

1. ЭРОЗИЯ КАТОДА И РАСХОД МАССЫ КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА В СТАЦИОНАРНОЙ ДУГЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.М. Хороших

Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий

ННЦ ХФТИ (Харьков)

Украина

Поступила в редакцию 30.11.2004

Приведены результаты исследований стационарной вакуумной дуги на твердых металлических катодах, горящих в присутствии различных газов в объеме разрядного промежутка. Данные касаются измерений скорости катодного пятна, определению коэффициентов электропереноса, измерений ионного тока и оценке величины катодного падения.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейший прогресс в области практического использования вакуумной дуги требует накопления и систематизации данных о его физической природе. Источником весьма полезной информации о природе физических процессов, определяющих генерацию частиц в дуговом разряде, являются данные по измерению расхода массы материала катода, эродирующего под воздействием катодного пятна дуги. Данные измерения представляют также практический интерес, поскольку скорость эрозии является одним из важнейших параметров, определяющих производительность и ресурс непрерывной работы вакуумно-плазменных установок для осаждения покрытий и электродуговых сорбционных насосов.

Ранее эрозия катода в вакуумной дуге исследовалась для импульсных и квазистационарных разрядов длительностью до нескольких секунд [1, 2, 3]. Стационарная дуга на твердых металлических катодах находилась вне поля зрения исследователей, что связано, в основном, с экспериментальными трудностями по обеспечению ее стабильного горения на катодах из большинства металлов. Слабо изучено также влияние химически активного газа в объеме разрядного промежутка на характер протекания прикатодных процессов. Между тем известно, что величина переносимого через дугу заряда и особенно время горения дуги влияют на эрозионные характеристики разряда [4]. Существенное воздействие на характер прикатодных процессов

оказывают также различного рода пленки и включения на поверхности катода [5, 6], возникающие при наличии в вакуумном объеме химически активных газов.

В настоящем обзоре систематизируются данные по изучению процессом эрозии и массопереноса катодного материала в стационарной дуге низкого давления, полученные в Харьковском физико-техническом институте начиная с середины 80-х гг. прошлого столетия. Результаты касаются дуги, горящей как в высоком вакууме, так и в присутствии различных газов в объеме разрядного промежутка.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводили с использованием как источника плазмы с автостабилизацией, так и источника плазмы с магнитным удержанием катодного пятна. В качестве катодных материалов при измерениях использовали алюминий, медь, молибден, цирконий, титан, ниобий и графит. Диаметр цилиндрического водоохлаждаемого катода в источнике плазмы с автостабилизацией катодного пятна составлял 64 мм, в источнике плазмы с магнитным удержанием катодного пятна изменялся в пределах – 60 ÷ 100 мм. Длина катодов варьировалась в пределах 5 ÷ 80 мм. Для изучения влияния теплового режима катода на скорость его эрозии исследовали электродуговой источник плазмы с магнитным удержанием катодного пятна с катодным узлом видоизмененной конструкцией (рис. 1) [7].

