

$$\varepsilon = m \left( 1 + \left( \frac{Z\alpha}{\gamma + n - |\kappa|} \right)^2 \right)^{-1/2},$$

$a_0$  — радиус первой боровской орбиты;  $n$  — главное квантовое число,  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры;  $m$  — масса электрона,  $Ze$  — заряд ядра,  $\Gamma$  — гамма-функция.

После подстановки в (5) результатов вычисления (8) и разности энергий ( $E_{4,4} - E_{n',2}$ ) определены следующие значения относительной вероятности дипольного электрического перехода:

$$A = \frac{A(4^2F_{7/2} \rightarrow 1^2S_{1/2})}{A(2^2P_{3/2} \rightarrow 1^2S_{1/2})},$$

вызванного квадрупольным взаимодействием  $V_Q - A \approx 0,5 \cdot 10^{-21}$  для дейтерия и  $A \sim 0,3 \cdot 10^{-10}$  для водородоподобного атома ртути.

Полученные в данной работе результаты для водородоподобных атомов нетрудно обобщить на случай экзотических атомов, а также атомов одновалентных элементов и рентгеновских лучей. В последних двух случаях необходимо только заменить в соотношениях (12) заряд ядра эффективным числом  $eZ_{эф}$ . Вследствие такой замены вероятность переходов типа  $n'^2 (L \pm 3)_{j \pm 3} \rightarrow n^2 L_j$  уменьшается в

$$\left( \frac{Z}{Z_{эф}} \right)^2 \text{ раз.}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисоглебский Л. А. — Оптика и спектроскопия, 1962, т. XIII, с. 3.
2. Хейне В. Теория групп в квантовой механике. — М., 1963.
3. Бете Г., Солпитер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. — М., 1960.

Поступила в редакцию  
24.07.84.

УДК 537.525.5

И. И. КРАВЦЕВИЧ, И. Г. НЕКРАШЕВИЧ, А. В. СМЕРНОВ

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ НА ВЕЛИЧИНУ КАТОДНОГО ПАДЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВАКУУМНЫХ ДУГ

Важнейшей энергетической характеристикой вакуумного дугового разряда является величина катодного падения потенциала (КПП), которая отождествлялась авторами [1—5] с падением напряжения между контактами короткой вакуумной дуги. Условия эксперимента при этом выбирались такими, чтобы максимально исключить влияние анода на процессы, протекающие в разряде. Как показали наши предыдущие исследования [6, 7], это осуществляется лишь при определенных межэлектродных расстояниях, граничные значения которых зависят от удельного вклада в суммарный процесс разрушения электродов трех последовательно действующих механизмов эрозии: факельного, катодного и анодного. Факельный механизм действует при малых межэлектродных промежутках и характеризуется интенсивным разрушением анода под действием высокоэнергетичных струй пара, генерируемых в катодных пятнах, с последующим осаждением материала анода на катод. Возрастание длины разрядного промежутка приводит к уменьшению энергии факелов у поверхности анода. Вследствие этого в процессе эрозии преобладает распыление катода под действием опорных пятен дуги (катодный механизм). В длинных дугах реализуются условия для формирования стационарных анодных пятен, приводящих к дополнительному разрушению положительного электрода (анодный механизм).

Настоящая работа посвящена вопросу о взаимосвязи КПП с измене-

нием структуры поверхностного слоя материала электродов и характером эрозийных процессов в условиях вакуумной дуги размыкания. Основное внимание уделяется таким режимам горения разряда, в которых материал анода участвует в процессах генерации носителей заряда.

Эксперименты проводились на установке, описанной в [8]. В качестве электродов использовались цилиндрические образцы диаметром 30 мм, изготовленные из материала на основе молибдена и меди с геттерными добавками. Величина коммутлируемого тока составляла  $\sim 400$  А, давление остаточных газов в рабочей камере не превышало  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Па, скорость разведения электродов  $V_p = 10$  см/с.

Регистрация КПП осуществлялась осциллографом С8—13, на инвертирующий вход которого подавалось компенсирующее напряжение от стабилизированного источника питания, благодаря чему погрешность измерений не превышала 2 %. В процессе эксперимента через определенные интервалы времени  $\tau$  от начала разведения электродов фиксировались мгновенные значения напряжения на дуговом промежутке. Затем по 40 измерениям вычислялись средние значения КПП  $U_c$  и строились зависимости  $U_c$  от межэлектродного расстояния  $d = V_p \tau$ . Одновременно с этим по методике [6] определялись временные и пространственные границы существования эрозийных областей.

До металлографических исследований электроды подвергались воздействию разрядов определенной длительности. Затем перпендикулярно к их рабочей поверхности в местах существования дуги изготавливались шлифы. Структура и микрохимический состав поверхностного слоя электродов изучали с помощью микроскопа «MeF-2» Reichert и микронзонда «MS—46» Сатеса.

