

04;12

©1993 г.

## О ПАРАМЕТРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ ДУГ НА КАТОДАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В.П.Полщук, О.К.Сердюкова, И.М.Ярцев*

На основе известных опытных данных анализируется вопрос о влиянии свойств катодного материала на характеристики вакуумных дуг с контрагированными катодными пятнами. В качестве характеристик использовались напряжение горения дуги, вольтов эквивалент теплового потока в катод, удельная эрозия катода, средние значения времени горения дуги, числа катодных пятен и тока на пятно, критический ток возникновения дуги при разведении контактов, кинетическая энергия направленного движения и средний заряд ионов в плазме. Показано, что в целом все указанные характеристики монотонно и качественно одинаково зависят от безразмерного атом-электронного отношения, представляющего собой отношение потока испаренных с катода атомов к потоку электронов термоэмиссии.

В данной работе рассматриваются вакуумные дуги (ВД) с контрагированными катодными пятнами, горящие в парах катода. В этих дугах можно использовать катоды из всех электропроводящих элементов периодической таблицы (металлы, полупроводники, полуметаллы). Как известно [1,2], характеристики вакуумной дуги во многом определяются процессами в узкой прикатодной области разряда, хвключающей и собственно поверхность катода. Именно на эту область приходится обычно основное тепловыделение в разряде. Поэтому на характеристики ВД должны влиять свойства катодного материала.

Из-за сложности теоретического описания процессов в ВД основную информацию об этом влиянии до сих пор дают экспериментальные исследования. На основе анализа опытных данных в работах [3-5] в качестве параметров, определяющих некоторые характеристики ВД на различных катодах, использовались комплексы вида  $\Pi_i = T_b \lambda^{\mu_i}$ , где  $T_b$  и  $\lambda$  — температура кипения и коэффициент теплопроводности катодного материала,  $\mu_i$  — константа. Параметры  $\Pi_i$  являются размерными, причем значение показателя  $\mu_i$  зависит от рассматриваемой характеристики вакуумной дуги. Для критического тока возникновения дуги при разведении контактов  $\mu_i = 0.5$  [3], для напряжения горения  $\mu_i = 1$  [4], для среднего заряда ионов в плазме  $\mu_i = 0$  [5]. Влияние параметров  $\Pi_i$  на другие характеристики ВД в [3-5] не рассматривалось.

На основе рассмотрения процессов при предполагаемом взрывообразном разрушении катода в области элементарного катодного пятна в [6]

выделены 2 размерных параметра:  $\Pi_1 = \left(\frac{\epsilon_i \epsilon_{исп}}{C^2}\right)^{1/2}$  и  $\Pi_2 = \frac{T_0}{(CT_{исп})}$ . Здесь  $\epsilon_{исп}$  и  $C$  — теплота испарения и теплоемкость катодного материала. Конкретный смысл характерных температур  $T_0$  и  $T_{исп}$ , а также полной энергии ионов плазмы  $\epsilon_i$  в [6] не приведен. Согласно [6], параметр  $\Pi_1$  должен влиять на напряжение горения дуги, а параметр  $\Pi_2$  — на удельную эрозию катода. Характер этого влияния в [6] не обсуждается.

В данной работе в качестве определяющего параметра использовалось введенное в [7] безразмерное атом-электронное отношение, т.е. отношение потока испаренных с катода атомов  $\Gamma_a$  к потоку электронов термоэмиссии  $\Gamma_{ет}$ ,

$$\xi = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_{ет}} = \frac{P \cdot e}{\sqrt{2\pi k T m}} / A_0 \cdot T^2 \exp(-\varphi/kT), \quad (1)$$

где  $P$  — давление насыщенного пара материала катода при температуре  $T$ ,  $m$  — масса испаренного атома,  $A_0$  — эмиссионная постоянная,  $\varphi$  — работа выхода материала катода,  $e$  — заряд электрона.

Параметр  $\xi$  характеризует прежде всего процессы массо- и электропроцесса в прикатодной области вакуумной дуги. Кроме этого, эта величина представляет собой верхнюю оценку для отношения  $S_i$  ионного потока к электронному на катоде. Действительно, плотность потока ионов на катод  $\Gamma_i$  ограничена величиной  $\Gamma_a$  ( $\Gamma_i < \Gamma_a$ ), а электронный поток на катоде  $\Gamma_e$  в случае, если нет задерживающего поля и диффузионного потока из плазмы, не меньше потока термоэмиссии, т.е.  $\Gamma_{ет} \leq \Gamma_e$ . Поэтому  $\xi = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_{ет}} > S_i$ .

