно выступать анодом и катодом, а также потому, что процесс осуществляется в автоматическом режиме.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Была приготовлена эквимольярная АС с соотношением гранул из 13 металлов (табл. 2). Гранулы всех металлов имели одинаковый диаметр – $4 \pm 0,5$ мм. Подложка (катод) из стали 35 была изготовлена в форме цилиндра диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Схема установки для осаждения покрытий нелокализованным анодом с добавлением порошка подробно описана в работе [8]. Генератор разрядных импульсов IMES-40 вырабатывал импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 110 А, длительностью 100 мкс и частотой 1000 Гц при напряжении 30 В. Для предотвращения окисления поверхности образцов в рабочий объем контейнера подавался защитный газ – аргон со скоростью 10 л/мин. Каждые 10–20 мин процесс прерывался, гранулы

Таблица 2. Состав АС для высокоэнтропийного покрытия

Металлы	Fe	Al	Ti	Ni	Co	Mo	V	W	Cu	Zn	Nb	Cr	Zr
Массовая доля, %	5,88	2,84	5,07	6,10	6,27	9,99	5,32	20,66	6,03	6,91	9,73	5,47	9,72
Мольная доля, %	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69

Таблица 3. Теплофизические свойства металлов

Металл	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(К·кг)	Температуропроводность, м ² /с	Температура плавления, К
W	19250	162,8	132,01	6,406×10 ⁻⁵	3695
Mo	10220	138	249,43	5,413×10 ⁻⁵	2623
Ni	8900	90,9	444,56	2,297×10 ⁻⁵	1726
Co	8900	100	420,84	2,669×10 ⁻⁵	1768
Nb	8570	53,7	263,06	2,382×10 ⁻⁵	2741
Cu	8920	401	384,60	1,124×10 ⁻⁴	1356,6
Fe	7784	80,4	450,17	2,245×10 ⁻⁵	1812
V	6110	30,7	489,77	1,025×10 ⁻⁵	2160
Ti	4540	21,9	524,37	1,026×10 ⁻⁵	1941
Zr	6506	22,7	277,35	1,258×10 ⁻⁵	2125
Cr	7190	93,9	448,11	2,914×10 ⁻⁵	2130
Al	2698,9	237	900,67	9,545×10 ⁻⁵	933,5
Zn	7133	116	388,50	4,186×10 ⁻⁵	692,6

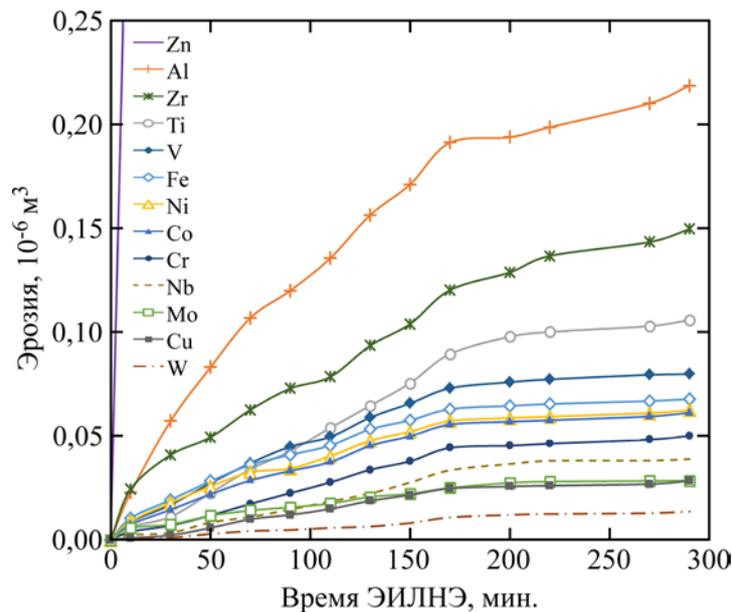


Рис. 1. Кинетика совместной эрозии гранул из разных металлов в процессе ЭИЛНЭ:
 Zn → Al → Zr → Ti → V → Fe → Ni → Co → Cr → Nb → Mo → Cu → W.

просеивались от продуктов эрозии, разделялись на фракции и взвешивались.

