

Эрозия металлов под воздействием электрических разрядов

В. М. Куляпин

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия

Совершенствование электротехнических комплексов и систем, как правило, сопровождается широким применением плазменных источников электронов и ионов различных видов разрядов (дуга, тлеющий разряд, полый катод и т. д.). Изложены результаты исследований взаимосвязанных теплофизических и эмиссионных процессов.

Ключевые слова: скорость эрозии катода, паровая, жидкая фаза, количество электричества, эксперимент.

Дуговые разряды электротехнических комплексов

Значительное внимание при исследовании электрических разрядов [1, 2] следует уделить катодным процессам по следующим причинам: малая область катодного потенциала; хорошо разработана теория термоавтоэлектронной эмиссии; имеется решение задачи нестационарной теплопроводности с фазовыми превращениями и уносом массы испарением.

В настоящей работе рассмотрены процессы получения паров металла с помощью вакуумной дуги. Источник паров, ионного и электронного тока — катодные процессы.

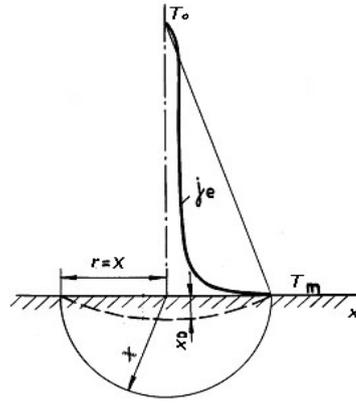
Среди большого количества методов ионизации наибольшее распространение получили ионизация атомов щелочных металлов на нагретых поверхностях (контактная ионизация) и ионизация атомов электронным ударом. Например, поверхностная ионизация на вольфраме возможна для атомов цезия, калия, рубидия, у которых потенциал ионизации меньше работы выхода вольфрама, и практически невозможна для других элементов. Для материалов с высоким потенциалом ионизации используется принцип ионизации электронным ударом. Паровая фаза поступает в камеру, проходит через пространство между термоавтоэмиссионным катодом и анодом. В этой зоне под действием радиального электрического поля движутся свободные электроны, в результате соударений которых с атомами происходит ионизация. Образовавшиеся вторичные электроны разгоняются в поле ионизационной камеры и участвуют в ионизации атомов, а ионы диффундируют в сторону ускоряющего электрода. Поле ускоряющего электрода вытягивает ионы из камеры и ускоряет их в промежутке между катодом и анодом.

Во избежание выхода в ускоряющий промежуток нейтральных атомов давление рабочего тела в камере должно быть низким — порядка 10^{-4} мм рт. ст. (10 Па). Коэффициент ударной ионизации $\beta_i = 0,8—0,85$.

Скорость электрической эрозии

Проведенные исследования микроскопических процессов в элементарном катодном пятне позволяют рассчитать другие параметры электри-

Рис. 1. Пространственное распределение температуры в точке привязки разряда на катоде.



ческих разрядов: скорость электрической эрозии и скорость самопроизвольного хаотического перемещения катодных пятен. В основу анализа взяты положения количественной теории катодных процессов [3].

1. Плотность распределения вероятностей продолжительности существования пятна определяется функцией

$$g(\bar{t}_b) = 0,1/\bar{t}_b$$

со средним значением $t_{bmid} = 0,2$ в относительных единицах. В секундах —

$$t_{bmid} = \frac{0,2\lambda(T_0 - T_m)[L_0 + c(T_0 - T_m)]\rho}{q_0^2} \left[1 + \frac{L_0 + c(T_0 - T_m)}{L + c(T_m - T)}\right], \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала катода; T_0 , T_m — температура поверхности и плавления соответственно; L_0 , L — теплота парообразования и плавления; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность.

2. Объемный источник резистивного нагрева методом конформных отображений преобразован в поверхностный. Тепловой поток на поверхности $q_0 = q_i - q_e$, плотность тока $j_0 = j_i + j_e$ и температура постоянны по всему сечению катодного пятна.

3. Эрозионный след представляет сферическую лунку (рис. 1). Радиус пятна равен глубине плавления металла в момент распада $r = X(\bar{t}_b)$. При распаде элементарного пятна с катода удаляется весь расплавленный металл.