При расчете параметра  $\xi$  использовались данные о давлении  $P$  катодных материалов из [8-10] и о работе выхода — из [11]; полагалось также, что  $A_0 = 120 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ .

Температурные зависимости  $\xi$  для ряда катодных материалов представлены в [7]. В данной работе параметр  $\xi$  вычисляется при таком значении  $\Gamma_a$ , чтобы максимальная плотность ионного тока на катоде  $j_i = e\Gamma_a = 10^5 \text{ А/см}^2$ . Согласно [1,2], это значение  $j_i$  принадлежит диапазону возможных значений суммарной плотности тока на катоде ВД. Выбранная величина  $j_i$  достигается для разных веществ при значениях  $P = 0.1 - 1 \text{ МПа}$ . Как видно из данных в табл. 1, параметр  $\xi$  для разных катодных материалов (элементов) изменяется от  $10^{25}$  до  $10^{-2}$ . При этом для большинства материалов  $\xi < 10^3 - 10^4$ , а для обычных тугоплавких металлов ( $W$ ,  $T_a$ ,  $M_0$  и др.)  $\xi \ll 1$ .

В настоящее время имеется много опытных данных о характеристиках ВД на различных катодах, причем данные разных авторов могут отличаться друг от друга. В данной работе использовались результаты тех экспериментов, в которых охвачен достаточно широкий перечень катодных материалов (не менее пяти), а ток дуги  $I \leq 10^3 \text{ А}$ . При этих токах концентрации тока на аноде ВД обычно не происходит.

Зависимость некоторых характеристик ВД от параметра  $\xi$  представлена на рис. 1-7. Каждая точка на рисунках соответствует определенному катодному материалу. В качестве характеристик ВД использовались следующие величины: напряжение горения  $V_a$  и вольтов эквивалент теплового потока к катод  $V_c$  (рис. 1), удельная эрозия катода  $\kappa$  (рис. 2), характерные кинетические энергии направленного движения ионов в катодной струе  $W_i$  и  $\tilde{W}_i$  (рис. 3), среднее время жизни дуги  $\tau$  и среднее число

Таблица 1.

Элемент	$\xi$	Элемент	$\xi$
Hg	$7 \cdot 10^{25}$	Sn, Pd	$5 \cdot 10^1$
Cd	$8 \cdot 10^{12}$	Ni	$4 \cdot 10^1$
Zn	$5 \cdot 10^{11}$	C, Si, Sm	$3 \cdot 10^1$
Te	$2 \cdot 10^{10}$	Fe	$8 \cdot 10^0$
Mg	$9 \cdot 10^7$	Au, Er	$5 \cdot 10^0$
Bi, K	$3 \cdot 10^5$	Ba, Sc, Rh	$4 \cdot 10^0$
Na	$2 \cdot 10^5$	Ti	$2 \cdot 10^0$
Tl	$2 \cdot 10^4$	Ir	$5 \cdot 10^{-1}$
Ca	$3 \cdot 10^3$	La, Gd	$1 \cdot 10^{-1}$
Pb, Cs, Li	$2 \cdot 10^3$	Mo	$9 \cdot 10^{-2}$
Ag, Sb	$6 \cdot 10^2$	Nb	$8 \cdot 10^{-2}$
Cr	$4 \cdot 10^2$	Zr	$7 \cdot 10^{-2}$
Al, Mn	$3 \cdot 10^2$	W	$4 \cdot 10^{-2}$
In, Be	$2 \cdot 10^2$	Re	$3 \cdot 10^{-2}$
Cu, Pd	$1 \cdot 10^2$	Ta, Hf, U	$2 \cdot 10^{-2}$
		Th	$9 \cdot 10^{-3}$

катодных пятен  $N$  (рис. 4), средний ток на катодное пятно  $I_s$  (рис. 5), критический ток возникновения дуги при разведении контактов  $I_{cr}$  (рис. 6), среднюю кратность заряда ионов в катодной струе  $\bar{Z}_i$  (рис. 7). Отметим, что представленный на рис. 1 диапазон изменения  $V_a$  из [3] связан с изменением тока дуги от 10 до 100 А. На рис. 4 энергия  $W_i$  из [12] соответствует тому значению, при котором функция распределения ионов с кратностью заряда  $Z_i$  по энергии имеет максимум, а величина  $\bar{W}_i$  из [13], где разделение ионов по зарядовым состояниям не проводилось, представляет собой некоторую среднюю характерную энергию ионов.