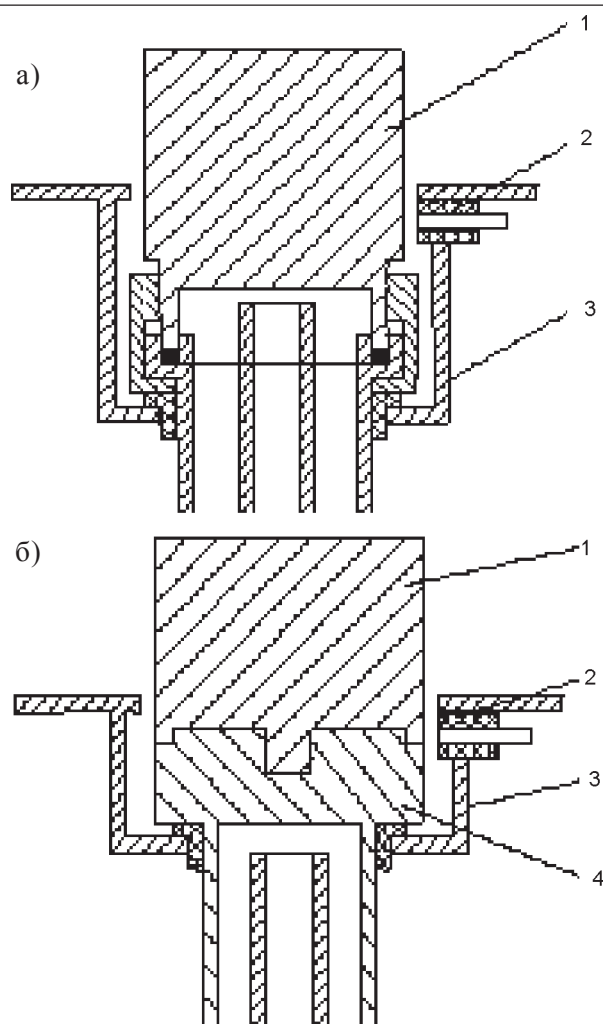


Рис. 1. Конструкции катодных узлов источников плазмы с прямым охлаждением катода а) и с охлаждением катода через металлическую медную перегородку б): 1 – катод; 2 – поджигающее устройство; 3 – защитный экран; 4 – перегородка.

В этом катодном узле катод 1 закрепляли на медной перегородке 4 с помощью резьбового соединения (выступ на катоде и отверстие в перегородке, снабженные резьбой М12). Диаметр перегородки – 56 мм, толщина – 15 мм. Контактующие поверхности обработаны по 6-му классу чистоты.

Скорость эрозии катода (коэффициент электропереноса) χ измерялась весовым методом по потере массы катодного материала Δm за время t на единицу тока дуги I_0 (1,7).

Анализ химических соединений на поверхности катода проводился методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РЭС).

Изучение характера эрозии поверхности катода производилось с помощью профило-

графа-профилометра 252 и металлографического микроскопа ММР-2Р.

Эрозию в ионной фазе оценивали по ионному току, определяемому интегрированием кривых распределения плотности тока по радиусу. Эти кривые получали с помощью одиночного зонда, передвигаемого на расстоянии 20 мм от плоскости катода.

Измерения падения напряжения на разряде проводили с помощью прибора Ц4317.

Эксперименты проводились при контроле температуры поверхности катода с помощью хромель-алюмелевой термопары, расположенной на расстоянии ≈ 2 мм от его рабочего торца.

СКОРОСТЬ ЭРОЗИИ В ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КАТОДА

В табл. 1 приведены данные по скорости эрозии катодов из алюминия, меди, молибдена, циркония, титана, ниобия хрома и графита в вакууме $\sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ Па, полученные с использованием источника плазмы с автостабилизацией катодного пятна при токе дуги 100 А. Время горения дуги – 20 мин.

Таблица 1

Коэффициенты электропереноса в вакуумных дугах

Материал катода	χ , мкг/К
Алюминий АВ0000	110 120 [16]
Медь электролитическая	65 115 [4] 130 [16] 76 [86] 70 [80]
Молибден МЧВП	52 47 [4]
Цирконий сплав 100	51
Титан ВТ-1-1	39 52 [4]
Хром ВХ2И	36 40 [4] 22 [86]
Ниобий	38
Графит АГ-1500	27 17 [4]

Полученные коэффициенты электропереноса отличаются от их значений, проведенных для импульсных или квазистационарных

дуг [8, 9]. В работе [4] отличие результатов измерений c , выполненных различными авторами, объясняется влиянием экспериментальных условий и, в основном, величины заряда Q , переносимого через дугу на единицу рабочей поверхности катода S_k . При этом c растет с увеличением Q/S_k . Рост c при возрастании Q/S_k обусловлен, по мнению автора этой работы, увеличением подвода энергии на единицу рабочей поверхности катода, что вызывает повышение его локальной температуры и, соответственно, приводит к росту скорости эрозии катода.