4. Паровая фаза эродированного вещества определяется объемом шарового сегмента с хордой, равной величине перемещения поверхности испарения катодного пятна к моменту распада $X_0(\bar{t}_b)$.

5. После распада пятна разряд перемещается в близлежащую точку, находящуюся на расстоянии двух радиусов элементарного катодного пятна. При распаде катодных пятен часть металла остается на катоде, поэтому расчетные значения скорости эрозии будут несколько завышены. В то же время пренебрежение влиянием внешних сил на перемещение катодного пятна должно привести к получению заниженных скоростей самопроизвольного перемещения разряда по поверхности катода. Поскольку внешние условия разряда не учитываются, результаты расчета непосредственно применимы к вакуумным разрядам.

Плотность распределения вероятности радиуса катодного пятна $g(r) = 0,2/g$, средний радиус равен

$$r_{mid} = \frac{0,7\lambda(T_0 - T_m)}{q_0} \cdot \frac{L_0 + c(T_0 - T_m)}{L + c(T_m - T)}. \quad (2)$$

Масса металла, удаляемая с электрода при распаде элементарного катодного пятна, равна $\Delta m = 2\pi r^3 / 3$ мг. В единицу времени происходит $1/t_b$ актов распада, тогда скорость эрозии катода (г/с) равна $m' = 2\pi r^3 / 3t_b$. Плотность распределения вероятности скорости электрической эрозии $g(m') = 0,2/m'$.

Средняя скорость эрозии

$$m' = 34\pi \frac{q_o^3 \cdot t_{b\text{mid}}^2}{\rho^2 [L_o + L + c(T_o - T)]^3}. \quad (3)$$

Скорость испарения катода

Аналогично получаем соотношение для скорости эрозии катода в паровой фазе. Масса металла, испарившегося с поверхности элементарного катодного пятна за время $t = t_{b\text{mid}}$,

$$h_b(t) = \frac{0,2\lambda_1(T_o - T_m)}{q_o} \left[\frac{L_o + c(T_o - T_m)}{L + c(T_m - T)} - 2,5 \right]. \quad (4)$$

Средняя скорость эрозии катода в паровой фазе равна

$$m'_o = 13,7\pi \frac{q_o^3 \cdot t_{b\text{mid}}^2}{\rho [L + L_o + c(T_o - T)]^3} \left\{ 1 - \frac{2,5[L + c(T_m - T)]}{L_o + c(T_o - T_m)} \right\}. \quad (5)$$

Скорость электрической эрозии в жидкой фазе

$$m'_l = 34\pi \frac{q_o^3 \cdot t_{b\text{mid}}^2}{\rho [L + L_o + c(T_o - T)]^3} \left\{ 0,6 + 2,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_o + c(T_o - T_m)} \right] \right\}. \quad (6)$$

Доля паровой фазы в общем количестве эродированного материала составляет

$$\frac{m'_o}{m'} = 0,405 \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_o + c(T_o - T_m)} \right] \right\}. \quad (7)$$

Для различных металлов соотношение между ионной и электронной составляющими тока в катодном пятне изменяется незначительно и находится в пределах $\psi = J_i / J_e = 0,25$. Это позволяет установить соотношение для электрической эрозии в функции количества электричества, перенесенного разрядом. Ток на одно катодное пятно определяется уравнением

$$I_p = \pi r^2 j,$$

где $j = j_i + j_e$ — плотность тока в катодном пятне.

Тогда масса эродированного металла на единицу количества электричества равна

$$M' = m' / I_p = 2\rho r / 3jt_b. \quad (8)$$

Вводя выражения для r_{mid} и $t_{b\text{mid}}$, получаем соотношение для средней скорости электрической эрозии на единицу количества электричества (г/Кл)

$$M' = \frac{2,5q_o}{[L_o + L + c(T_o - T)]}. \quad (9)$$

Скорость эрозии в паровой фазе

$$M'_0 = \frac{q_0}{[L_0 + L + c(T_0 - T)]} \left\{ 0,8 - 0,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\}. \quad (10)$$

Скорость эрозии в жидкой фазе

$$M'_i = \frac{2,5q_0}{[L_0 + L + c(T_0 - T)]} \left\{ 0,8 - 0,5 \left[\frac{L + c(T_m - T)}{L_0 + c(T_0 - T_m)} \right] \right\}. \quad (11)$$

Из анализа полученных соотношений следует, что электрическая эрозия носит тепловой характер и определяется величиной энергии, передаваемой разрядом металлу. Основным источником энергии является энергия бомбардировки катода ионным током. Как следует из решения уравнения баланса энергии, на теплофизические процессы расходуется лишь часть энергии, поступающей на катод при бомбардировке поверхности ионным током $j_i U_k$. Примерно половина энергии отводится термоэмиссией электронов, так что отношение q_0/j находится в пределах 1,05—3,35.