Как видно из данных на рис. 1–7, все представленные характеристики ВД в целом монотонно изменяются при изменении параметра  $\xi$ . С ростом  $\xi$  величины  $V_a$  и  $V_c$ , определяющие общий энерговклад в разряд  $IV_a$  и тепловой поток в катод  $IV_c$ , уменьшаются в 2–3 раза, значения  $\kappa$  увеличиваются, а  $W_i$  уменьшаются в 10–15 раз. В наибольшей степени (до  $10^2 - 10^3$  раз) изменяются величины, характеризующие устойчивость горения дуги, т.е. время  $\tau$  и ток  $I_s$ . Таким образом, для катодов с малыми значениями  $\xi$  характерен наибольший энерговклад в разряд, а для катодов с большими  $\xi$  — наибольшие значения удельной эрозии  $\kappa$ .

Зависимость величин  $V_a$  и  $V_c$  от параметра  $\xi$  носит относительно слабый лагориформический характер. Интересно, что такой же характер имеют зависимости некоторых характеристик тлеющего разряда (например, прикатодного падения потенциала) от  $\gamma$  — коэффициента, представляющего собой отношение электронного тока к ионному на катоде. Отметим так же, что вид зависимостей всех величин на рис. 1–7 от параметра  $\xi$  качественно одинаков. При  $\xi < 10^3 - 10^4$  происходит основное изменение величины, при  $\xi > 10^{-3} - 10^{-4}$  эти величины стремятся к почти постоянным, не зависящим от  $\xi$  значениям. Это можно объяснить тем,

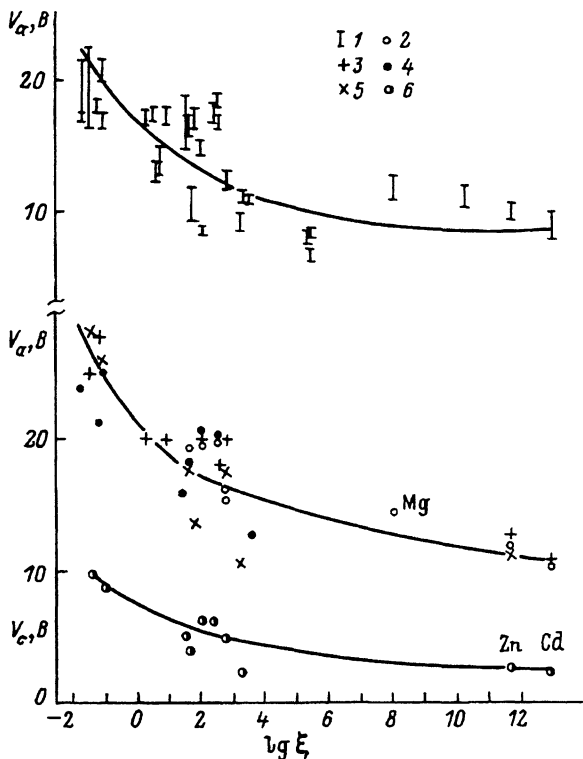


Рис. 1. Зависимость напряжения горения дуги  $V_a$  (1-5) и вольтова эквивалента теплового потока в катод  $V_c$  (6) от атом-электронного отношения. 1 — данные [16]; 2 — [13]; 3 — [17]; 4 — [12]; 5, 6 — [18].

что при  $\xi < 10^3 - 10^4$  важное значение в балансе токов на катоде имеет термоэлектронная эмиссия, усиленная воздействием электрического поля. При этом с ростом  $\xi$  может происходить переход от термоэлектронной эмиссии с эффектом Шоттки к термоавтоэлектронной эмиссии. Для катодов с  $\xi > 10^3 - 10^4$  термоэлектронная эмиссия, по-видимому, не играет заметной роли. Для таких катодов другие виды эмиссии, на-