Сравнение значения коэффициента электропереноса для меди при $p \sim 10^{-3}$ Па, полученного в настоящей работе, с данными работы [8] показывает, что тенденция роста c с увеличением Q/S_k наблюдается не во всех случаях: в данной работе $c = 65$ мкг/К при $Q/S_k = 2,4 \cdot 10^3$ К/см², а в [4] $c = 76$ мкг/К при $Q/S_k = 1,7 \cdot 10^2$ К/см².

Данное несоответствие связано с отсутствием контроля температуры катода T_k в экспериментах, анализируемых в работе [4]. Интегральная температура катода зависит, кроме величины Q/S_k , определяющей подвод энергии к его поверхности, также от величины энергии, рассеиваемой в виде тепла, отводимого через элементы крепления и токоввод. Эта энергия зависит от конкретного конструктивного исполнения экспериментального электродугового устройства, в связи с чем температура катодов, исследуемых в данной работе и в [8, 9, 10, 11, 12] может существенно отличаться.

Экспериментальные данные, полученные для дуги с титановым катодом в наших условиях, указывают на то, что влияние интегральной температуры на скорость и характер эрозии весьма существенно (T_k повышалась от 390 до 800 К при увеличении длины цилиндрического катода от 15 до 50 мм).

Микрофотографии и профилограммы, иллюстрирующие изменение характера эрозии катода при увеличении интегральной температуры его поверхности представлены на рис. 2 и рис. 3 [13].

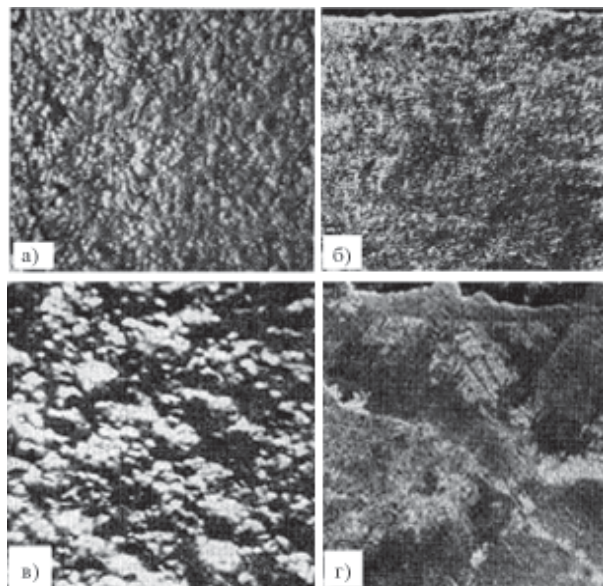


Рис. 2. Микрофотографии поверхности (а, в) и поперечные шлифы (б, г) катодов (а, б – $T_k = 390$ К; в, г – $T_k = 800$ К).