Эрозионные ряды

Учитывая, что соотношение между тепловым потоком в электроде ($q_i - q_e$) и плотностью тока изменяется в ограниченных пределах, можно скорость эрозии определять на единицу количества электричества. Скорость эрозии обратно пропорциональна сумме приращения энтальпий фазовых превращений и затрат энергии на нагрев металла до температуры T_0 . При проведении расчетов можно принять за T_0 температуру кипения металла. Расчетные эрозионные ряды для металлов периодической системы представлены в табл. 1—3, где указаны относительные коэффициенты объемной скорости эрозии, скорости эрозии в единицу времени и массовой скорости эрозии. При построении полного эрозионного ряда отношение воздействующего теплового потока к плотности тока принято постоянным и равным $q_0/j = 1,8$.

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения относительных коэффициентов объемной скорости эрозии V'_q (10^{-4} см³/ Кл)

Металл	V'_q	Металл	V'_q	Металл	V'_q	Металл	V'_q
Cs	33,5	Tl	4,05	Ge	1,23	V	0,8
Rb	31,7	Sr	4,0	Au	1,13	Fe	0,77
K	23,7	Cd	3,95	U	1,11	Pt	0,76
Li	15,8	Mg	3,95	Ga	1,1	Hf	0,706
Hg	14,78	Sb	3,8	C	0,95	Co	0,65
Na	10,1	In	3,0	Zr	0,93	Ni	0,61
Bi	4,9	Zn	3,0	B	0,92	Nb	0,61
Ba	4,9	Sn	2,97	Cu	0,92	Ta	0,75
Pb	4,3	Al	1,82	Ti	0,88	Mo	0,55
Te	4,1	Ag	1,81	Cr	0,84	Re	0,53
Li	4,07	Mn	1,32	Be	0,83	W	0,41

Т а б л и ц а 2. Расчетные скорости электрической эрозии в единицу времени V'_t (см³/с)

Металл	V'_t	Металл	V'_t	Металл	V'_t	Металл	V'_t
Cs	$1,35 \cdot 10^3$	Cd	1,456	Mn	0,055	Pt	0,01
Rb	765	In	0,645	Au	0,034	Ni	0,009
K	319	Zn	0,645	Zr	0,019	V	0,008
Hg	231	Mg	0,63	Cu	0,018	Co	0,007
Na	24,2	Sn	0,183	B	0,017	Mo	0,006
Bi	2,72	Tl	0,156	Ti	0,016	Nb	0,005
Pb	1,675	Ga	0,151	Cr	0,014	Ta	0,004
Te	1,6	Al	0,102	Be	0,013	Re	0,0035
Li	1,6	Ag	0,1	Fe	0,01	W	0,0017

Т а б л и ц а 3. Расчетные значения массовой скорости эрозии m' (г/с)

Металл	m'	Металл	m'	Металл	m'	Металл	m'
Hg	$3,16 \cdot 10^3$	Te	10,2	Mn	0,396	Re	0,073
Cs	$2,25 \cdot 10^3$	Li	5,26	Al	0,274	Ta	0,065
Rb	$1,17 \cdot 10^3$	In	4,69	Pt	0,228	Co	0,063
K	278	Zn	4,6	Cu	0,165	V	0,049
Bi	26,6	Sn	1,34	Zr	0,123	Nb	0,046
Na	23,5	Mg	1,09	Cr	0,102	Mo	0,041
Pb	19	Ag	1,05	Ni	0,083	B	0,033
Tl	18,5	Ga	0,901	Fe	0,083	W	0,031
Cd	12,6	Au	0,658	Ti	0,074	Be	0,025