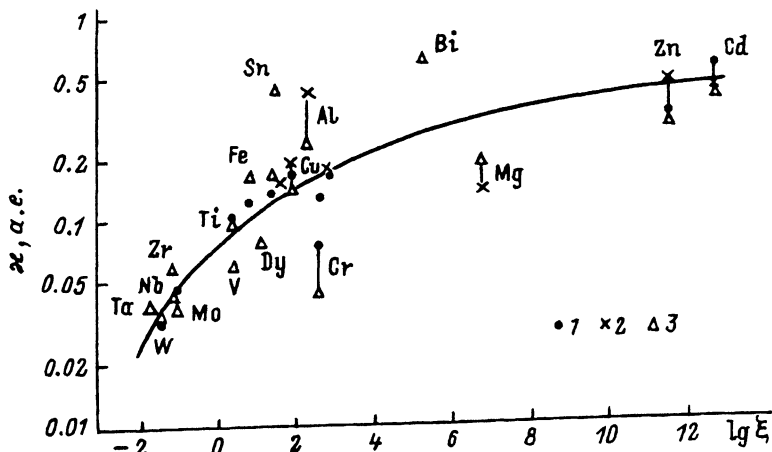


Рис. 2. Удельная эрозия катодов  $k$  по данным [13] (1), [17] (2), [19] (3).

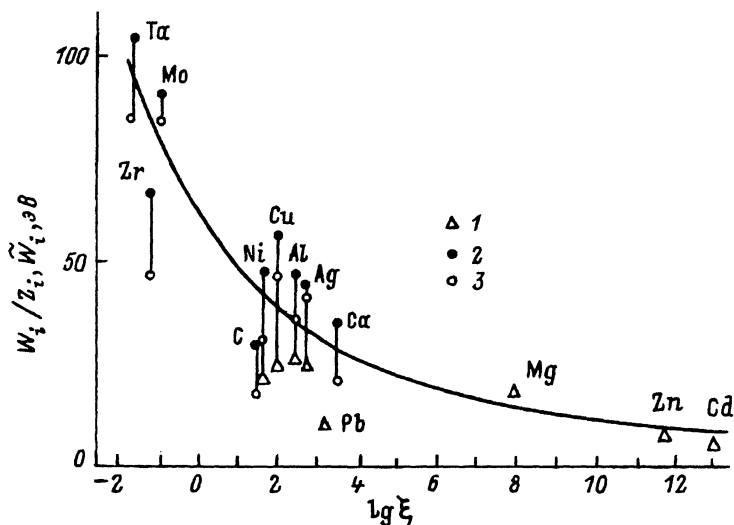


Рис. 3. Кинетическая энергия ионов  $\bar{W}_i$  из [13] (1) и относительная кинетическая энергия ионов  $W_i/Z_i$  из [12] для ионов с  $Z_i = 1 - 2$  (2) и с  $Z_i = 2 - 3$  (3).

пример, ион-электронная или  $\gamma$ -эмиссия могут существенно превышать термоэлектронную. В самом деле, величина  $1/\xi$  дает оценку отношения термоэлектронного тока к ионному на катоде. Если  $\gamma$ -коэффициент для ион-электронной эмиссии существенно превышает величину  $1/\xi$ , т.е. если  $\gamma \gg 1/\xi$ , то вкладом термоэмиссии можно пренебречь. При  $\xi = 10^3 - 10^4$  это должно наблюдаться уже при  $\gamma \geq 10^{-2} - 10^{-3}$ . Такие значения  $\gamma$  может дать потенциальная ион-электронная эмиссия при попадании на катод ионов  $Z_i \geq 1$ .

Отметим, что до настоящего времени существуют известные трудности для объяснения прикатодных процессов на катодах вакуумных дуг с

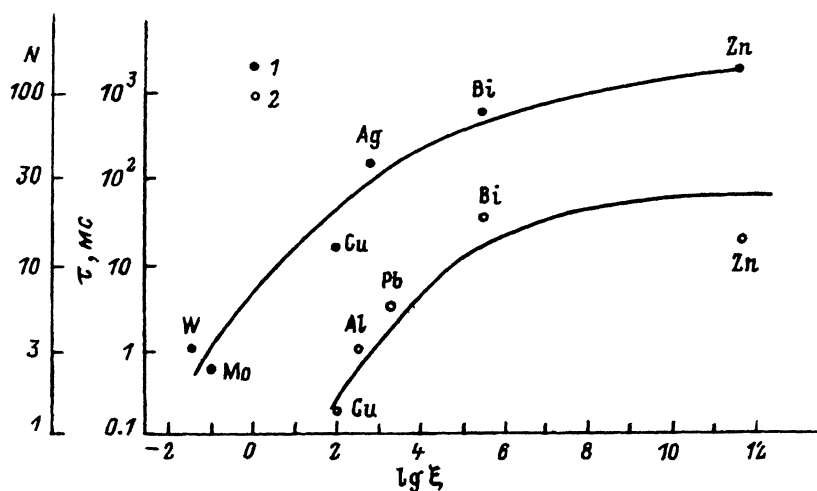


Рис. 4. Среднее время жизни дуги  $\tau$  при  $I = 10$  А по данным [20] (1) и среднее число катодных пятен  $N$ , при  $I = 100$  А по данным [2] (2).