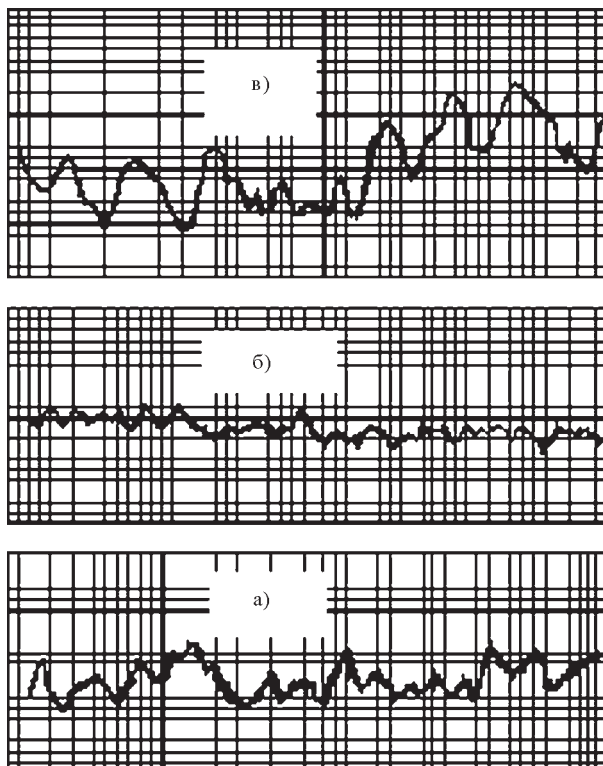


Рис. 3. Профилограммы поверхности титанового катода после 10 мин. горения; $I_d = 110$ А; а) $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па; б) $p_N = 10$ Па; в) $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па; а), б) – $T_k = 390$ К; в) – $T_k = 800$ К. Масштаб по горизонтали – одно большое деление – 0,2 мм, по вертикали – 20 мкм.

Характерным для катода с рабочей температурой ≈ 800 К [14] являются существенно большие размеры следов катодного пятна дуги; появляются оплавленные кратеры размером до 1 мм. На поперечном шли-

фе видна приповерхностная зона воздействия катодного пятна глубиной ≈ 20 мкм (при $T_k \approx 390$ К зона воздействия катодного пятна при увеличении $\times 200$ не разрешается). При $T_k \approx 800$ К происходит рекристаллизационный отжиг материала катода, проявляющийся в резком увеличении размеров зерен; по литературным данным [15] рекристаллизационный отжиг титана начинается при $770 \div 820$ К. Скорость эрозии катода повышается от 39 мкг/К при $T_k \approx 390$ К до 76 при $T_k \approx 800$ К. Увеличение коэффициента электропереноса происходит за счет разбрызгивания капель жидкого металла из зоны расплава материала катода вблизи пятен дуги. По данным работы [16], увеличение размеров зерен также способствует росту эрозии в капельной фазе.

Повышение скорости эрозии катода в виде капель, наблюдаемое с ростом T_k , является нежелательным во всех случаях практического применения вакуумного дугового разряда. В связи с этим на практике требуется интенсивное охлаждение катода, соответствующее минимальному для данного катодного материала значению χ . Наилучшее охлаждение катодов обеспечивается при непосредственном охлаждении торца, противоположного рабочему, проточной водой. В этом случае, однако, существует опасность попадания воды в вакуумную камеру при замене или “прогорании” катода. Кроме того, процесс замены катода достаточно сложен, поскольку требует полной разборки катодного узла.

Указанные недостатки устраняются в случае, если катод не имеет непосредственного контакта с водой, а охлаждение осуществляется через металлическую перегородку. Однако за счет конечной величины термического сопротивления в зоне контакта катода с перегородкой эффективность охлаждения в такой конструкции ухудшается.

Применяя известные [17] методы интенсификации теплообмена можно уменьшить избыточный нагрев катодов косвенного охлаждения. Эксперименты по изучению эрозии катодов, охлаждаемых через перегородку (рис. 1б), проводили в следующих условиях:

1) В отсутствие в контактной зоне прокладок или уплотнителей.

- 2) При наличии в контактной зоне прокладок (от одной до трех) из отожженной медной фольги толщиной 0,1 мм.
- 3) При заполнении зазора между контактирующими поверхностями вакуумным маслом ВМ-1.
- 4) При наличии в зоне контакта медной прокладки и масла.
- 5) При заполнении зазора порошкообразным графитом.
- 6) При заполнении зазора маслом с добавлением порошкообразной бронзы.