На рис. 1 показано изменение структуры поверхностного слоя электродов после воздействия на них серии разрядов различной длительности. При межэлектродном расстоянии  $d = 0,15$  мм на катоде присутствует пленка, состоящая, по данным микрохимического анализа, в основном из меди и являющаяся следствием осаждения на нем продуктов разрушения анода. На аноде в данном случае пленка почти полностью отсутствует. При увеличении межэлектродного расстояния до  $d = 0,3$  мм незначительные пленки наблюдаются на обоих электродах. Во второй

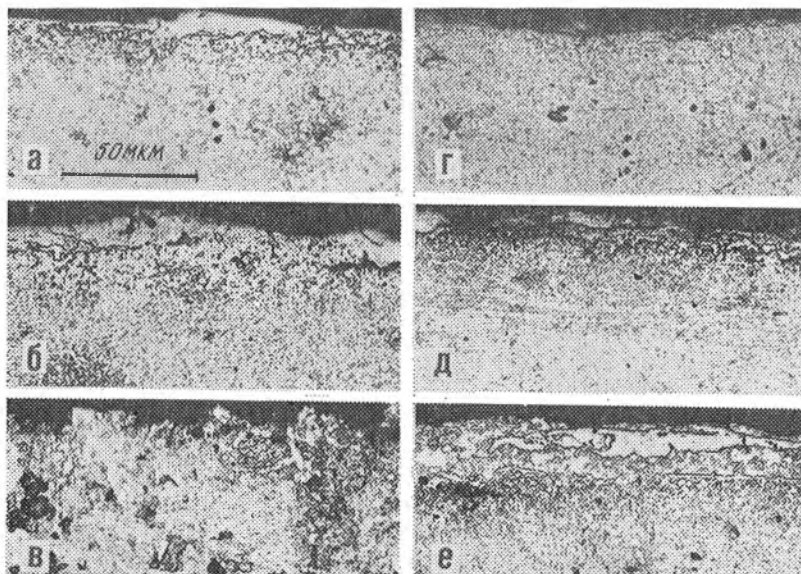


Рис. 1. Структура поверхностного слоя электродов отрицательной (а—в) и положительной (г—е) полярностей после воздействия контактной дуги различной длительности  $\tau$ :

а, г — 1,5 мс ( $d = 0,15$  мм); б, д — 3 мс ( $d = 0,3$  мм); в, е — 12 мс ( $d = 1,2$  мм)

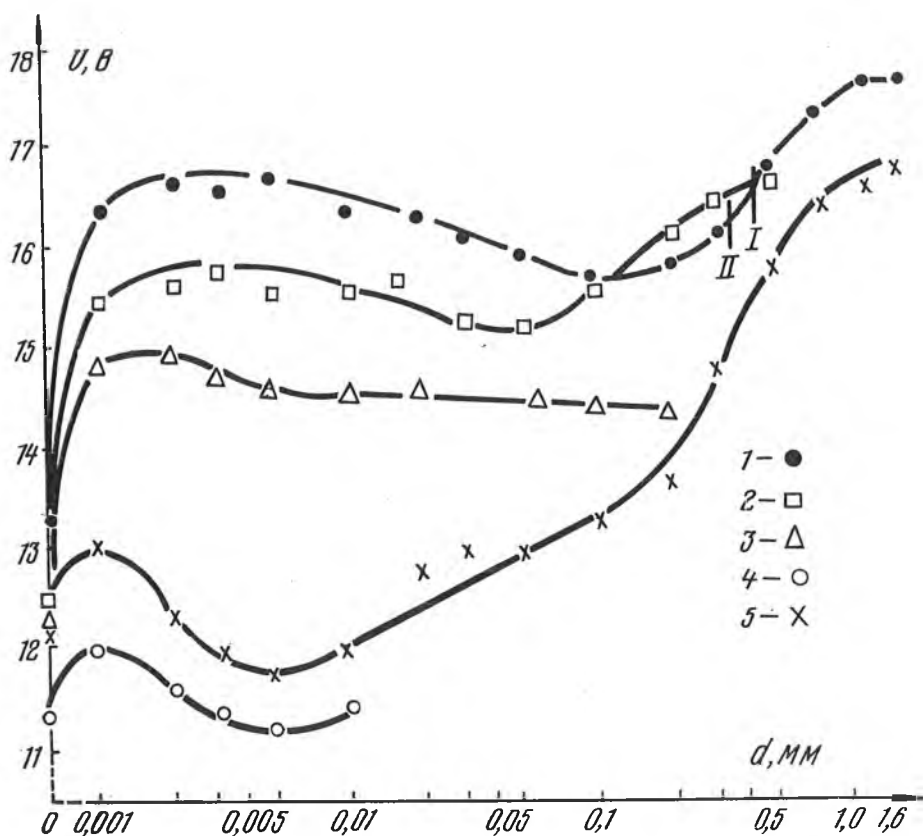


Рис. 2. Зависимости  $U_c$  от  $d$  для различных длительностей горения дуги:  
1 и 5 — 16 мс; 2 — 5 мс; 3 — 2 мс; 4 — 0,1 мс

эрозионной области ( $d=1,2$  мм) поверхность анода покрывается бесструктурной пленкой толщиной до 30 мкм, состоящей преимущественно из молибдена. В то же время, по данным микрохимического анализа, происходит изменение структуры и состава поверхностного слоя катода на глубину 30—40 мкм, заключающееся в уменьшении содержания в нем молибдена. С возрастанием межэлектродного расстояния глубина пораженного слоя увеличивается. При этом концентрация меди в поверхностном слое повышается вплоть до полного исчезновения молибдена при  $d=1,2$  мм.