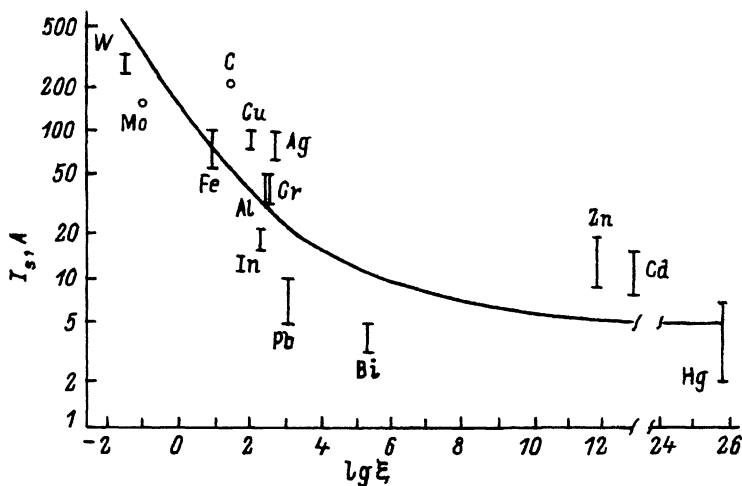


Рис. 5. Средний ток на одно катодное пятно  $I_s$  по данным [2].

$\xi \ll 1$  и с  $\xi > 10^3 - 10^4$ . Возможные механизмы этих процессов при  $\xi \ll 1$  обсуждаются в [14], а при  $\xi > 10^3 - 10^4$  — в [15].

Согласно данным на рис. 1–7, в ряде случаев наблюдается заметное отклонение измеренных характеристик дуг от монотонных зависимостей. Так, на рис. 2 данные по эрозии для катодов из Ст и Mg меньше, а для катодов из Sn, Al и Bi больше, чем для других элементов с близкими значениями  $\xi$ . При этом Ст и Mg имеют самое большое отношение температуры плавления  $T_m$  к температуре  $T_b$  ( $T_m/T_b > 0.67$ ), а Sn, Al, Bi — самое малое отношение ( $< 0.33$ ). Возможно, что это отношение необходимо учитывать при анализе данных по эрозии катодов. Если предположить, что температура катода в области катодного пятна близка к температуре  $T_b$ , то отношение  $T_m/T_b$  при прочих равных условиях характеризует размер зоны расплава в этой области. При указанных условиях с уменьшением  $T_m/T_b$  этот размер увеличивается и может возрасти эрозия катода в виде жидких частиц.

Значения  $\tilde{Z}_i$  для Li и C на рис. 7 существенно ниже значений, определяемых по монотонной зависимости. По-видимому, это связано с тем, что эти элементы имеют наибольшие вторые потенциалы ионизации  $V_2$  (для C  $V_2 = 24.4$  В, для Li  $V_2 = 75.6$  В). На рис. 6 не нанесены данные для Ст, Со, Ni. Для этих элементов по данным [3] значения  $I_{cr}$  составляют 2.5, 3.2 и 6 А соответственно, т.е. лежат выше, чем для других элементов. Эти, а также другие отклонения от монотонных зависимостей требуют дополнительного анализа, а возможно, и уточнения измерений. Заметим, что при использовании параметров  $\Pi_i$  в работах [3–5] также имеют место аналогичные, но в целом более существенные отклонения для ряда катодов.