Т а б л и ц а 4. Скорость электрической эрозии, рассчитанная по (9)

Металл	$\rho \cdot 10^6$, кг/м ³	$L_0 + L + c(T_0 - T)$, кДж/кг	$q \cdot 10^{10}$, Вт/м ²	$t_{bmid} \cdot 10^{-5}$, с	$m' \cdot 10^{-3}$, г/с	
					расчет	экспер.
Ag	10,5	22665	3,4	1,96	770	–
Cu	8,9	5390	1,03	5,36	270	165
Fe	7,8	7510	2,41	2,7	42	48
Ni	7,8	8280	3,22	0,94	75	75

Уравнения (9)–(11) устанавливают общие соотношения в функции теплофизических постоянных материала катода и позволяют непосредственно рассчитать скорость электрической эрозии. В табл. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме. Величины q_0 и t_{bmid} взяты из расчета баланса энергии на катоде. Соответствие рассчитанных и экспериментальных значений скорости эрозии удовлетворительное.

Расчет скорости эрозии по формулам (3) и (6) затруднителен, поскольку для определения q_0 и t_{bmid} необходимо решить уравнение теплового баланса на катоде. Кроме того, незначительные ошибки в

определении плотности теплового потока и длительности существования катодного пятна приводят к большим ошибкам в определении скорости эрозии. Однако выражение (6) можно использовать для оценки эрозионной стойкости различных материалов в данных условиях разряда на основании экспериментов для одного металла. Например, для меди экспериментальное значение $m'_{Cu} = 0,165$ г/с.

Из уравнения (6) имеем

$$q_0^3 \cdot t_{bmid} = \frac{m_{Cu} \rho^2 [L_0 + L + c(T_0 - T)]^3}{34\pi} = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{Вт}^3 \cdot \text{с}^2}{\text{см}^6}. \quad (12)$$

Тогда для различных металлов скорость электрической эрозии в данных условиях разряда равна

$$m' = 34\pi \frac{2 \cdot 10^{10}}{\rho^2 [L_0 + L + c(T_0 - T)]^3}. \quad (13)$$

Результаты расчетов по уравнению (12) и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме приведены в табл. 2, 5. Из табл. 5 следует, что соответствие расчета и эксперимента удовлетворительное. Как следует из уравнений (3)—(4), масса металла, эродированного на единицу количества электричества, пропорциональна величине воздействующего теплового потока и обратно пропорциональна приращению энтальпии фазовых превращений. Известно, что основная масса металла эродирует в жидкой фазе, а определяющим параметром в уравнении является скрытая теплота парообразования. Кажущееся противоречие объясняется тем, что и расплавленная зона металла определяется энергией поверхностного источника, которая распределяется пропорционально теплофизическим постоянным материала. Большая часть энергии идет на испарение, а остальная расходуется на плавление металла и теплопередачу в электрод. В табл. 6 приведены результаты расчетов по (8) и экспериментальные значения скорости эрозии в вакууме. Для Ag, Cu, Fe значения j , q_0 взяты из расчетов, приведенных в работах [3, 4]. Эти расчеты скорости электрической эрозии различных металлов проведены без определения плотности теплового потока и плотности тока в катодном пятне.

Как следует из результатов сравнения, соответствие расчета и экспериментов удовлетворительное, лишь для серебра расчетное значение превышает экспериментальное значение скорости эрозии. В зависимости от внешних условий сильно изменяется и скорость электрической эрозии. На рис. 2 приведены экспериментальные значения скорости электрической эрозии при изменении давления от атмосферного до 10^{-4} Па.

Как следует из приведенных результатов экспериментов, снижение давления приводит к значительному увеличению скорости эрозии. При снижении давления до 10^{-4} Па ско-

Т а б л и ц а 5. Рассчитанные по (12) и экспериментальные данные скорости эрозии в вакууме

Металл	$m' \cdot 10^{-3}$, г/с	
	расчет	эксперимент
Молибден	22,1	21
Ниобий	25,4	30
Железо	42	48
Никель	41,5	75

Т а б л и ц а 6. Рассчитанные по (8) и экспериментальные данные скорости эрозии в вакууме