В основе вычисления коэффициента эрозионной стойкости металлов лежит уравнение:

$$\Gamma_i = dV_i / \Sigma [dV_i], \quad (3)$$

где γ_i – электроэрозионная стойкость металла; dV_i – объем эрозии металла при удельном электроискровом воздействии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 показана кинетика эрозии гранул из разных металлов в течение нескольких часов ЭИЛНЭ. Как видно из графика, кривая эрозии цинка резко устремляется вверх после 10 мин ЭИЛНЭ. Это объясняется тем, что большой объем цинковых гранул расплавился за этот период обработки, что указывает на наиболее

Таблица 4. Экспериментальный ряд металлов в порядке возрастания ЭЭС при ЭИЛНЭ в пересчете на один разряд

Металлы	Zn	Al	Zr	Ti	V	Fe	Ni	Co	Cr	Nb	Mo	Cu	W
Объем $\times 10^{14}$, м ³	181,7	3,44	2,35	1,66	1,25	1,07	0,98	0,96	0,79	0,61	0,45	0,45	0,22

низкую электроэрозионную стойкость цинка, обусловленную низкой температурой плавления (табл. 3). Поэтому в дальнейшем цинк был удален из системы, и остальные опыты проводились без него. Кроме того, гранулы меди и вольфрама прибавили в массу за первые 10 мин обработки в результате переноса материала с других гранул. Для большинства металлов максимальные значения удельной эрозии наблюдались за первые 10 мин ЭИЛНЭ, а затем происходило ее замедление. Второе замедление эрозии наблюдается после 170 мин ЭИЛНЭ, что можно объяснить завершением процессов формирования вторичной структуры на поверхности гранул.

По итоговым величинам эрозии можно заключить, что вольфрам и ниобий обладают высокой электроэрозионной стойкостью, тогда как цинк и алюминий – наименьшей. Для построения экспериментального ряда электроэрозионной стойкости металлов в соответствии с рис. 1 была вычислена удельная эрозия металлов за один разряд в условиях ЭИЛНЭ (табл. 4). При расчете коэффициент прохождения импульсов принимался равным 0,36, что установлено экспериментально.

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ РЯД МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОДАХ

Было проведено моделирование эрозионной стойкости перечня металлов из табл. 3. В основе расчетов лежит представление о том, что в обмене материалом и последующем формировании высокоэнтропийного покрытия будет участвовать расплав металла гранул, образовавшийся в результате теплового воздействия плазмы электрического разряда на их поверхность. При этом испарение металла игнорировалось, поскольку известно, что на испарение тратится не более 1% энергии низковольтного разряда. Объем расплава определяется теплофизическими константами металла при изменяющемся во времени тепловом воздействии разряда. Для выражения объема расплава через энергию разряда на основе теплофизических констант (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, температура плавления) металла проводят расчет теплового поля на поверхности электродов для задач ЭИЛ и ЭЭРО

[9–11]. За расплав принимался материал, имеющий на момент окончания разряда температуру, равную точке плавления, или выше. Для упрощения вычислительного процесса фазовый переход на плавление не учитывался, поскольку основное количество энергии расходуется на нагрев объема металла, а на плавление тратится не более 1% энергии, выделяемой в разряде, что объясняет низкую энергоэффективность ЭЭРО материалов [12]. Предложенная модель учитывает мощность и длительность разрядов. Объем расплава вычислялся интегрированием области по радиусу и глубине зоны, имеющей температуру точки плавления металла:

$$V_m = \pi \int_0^{z_m} r_m(z_m)^2 dz, \quad (4)$$

где $r_m(z_m)$ – функциональная зависимость радиуса области с температурой, равной точке плавления, от ее глубины $r_m(z_m)$ определялась методом наименьших квадратов с точностью $\alpha = 0,95$ из участка графика температурной зависимости, который соответствует температуре плавления материала.

Для построения трехмерных карт распределения температуры в объеме материала на момент окончания разряда осуществлялось двойное интегрирование с использованием функции Грина в среде MAPLE:

$$T(r, z, t) = 2\pi \left(\int_0^l \int_0^R \xi T_0 G(r, z, \xi, \eta, t) d\xi d\eta + \right. \\ \left. + \frac{\alpha}{\lambda} \int_0^l \int_0^R \xi q_s(\xi, \tau) G(r, z, \xi, 0, t - \tau) d\xi d\tau \right), \quad (5)$$

где R и l – радиус и глубина облучаемой области. R и l принимались равными радиусу гранулы 2 мм; T_0 – начальная температура (20 °С), G – функция Грина; q_s – мощность теплового потока; t – длительность разряда; α – температуропроводность (табл. 3); ξ , η и τ – переменные интегрирования по радиусу, глубине и времени соответственно. Для вычисления интегралов использовался метод ячеек.