Как уже отмечалось, параметр  $\xi$  в табл. 1 и на рис. 1–7 вычислялся при фиксированном значении  $j_i = 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Если варьировать это значение от  $10^4$  до  $10^6$  А/см<sup>2</sup>, то характер зависимостей свойств дуги от параметра  $\xi$  не изменяется. При этом вариация величины  $j_i$  вызывает наибольшие изменения  $\xi$  для элементов с  $\xi > 10^3 - 10^4$ . Но для этих элементов само влияние  $\xi$  на характеристики дуги является не очень существенным. Для

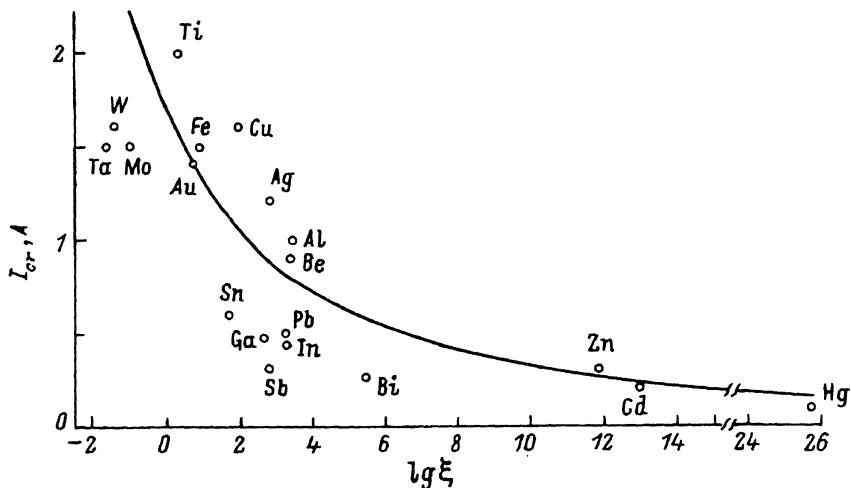


Рис. 6. Критический ток возникновения дуги  $I_{cr}$  по данным [3].

элементов же с  $\xi < 1$ , где наблюдается наибольшее влияние параметра  $x$ , этот параметр сравнительно слабо зависит от величины  $j_i$ . Так, для вольфрама изменение  $j_i$  от  $10^4$  до  $10^6$  А/см<sup>2</sup> приводит к изменению  $\xi$  от  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $8 \cdot 10^{-2}$ .

Можно получить эмпирические соотношения между представленными на рис. 1,2,4-7 величинами и значениями  $\xi$ . Для всех величин  $j_i$  эти соотношения записывались в следующем виде:

$$y_i = \alpha_i \exp(\beta_i x) + \delta_i, \quad (2)$$

где  $x = \lg \xi$ , а  $j_i$  последовательно принимает значения  $V_a$ ,  $V_c$ ,  $\lg \kappa$ ,  $\lg \tau$ ,  $\lg I_s$ ,  $I_{cr}$ ,  $\tilde{Z}_i$ .

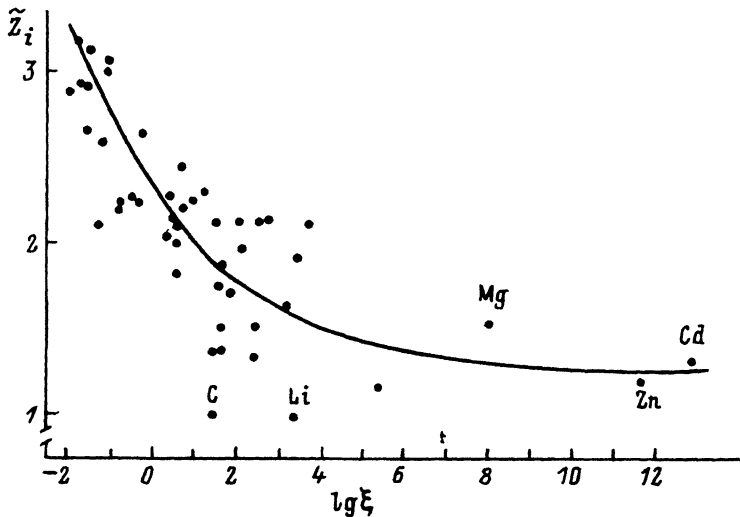


Рис. 7. Средняя кратность заряда положительных ионов в плазме ВД  $Z_i$  по данным [6].

Таблица 2.