Катод ввинчивался в перегородку до упора с крутящим моментом 2 кГ·м. Это примерно соответствует условиям завинчивания вручную без применения каких-либо приспособлений (ключа, захвата и т. п.). Заключение об эффективности охлаждения катодной поверхности делали путем сравнения измеренных значений χ с данными для катодов прямого охлаждения. Измерения вели при токе дуги 100 А. Ток в стабилизирующей катушке был равен 1,0 А. Фокусирующая катушка не включалась. Катод был изготовлен из титана ВТ-1-1. Во время измерений разряд горел в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па.

В отсутствие уплотнителей в течение всего эксперимента наблюдается увеличение значения χ (рис. 4), связанное с повышением интегральной температуры катодной поверхности.

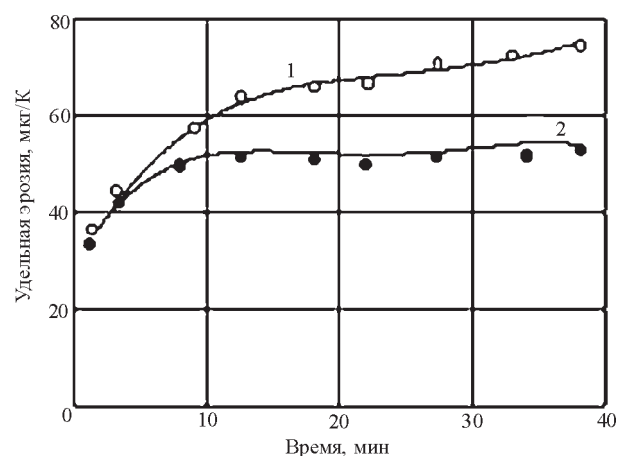


Рис. 4. Зависимость удельной эрозии титанового катода диаметром 80 мм от времени горения дуги. Точки на графике соответствуют мгновенному значению χ . Значения χ рассчитаны из зависимостей $\Delta m(t)$, полученных с шагом 0,5 мин в области $t = 0 \div 5$ мин, и с шагом 5 мин в области $t = 5 \div 40$ мин: 1 — уплотнитель отсутствует; 2 — уплотнитель — одна медная прокладка.

Через 40 мин после начала эксперимента χ увеличивается в два раза по сравнению с его значением для катодов прямого охлаждения. (Для катодов прямого охлаждения при температуре поверхности 370 К $\chi = 39 \text{ мкг/К}$). Применение уплотнителей существенно улучшает теплообмен в зоне контакта катода с перегородкой, что ведет к снижению χ и уменьшению времени его стабилизации до ≈ 7 мин. Установившееся значение χ составляет $\approx 53 \text{ мкг/К}$, что несколько превышает его значение для катодов прямого охлаждения.

Эксперимент показал, что применение любого из использованных в работе уплотнителей не позволяет обеспечить эффективное охлаждение титановых катодов диаметром 60 мм (табл. 2). В таблице приведены значения χ , полученные из измерений расхода массы катода за промежуток времени $t = 10$ мин, отсчитываемый с момента зажигания дуги.

Таблица 2

Удельная эрозия титановых катодов диаметром $D_k = 60, 80$ и 100 мм, охлаждаемых через медную перегородку

Вид уплотнителя между катодом и перегородкой	Удельная эрозия, мкг/К		
	$D_k = 60$ мм	$D_k = 80$ мм	$D_k = 100$ мм
Уплотнитель отсутствует	–	65	–
Одна медная прокладка	150	50	47
Масло ВМ-1	160	49	50
Три медные прокладки	–	49	–
Одна медная прокладка +масло ВМ-1	100	–	49
Порошкообразный графит	210	–	54
Бронзовый порошок на масле ВМ-1	87	–	41

Минимальный диаметр катодов из титана, которые целесообразно использовать в конструкции катодного узла, представленного в конструкции катодного узла, представленного на рис. 1б, составляет ≈ 80 мм. Низкий коэффициент теплопроводности титана накладывает ограничения на максимальную высоту катодов, при которой эффективность охлаждения рабочей поверхности сохраняется на приемлемом для практики уровне.