Мощность теплового потока вычислялась по следующей формуле:

$$q_s(r, \tau) = \frac{AP(\tau)}{\pi R_1(\tau)^2} \times e^{-\left(\frac{r}{R_1(\tau)}\right)^{2,71}} \times \ln 2, \quad (6)$$

где P – мощность, выделяемая во время протекания разряда, $P = IU$; A – это доля мощности, выделяемой на одном электроде.

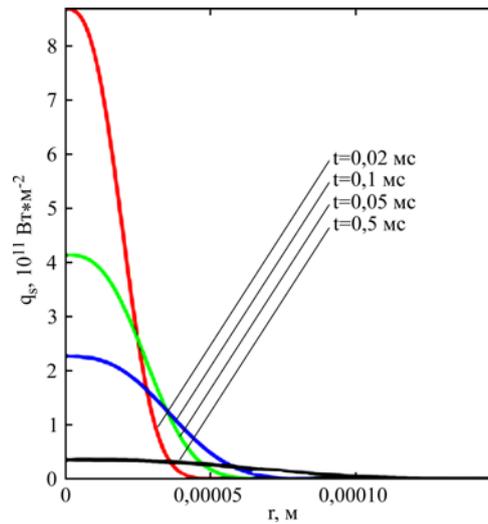


Рис. 2. Расчетная зависимость плотности мощности теплового потока на поверхности металла от расстояния до его центра для τ : 20, 50, 100 и 500 мкс.

Ранее в нашей работе [13] значение P принималось постоянным, однако в действительности при продолжительных импульсах их мощность снижалась во времени. Поэтому ток и напряжение в разряде фиксировались осциллографией и функция $P(\tau)$ имела вид:

$$P(\tau) = 2301,6 \times e^{-1577 \times \tau}. \quad (7)$$

Доля мощности, выделяемой на одном электроде, выражалась через коэффициент пропорциональности A . В модели принималось условие, что мощность, выделяемая на катоде и аноде, одинаковая, соответственно, $A = 0,5$. $R_{1/2}(\tau)$ – полурадиус канала плазмы, пропорциональный радиусу области плавления (R_m):

$$R_{\frac{1}{2}}(\tau) = BR_m(\tau), \quad (8)$$

где B – коэффициент сосредоточенности теплового источника. Функция $R_m(\tau)$ была определена на основе экспериментальных данных по временной зависимости диаметра эрозионной области [13]:

$$R_m(\tau) = 1,17 \times 10^{-2} \times \tau^{0,378}. \quad (9)$$

Как следует из (8) и (9), функция радиуса теплового потока от длительности разряда имела степенную зависимость, что согласуется с данными работы [14]. Основная задача проведенных вычислений заключалась в подборе параметров A и B в уравнениях (6) и (8) таким образом, чтобы расчетные температуры достигали температуры плавления для теплопроводных тугоплавких металлов (Cu, W) при малых τ , как это наблюдается в эксперименте, что было достигнуто при $A = 0,49$ и $B = 0,10324$. Ранее подобранное значение для плавления титана $B = 1,4$ [15] соответствует рассредоточенному источнику. Однако при его использовании для расчета на меди, вольфраме и т.п.

температура на момент окончания разряда не достигала точки плавления при малых τ . Напротив, значение $B = 0,10324$ соответствует очень узкому тепловому источнику с высокой рассчитанной плотностью мощности, достигающей величин $q_s \sim 10^{11}$ Вт/м² (рис. 2). Параметры A и B моделируют плотность мощности теплового потока. Физический смысл параметра B заключается в сосредоточении наибольшей мощности теплового источника в области его центра. Иными словами, действующий источник тепла на порядок величин уже в поперечном сечении, чем эрозионная зона и область микрованны расплава, наблюдаемой на металле, и на три порядка мощнее, чем это предполагалось ранее ($q_s \sim 10^8$ Вт/м²) [13, 15]. Узкий и мощный источник был предложен в миграционной теории электрического разряда И.Г. Некрашевичем [16].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе разработанной модели, с использованием теплофизических констант материалов (табл. 3), были рассчитаны объемы расплава металлов (рис. 3). Как было показано выше, длительность импульсов, выдаваемая блоком генерации и используемая во всей работе, составляла 100 мкс, но с учетом дробления разряда при ЭИЛНЭ реально действующие разряды имели меньшую длительность. Так, медиана разрядов при ЭИЛНЭ составляла 28,2 мкс, поэтому расчеты проводились для $\tau = 30$ и 50 мкс. Расчеты показали, что наибольшие объемы расплава наблюдались у алюминия и цинка, а наименьшие – у молибдена и вольфрама (табл. 5), что согласуется с данными табл. 4. Это свидетельствует о верном выборе подхода к построению ряда ЭЭС металлов при ЭИЛНЭ. На рис. 3 видно, что рассчитанная