На рис. 2 представлены зависимости КПП  $U_c$  от длины межэлектродного промежутка  $d$  для дуговых разрядов различной длительности (кривые 1—4) после предварительной обработки электродов дуговыми разрядами. Аналогичная зависимость (кривая 5) получена без такого рода обработки электродов. Конец первой эрозионной области (I) и начало второй (II) для данного материала отмечены вертикальными линиями на кривой 1. Третья эрозионная область по данным эксперимента отсутствует.

Характерным для всех кривых является существенный рост КПП на начальных стадиях разряда ( $d < 10^{-3}$  мм), что связано, вероятно, с участием в процессе генерации носителей заряда продуктов взрыва жидкого металлического мостика. Затем в первой эрозионной области происходит некоторое уменьшение КПП (кривая 1) вследствие интенсивного поступления в разрядный промежуток материала анода, а также наличия на катоде пленок (см. рис. 1, а), дополнительно снижающих КПП [5]. По окончании первой эрозионной области, когда преобладает катод-

ный механизм эрозии, пленка с поверхности катода исчезает (см. рис. 1, в), в связи с чем происходит рост КПП с последующей стабилизацией его на определенном уровне.

При незначительном изменении поверхностного слоя электродов, вследствие воздействия на них разрядов малой длительности (кривая 4) или небольшого суммарного числа проведенных разрядов (кривая 5), КПП принимает более низкие значения, что объясняется привязкой катодных пятен дуги на границе раздела молибдена и меди [1], где в основном сосредоточена геттерная добавка. Дополнительные изменения поверхностного слоя, вызванные увеличением длительности разряда, приводят к соответствующему росту КПП (кривые 1—3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что КПП вакуумных дуг зависит от двух типов изменения структуры поверхностного слоя электродов: «статического», связанного с воздействием на электроды некоторого числа дуговых разрядов, и «динамического», обусловленного возникновением на катоде в первой эрозионной области пленки материала анода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги.— М., 1968.
2. Граков В. Е.— ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 2, с. 396.
3. Davis W. D., Miller H. G.— J. Appl. Phys., 1969, v. 40, № 5, p. 2212.
4. Mitchell G. R.— Proc. IEE, 1970, v. 117, p. 2315.
5. Некрашевич И. Г., Граков В. Е.— В сб.: Применение спектрального анализа в народном хозяйстве и научных исследованиях. Минск, 1967, с. 10.
6. Смирнов А. В., Кравцевич И. И.— ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 21, с. 2292.
7. Некрашевич И. Г., Смирнов А. В., Кравцевич И. И.— Труды XV Международной конференции по явлениям в ионизованных газах. Минск, 1981, с. 519.
8. Кравцевич И. И., Некрашевич И. Г., Смирнов А. В.— Изв. ВУЗов СССР. Электромеханика, 1981, № 10, с. 1108.

Поступила в редакцию  
28.08.84.

УДК 535.31

С. В. ПРОЦКО, Б. Ю. ХАНОХ, А. П. ХАПАЛЮК

#### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ

Трехгранный отражатель, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют небольшие отступления от  $90^\circ$ , часто используется в качестве автоколлимационного датчика для определения углового положения объекта, жестко связанного с отражателем, через три независимых угла его поворота относительно трех осей: оси визирования (оси скручивания) и коллимационных осей [1]. Для повышения эффективности действия углоизмерительных автоколлиматоров применяются отражатели со специально выбранными отступлениями углов от  $90^\circ$  [1, 2]. Отражатель с прямыми двугранными углами является лишь частным случаем целого семейства отражателей в форме трехгранных углов ( $\pi/2$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi/s$ ,  $s$  — четное) при  $s=2$  [3], поэтому целесообразно определить условия, которым должны удовлетворять отступления двугранных углов от идеальных между отражающими гранями для остальных членов этого семейства с целью эффективного их использования в качестве автоколлимационных датчиков угловых координат.

Из расчетов [3] вытекает, что в плоскости анализа автоколлиматора координаты изображений пучков, отраженных отражателем в форме трехгранного угла ( $\pi/2+\delta_{23}$ ,  $\pi/2+\delta_{13}$ ,  $\pi/s+\delta_{12}$ ), где  $\delta_{ik}$  ( $i, k=1, 2, 3$ ) — небольшие отступления двугранных углов от идеальных, следующим