(Охлаждение катодов является достаточным для его практического использования в случае, если χ возрастает не более чем на 1/3 от его значения для катодов с прямым охлаждением высотой $10 \div 15$ мм). Высота катодов диаметром 80 и 100 мм может достигать $50 \div 60$ мм, в то время как для катодов диаметром 60 мм, даже в случае их прямого охлаждения, не следует применять катоды высотой более 35 мм. Измерения не выявили заметных преимуществ какого-либо из использованных уплотнителей на эффективность охлаждения катодов диаметром 80 и 100 мм. На практике наиболее удобно применять одну прокладку из отожженной медной фольги, смазанную с двух сторон маслом ВМ-1. Наличие масла в зазоре между катодом и перегородкой позволяет скомпенсировать возможную неплоскостность контактирующих поверхностей. Для этой же цели следует применять гофрированные прокладки.

ЭРОЗИЯ КАТОДА В ПРИСУТСТВИИ ГАЗА В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

Зависимости коэффициентов электропереноса для меди и титана от давления газа, полученные для дуги, горящей в источнике плазмы с автостабилизацией катодного пятна в присутствии азота или аргона в объеме вакуумной камеры, представлены на рис. 5 [13, 14].

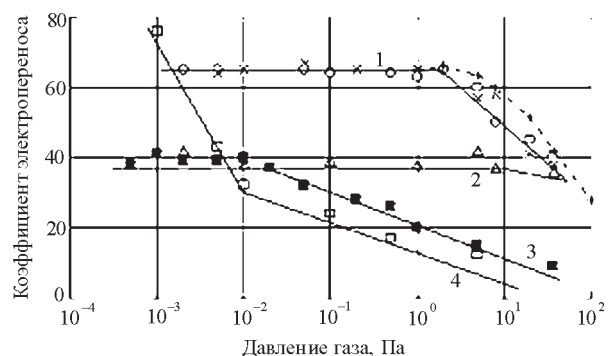


Рис. 5. Зависимости коэффициентов электропереноса от давления газа: 1 – медный катод (светлые треугольники – Cu-N₂; темные – Cu-Ar; пунктир – расчетная кривая из [189]); 2 – титановый катод (Ti-Ar); 3, 4 – титановый катод (Ti-N₂). Температура катода: 1 – 3 – 390 К; 4 – 800 К.

Величина χ падает с ростом давления p для обоих металлов (рис. 5). Однако, для меди от-

сутствуют отличия в характере изменения χ при напуске в объем азота или аргона, в то время, как для титана отличия кривых $\chi(p)$ для азота и аргона весьма существенно: наличие азота ведет к более значительному уменьшению χ с ростом p и этот эффект проявляется при более низком давлении. Характер эрозии титанового катода с ростом давления азота также изменяется: поверхность катода становится более гладкой, средний размер неоднородностей поверхности уменьшается.

Возможны следующие причины уменьшения скорости эрозии катода дуги при росте давления газа в разрядном промежутке:

- Изменение структуры и характера движения катодного пятна [3].
- Возврат частиц на катод за счет столкновений с атомами или молекулами газа [8, 9, 18].
- Образование на поверхности катода соединений, стойких к воздействию катодного пятна.

Трансформацию катодных пятен с ростом давления газа в объеме изучали визуально и фотографически. На медном катоде при давлении азота $p_N \geq 2$ Па и аргона $p_{Ar} \geq 6$ Па катодное пятно расщепляется на множество мелких пятен. Значения p_N и p_{Ar} , соответствующие расщеплению катодного пятна, примерно совпадают с началом уменьшения χ на кривой $\chi(p)$ (кривая 1 на рис. 5).

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [1, 2, 3]. Для титана расщепление катодного пятна в исследуемом диапазоне давлений не происходит ни в аргоне, ни в азоте. В системе титан-азот при $p_{Ar} \geq 1$ Па происходит существенное увеличение яркости свечения разряда вблизи рабочей поверхности катода. С ростом давления газа для меди и для титана наблюдается тенденция к увеличению скорости хаотического движения катодного пятна (рис. 6). Отличий в характере влияния азота и аргона на скорость движения катодных пятен не обнаружено для обоих катодных материалов.