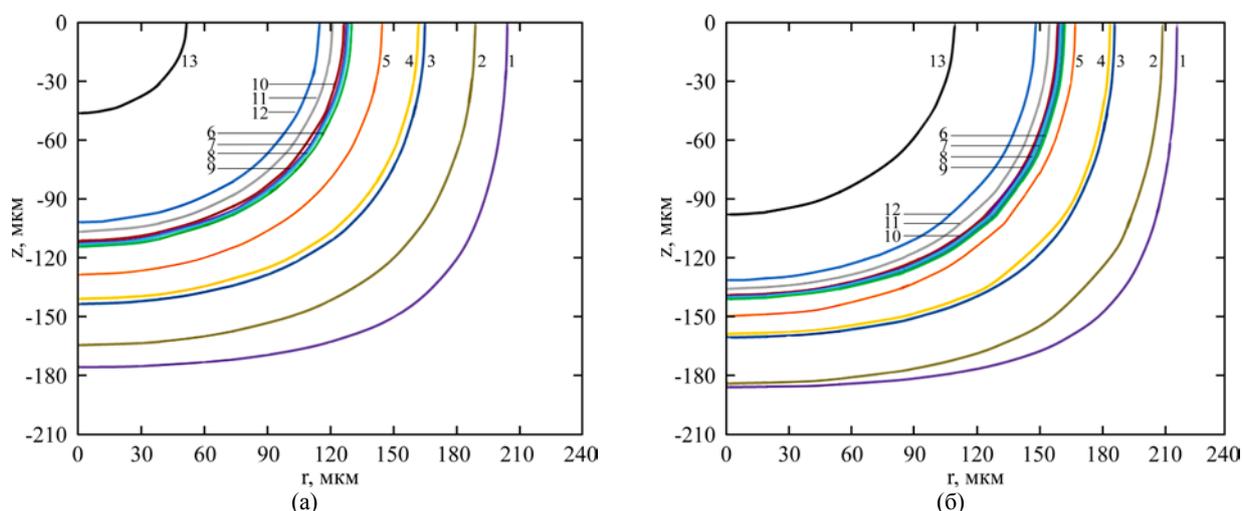


Рис. 3. Рассчитанные границы области плавления на аноде для различных металлов при длительности разрядов: (а) 30 и (б) 50 мкс. 1 – Zn; 2 – Al; 3 – Zr; 4 – Ti; 5 – Cu; 6 – V; 7 – Fe; 8 – Nb; 9 – Co; 10 – Ni; 11 – Cr; 12 – Mo; 13 – W.

Таблица 5. Рассчитанные объемы расплава металлов за один разряд

Объем расплава $\times 10^{12}$, м ³		
Элемент	Длительность, мкс	
	30	50
W	0,262	0,214
Mo	2,903	6,517
Cr	3,407	7,410
Ni	3,919	7,998
Co	3,978	7,993
Nb	4,136	8,176
Fe	4,267	8,335
V	4,273	8,339
Cu	5,966	9,395
Ti	8,469	12,800
Zr	9,077	13,281
Al	13,900	19,615
Zn	18,49	22,254

Таблица 6. Расхождение рядов ЭЭС металлов, согласно литературным данным

Металлы												δ	Источник
модель	Zn	Ti	Zr	V	Nb	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W		
эксперимент	Zn	Ni	Co	Fe	Zr	Ti	V	Nb	Cr	Mo	W	2,18	[4]
модель	Sn	Al	Ag	Cu	Ti	Fe	Mo	W	–	–	–	2,5	[17]
эксперимент	Ag	Sn	W	Mo	Cu	Fe	Al	Ti	–	–	–		