Величина $y_i$	Размер- ность	Литера- тура	$\beta_i$	$\alpha_i$	$\delta_i$	$\Theta_i$
$V_a$	В	[16]	-0.18	8.1	8.4	0.23
$V'_a$	В	[12,13,17,18]	-0.20	11.3	10.3	0.15
$V_c$	В	[18]	-0.30	4.7	2.4	0.24
$\lg \kappa$	-	[13,18,19]	-0.28	-	-	0.16
$\lg \tau$	-	[20]	-0.17	-	-	0.21
$I_s$	-	[2]	-0.18	-	-	0.37
$I_{cr}$	А	[3]	-0.17	1.35	0.08	0.70
$\tilde{Z}_i$	-	[5]	-0.3	0.97	1.28	0.21

Параметры аппроксимации, т.е. величины  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\delta_i$ , находились по методу наименьших квадратов. Для оценки отклонения опытных данных  $j_{ij}$  от значений  $j_i(x)$ , определяемых по уравнению (2), вычислялась величина

$$\theta = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(y_i(x) - y_{ij})^2}{y_{ij}^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $N$  — число используемых катодных материалов, т.е. точек на рис. 1,2,4-7. Из-за большого отклонения при аппроксимации значений  $\lg \kappa$  не учитывались данные для Cr, Mg, Sn, Al, Bi, а при аппроксимации значений  $\tilde{Z}_i$  — данные для С и Li. Полученные данные представлены в табл. 2.

Как видно из данных в табл. 2, отклонение большинства экспериментальных величин  $j_i$  от аппроксимации (3) в целом невелико ( $\theta_i < 0.25$ ). Наибольшие отклонения наблюдаются для токов  $I_s$  и  $I_{cr}$ . Частично эти отклонения могут быть связаны с некоторой неопределенностью самих измерений, в частности с влиянием на указанные токи параметров цепи электропитания дуги.

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что атом-электронное отношение  $\xi$  можно использовать не только для выявления специфики прикатодных процессов, но и для анализа характеристик вакуумных дуг на катодах из разных материалов. При этом наибольшее влияние  $\xi$  наблюдается для катодов с  $\xi < 10^3 - 10^4$ . Для таких катодов уменьшение  $\xi$  приводит к росту величин  $V_a$ , т.е. энерговыклада в разряд. При этом вольтов эквивалент теплового потока в катод  $V_c$  и параметры плазмы, т.е. величины  $W_i$  и  $\tilde{Z}_i$ , возрастают, а удельная эрозия катода  $\kappa$  и устойчивость горения дуги, характеризуемая временем  $\tau$ , понижаются. Для катодов же с  $\xi > 10^3 - 10^4$  характеристики дуг почти не зависят от  $\xi$ .



## Список литературы

- [1] Любимов Г.А., Рагозовский В.И. // УФН. 1978. Т. 125. No 4. С. 885-905.
- [2] Харрис Л. // Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. С. 153-209.
- [3] Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 243 с.
- [4] Рагозовский В.И., Левченко Г.В., Теодорович О.И. Разрывные контакты электрических аппаратов. М., Л.: Энергия, 1966. 295 с
- [5] Brown Jan G., Godechot X. // XII Intern. Symp. Dish. and Electr. Insulation in Vacuum. Santa Fe (USA), 1990. P 203-207.
- [6] Немировский А.З., Пучкарев В.Ф. // Матер. VIII Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Ч.II. Минск, 1991. С. 117-118.
- [7] Паранин С.Н., Полищук В.П., Сычев П.Е. и др. // ТВТ. 1988. Т. 24. No 3. С. 422-429.
- [8] Смитлз К.Дж. Металлы. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 471 с.
- [9] Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 396.
- [10] Habermann C.E., Daane A.H. // Chem. Phys. 1964. Vol. 41. N 9. P. 2818-2827.
- [11] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Киев: Наукова думка, 1981. 338 с.
- [12] Davies W.D., Miller H.C. // J. Appl. Phys. Vol. 40. P. 2212-2221.
- [13] Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. Вып. 3. С. 494-507.
- [14] Бейлис И.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 12. С. 1124-1125.
- [15] Бейлис И.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 10. С. 71-74.
- [16] Граков В.Е. // ЖТФ. 1984. Т. 47. Вып. 3. С. 494-507.
- [17] Kimblin C.W. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. P. 3074-3082.
- [18] Daalder J.E. // J. Phys. D. 1977. Vol. 10. P. 2225-2234.
- [19] Васин А.И., Петросов В.А. // Тез. докл. на XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Новосибирск, 1989. Т.II. С. 56-57.
- [20] Фарелл Дж. // Вакуумные дуги / Под ред. Дж.Лафферти. М.: Мир, 1982. С. 224-261.

Институт высоких температур  
Москва

Поступило в Редакцию  
22 июня 1992 г.  
В окончательной редакции  
23 февраля 1993 г.