Таким образом, результаты исследования структуры катодного пятна свидетельствуют о том, что трансформация катодного пятна, наблюдаемая с ростом давления газа, может

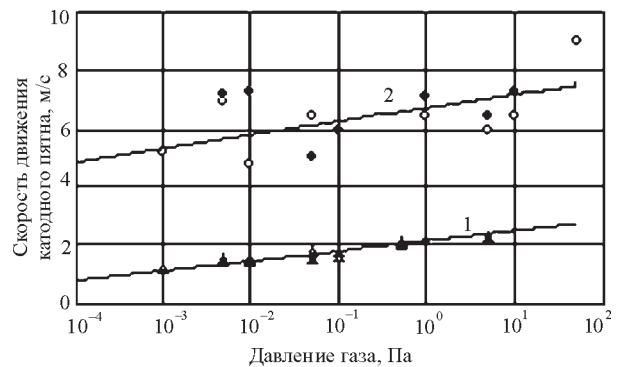


Рис. 6. Зависимость скорости движения катодного пятна от давления газа для медного (1) и титанового (2) катодов. Светлые кружки и треугольники – азот; темные – аргон.

объяснить полученные экспериментальные зависимости $\chi(p)$ только в случае медного катода.

Возврат на катод частиц, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги, за счет столкновений с атомами или молекулами газа в объеме разрядного промежутка исследовался теоретически в работе [18]. Полученная в этой работе расчетная кривая, соответствующая условиям эксперимента работы [2], представлена на рис. 5 штриховой кривой (в работе [2] исследовалась скорость эрозии медного катода диаметром 17 мм при токе дуги 100 А в атмосфере азота). По результатам расчета уменьшение скорости эрозии катода за счет возврата частиц происходит при $p \geq 1$ Па, что хорошо согласуется с данными для систем медь-аргон и титан-аргон. Наблюдаемое в этом случае расщепление катодного пятна может быть связано с отличием условий горения разряда на пленке металла конденсируемой из обратного потока частиц и на массивном материале. При $p \leq 1$ Па обратный поток частиц на катод пренебрежимо мал; это свидетельствует о том, что наблюдаемый экспериментально характер зависимости $\chi(p)$ для системы титан-азот не связан с этим явлением.

Таким образом, появление на поверхности соединений, стойких к воздействию катодного пятна, может являться основной причиной, определяющей характер кривой $\chi(p)$ для системы титан-азот (кривая 3, рис. 5). По литературным данным [19] нитрид титана обладает повышенной дугостойкостью, что мо-

жет привести к уменьшению скорости эрозии катода при возникновении этого соединения на поверхности катода. Для проверки предположения о возможности образования нитридов в данных условиях проводился элементный анализ поверхности титановых катодов, подвергшихся воздействию дуги, горящей в присутствии либо в отсутствии азота в разрядном промежутке [20]. Спектры фотоэлектронов, испускаемых поверхностью, приведены на рис. 7.

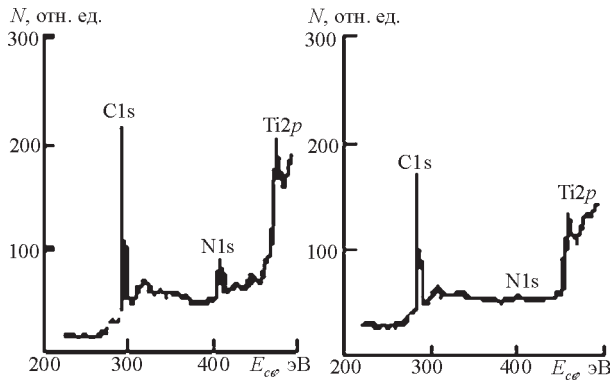


Рис. 7. Рентгеновские фотоэлектронные спектры поверхности катодов, подвергнутых воздействию дуги в присутствии N_2 (а) и C_2H_2 (б) в объеме при давлении газа $2 \cdot 10^{-4}$ Па, $T_k = 800$ К.