форма области плавления близка к полусфере, то есть отношение радиуса к глубине (r/z) находилось в диапазоне от 1,13 до 1,3 для разных металлов. Для реальных эрозионных лунок при ЭИЛ это отношение значительно больше – от 3,3 до 5,6 [4]. Такое несоответствие также может объясняться миграционной теорией, где тонкий и мощный канал разряда быстро перемещается в пределах эрозионной зоны электрода, вызывая приповерхностное оплавление металла на периферии (эрозионная зона или зона очистки) и объемное неглубокое плавление металла в центральной области. Это объясняет линзовидную форму микрованны расплава при

ЭИЛ, где $r \gg z$. Следует отметить, что рассредоточение теплового источника – т.н. плоский источник тепла – не позволяет значительно повысить отношение r/z при решении задач теплопроводности применительно к ЭИЛ.

Сравнение рассчитанных объемов плавления металлов (табл. 5) с экспериментальными данными (табл. 4) показало, что вычисленные объемы плавления на два порядка величин выше, чем в эксперименте. Это можно объяснить тем, что в эксперименте эрозии подвергалась только часть расплавленного металла, тогда как большая его часть оставалась на электроде. При этом часть эродированного материала внедря-

лась в поверхность других гранул. Если обозначить расплавленный металл за один разряд V_i , то верно выражение:

$$\Sigma V_i \gg \Sigma V_e, \quad (10)$$

где ΣV_e – суммарная эрозия за все время эксперимента. Иными словами, в больших последовательностях разрядов плавится значительный объем ранее расплавленного и застывшего металла. Тем не менее справедливо предположить, что объем эродированного материала пропорционален объему расплавленного материала.

Сравнение положения металлов в обоих рядах ЭЭС указывает на хорошее совпадение. Так, Zn, Al, Zr и Ti показали наименьшую стойкость, тогда как W и Mo – наибольшую в эксперименте и расчете. Вместе с тем медь в расчетах показала слабую ЭЭС, тогда как в эксперименте она стоит на втором месте по ЭЭС. Ряд ЭЭС металлов, полученных из данных по эрозии гранул при ЭИЛНЭ и вычисленных по объемам плавления металлов из расчета стационарного теплового поля на поверхности электродов, был проверен на расхождение (δ) по формуле:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N |N_{ie} - N_{im}|}{N}, \quad (11)$$

где N – количество металлов в сверяемых рядах; N_{ie} – порядковый номер металла в экспериментальном ряду, разложенном в порядке возрастания ЭЭС; N_{im} – порядковый номер металла в теоретическом ряду в порядке возрастания ЭЭС. Вычисленное расхождение составило 1,38, что можно охарактеризовать как хорошее соответствие двух рядов.

Было проведено сравнение расхождения разработанного ряда ЭЭС с расхождением рядов из литературных данных, в которых сопоставлялись модели с экспериментом из табл. 6. Сопоставление показало, что предложенная модель имеет меньшее расхождение по сравнению с ранее предложенными данными.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые проведен эксперимент по электрической эрозии 13 металлов: Zn, Al, Zr, Ti, V, Fe, Ni, Co, Cr, Nb, Mo, Cu, W, взятых в равных мольных соотношениях и находящихся в одинаковых условиях электроискрового воздействия в рамках одной АС при ЭИЛНЭ стали 35. Построена кинетика эрозии данных металлов, на основании которой разработан экспериментальный ряд ЭЭС металлов в условиях ЭИЛНЭ в аргоне. Разработана математическая модель расчета объема расплава