Металл	$M' \cdot 10^{-4}, \text{ г/Кл}$			
	расчет	эксперимент		среднее
		максимум	минимум	
Олово	10	12	5,3	8
Алюминий	4,4	11	5,0	9,5
Серебро	15,2	6,0	4,2	5,0
Медь	4,8	6,7	1,3	3,0
Железо	4,5	6,0	1,8	3,0
Титан	4,0	3,5	0,9	2,1
Молибден	5,8	2,7	1,5	2,0
Вольфрам	7,9	5,3	1,2	3,6

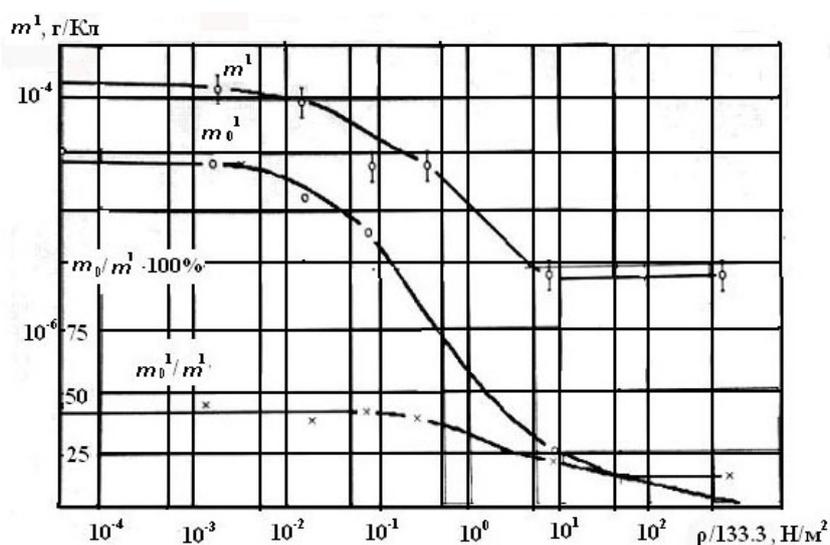


Рис. 2. Скорость электрической эрозии в зависимости от давления.

рость электрической эрозии увеличивается в 14 раз, доля паровой фазы возрастает до 35%.

Выводы

Установлено, что неустойчивость катодных процессов определяется микропроцессами в элементарном катодном пятне, перегревом и распадом точки привязки разряда.

Определены мгновенные и средние значения параметров области катодного падения потенциала: скорости электрической эрозии, скорости самопроизвольного перемещения разряда, частоты колебаний потенциала.

Рассчитаны эрозионные ряды для сорока четырех элементов периодической таблицы.

1. Месяц Г. А. Электронная эмиссия из сегнетоэлектрических плазменных катодов // Успехи физ. наук. — 2008. — 178, № 1. — С. 86—108.

2. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физ. наук. — 2005. — 175, № 2. — С. 225—245.
3. Куляпин В. М. Теоретические основы проектирования электрических систем зажигания: (Учебное пособие). — Уфа: изд-во УАИ, 1985. — 92 с.
4. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука, 1968. — С. 1—244.

Ерозія металів під впливом електричних розрядів

В. М. Куляпін

Удосконалення електротехнічних комплексів та систем часто супроводжується широким застосуванням плазмових джерел електронів та йонів різних видів розрядів (дуга, тліючий розряд, полий катод та ін.). Викладено результати досліджень взаємопов'язаних теплофізичних та емісійних процесів.

Ключові слова: швидкість ерозії катода, парова, рідка фаза, кількість електрики, експеримент.

Metal erosion from electric discharge

V. M. Kulyapin

Improvement of electrotechnical complexes and systems is often accompanied by a wide use of electrons and ions of different dischargers (arc, glow discharge, hollow cathode, etc) as a plasma source. Development of a theory of complex interconnected processes of thermionic emission as well as problems of non-standard heat conductivity with phase transformations and ablation due to evaporation are becoming increasingly important. All these processes occur in the potential drop region of high power concentration. The paper considers the processes of obtaining metal vapor with the help of electric discharges. Calculated erosion series rates that include relative coefficients of erosion bulk velocity (cm^3/K), velocity of erosion per time unit (cm^3/s) and mass of erosion velocity (g/s) were constructed.

Keywords: rate of cathode erosion, vapour phase, liquid phase, quantity of electricity, experiment.