металлов в условиях электрического разряда при ЭИЛНЭ на основе решения задачи теплового поля на электродах с использованием их теплофизических констант. Мощность теплового потока вычислялась на основе функции мощности разряда от времени, полученной из осциллографии разряда при ЭИЛНЭ. Расчет для широкой линейки металлов, сильно отличающихся по теплофизическим свойствам, позволил заключить, что действующий источник тепла при разряде на порядок величин уже, чем эрозионная зона, и на три порядка мощнее, чем это предполагалось ранее. Рассчитаны объемы плавления на металлах за один разряд и построен соответствующий ряд ЭЭС металлов. Показано, что разработанный теоретический ряд ЭЭС металлов лучше соответствует экспериментальным данным по сравнению с литературными данными.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01108-23-02 (тема № 123020700174-7 «Создание и исследование новых металлических, керамических, интерметаллидных композиционных материалов и наноструктурных покрытий с высокими физико-химическими и эксплуатационными свойствами»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б.Н., Гиоев, К.Х., Роль факелов импульсного разряда в передаче энергии и эрозии электродов, *Физические основы электроискровой обработки материалов*. М.: Наука, 1966, с. 16.
2. Миткевич, С.П., Исследование поверхностного слоя армко-железа, полученного после электроискрового упрочнения, *Научные труды ФТИ АН БССР*, вып. 1. Минск: Изд-во АН БССР, 1954, с. 146.
3. Волченкова, Р.А., Связь между теплосодержанием и физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов, *ЭОМ*, 1973, № 4, с. 58.
4. Палатник, Л.С., Левченко, А.А., О характере электрической эрозии на монокристаллах, *Кристаллография*, 1958, № 5, с. 612.
5. Лазаренко, Н.И., Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей, *ЭОМ*, 1967, № 5, с. 24.
6. Альбински, К., Исследования электроэрозионной устойчивости рабочих электродов при

- электроискровой и электроимпульсной обработке, *Станки и инструменты*, 1964, № 7, с. 11.
7. Самсонов, Г.В., Верхотуров, А.Д., Бовкун, Г.А., Сычёв, В.С., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*, Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.
 8. Burkov, A.A., Kulik, M.A., Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr₇C₃ obtained by electric spark deposition, *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.*, 2020, vol. 56, no. 6, p. 1217. <https://doi.org/10.1134/S2070205120060064>
 9. Кочетова, И.В., Теоретическое решение уравнения распределения температуры в материале катода при ЭИЛ, *Ученые заметки ТОГУ*, 2016, т. 7, № 4-1, с. 847.
 10. Abbas, N.M., Solomon, D.G. and Bahari, M.F., A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM), *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2007, vol. 47, nos. 7–8, p. 1214.
 11. Агеева, Е.В., Булычев, В.В., Расчетная оценка влияния электроконтактного теплового источника на процесс электроэрозионного диспергирования, *Изв. Юго-Западного госуд. Унив. Серия: Техника и технологии*, 2019, т. 9, № 1, с. 29.
 12. Kunieda, M., Advancing EDM through fundamental insight into the process, *CIRP annals*, 2005, vol. 54, no. 2, p. 64.
 13. Пячин, С.А., Бурков, А.А., Каминский, О.И., Зайкова, Е.Р., Плавление титанового сплава под действием электрических разрядов различной длительности, *Изв. Вузов. Физика*, 2018, т. 61, № 12, с. 83.
 14. Yeо, S.H., Kurnia, W. and Tan, P.C., Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, no. 8, p. 2513.
 15. Пячин, С.А., *Массоперенос и фазово-структурные изменения в поверхностных слоях металлов при воздействии электрических разрядов*. Дисс. Докт. Физ.-мат. Наук. Хабаровск, 2017. 268 с.
 16. Некрашевич, И.Г., Бакуто, И.А., Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде, *Сб. Научных трудов ФТИ АН БССР*, вып. 6. Минск: Изд-во АН БССР, 1960, с. 193.
 17. Куляпин, В.М., Эрозия металлов под воздействием электрических разрядов, *Электрические контакты и электроды: труды Ин-та проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины*. Серия «Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия». Киев, 2010, с. 74.

Summary

The electrical erosion of Zn, Al, Zr, Ti, V, Fe, Ni, Co, Cr, Nb, Mo, Cu, and W was experimentally determined. For the first time a mixture of granules of the listed metals, taken in equal molar ratios, was used that acted as a non-localized electrode for the electric spark deposition of steel 35. A mathematical model is proposed so as to calculate the volume of molten metals under conditions of an electric discharge during electric spark deposition based on solving the problem of the thermal field on the electrodes using their thermophysical constants. Calculations for a wide range of metals that differ greatly in thermophysical properties allowed to conclude that the active heat source during a discharge is an order of magnitude narrower than the erosion zone and three orders of magnitude more powerful than previously theoretically assumed. The volumes of melting on metals per one discharge were calculated and the corresponding series of electrical erosion resistance of metals was constructed. It is shown that the developed theoretical series of electrical erosion resistance of metals better corresponds to experimental data in comparison with literature data.

Keywords: electric spark deposition, electroerosion series of metals, electrical erosion, thermal conductivity equation, mathematical modeling