В спектрах представлены линии элементов в диапазоне энергий связи $E_{cb} = 200 \div 500$ эВ: линии углерода C1s, азота N1s и титана Ti2p. В случае если азот специально не подается в объем разряда, интенсивность его линии находится на уровне линий большинства примесей, попадающих на поверхность катода при воздействии дуги на конструкционные элементы вакуумной системы. Однако при давлении азота в системе $p \geq 10^{-2}$ Па в спектре фотоэлектронов регистрируется интенсивная линия N1s с энергией связи 412 эВ. Полученный результат свидетельствует о возможности связывания азота в химических соединениях на поверхности катода в условиях подачи газа в объем вакуумно-дугового разряда.

Проведенные измерения не позволяют сделать заключения о локализации областей наиболее интенсивного образования TiN на поверхности катода. Представляется очевидным, что непосредственно в катодных пятнах, температура которых существенно превышает

температуру испарения катодного материала и его соединений с газами, эффективность синтеза не может быть высокой.

Образование дугостойких нитридов является, очевидно, и причиной уменьшения χ в азоте для алюминиевого и циркониевого катодов (рис. 8).

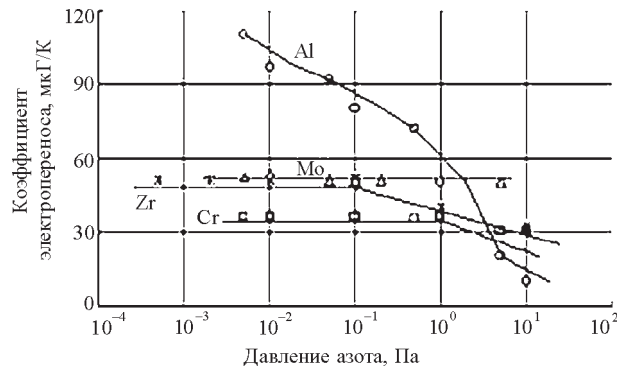


Рис. 8. Зависимости коэффициентов электропереноса от давления азота при $T_k = 390$ К (410 К для молибдена).

Несущественное влияние азота на удельную эрозию хромового и молибденового катодов (рис. 8) может быть связано с низкими значениями максимальной температуры устойчивого состояния нитридов для этих металлов (1773 К – CrN, 970 К – Mo_2N , MoN [19]). Отсутствие отличий по скорости эрозии медного катода в азоте и в аргоне (рис. 5) связано с тем, что молекулярный азот не образует соединений при взаимодействии с медью при температурах, по крайней мере, меньших 1700 К [21].

Характер влияния химически активного газа на скорость эрозии катода зависит от его температуры. Так, из рассмотрения зависимостей $\chi(p)$, полученных для титанового катода в азоте при $T_k \approx 390$ К и $T_k \approx 800$ К (кривые 3 и 4 на рис. 5 соответственно) следует, что при повышении T_k изменение χ существенно уже при давлении азота $p \sim 10^{-3}$ Па. Более резкое уменьшение χ с ростом p для более горячего катода связано с повышением эффективности процесса синтеза нитрида титана при дополнительном подводе энергии в зону реакции [22]. Характерным для катода с более высокой температурой является наличие на его рабочей поверхности сплошного слоя нитрида титана (вся поверхность катода имеет золотисто-желтый цвет) после горения

дуги в течение 10 мин при давлении азота $p \geq 1$ Па. В отличие от дуги в азоте, для титановой дуги, горящей в ацетилене, повышение интегральной температуры катода ведет к существенному росту значения χ (рис. 9).

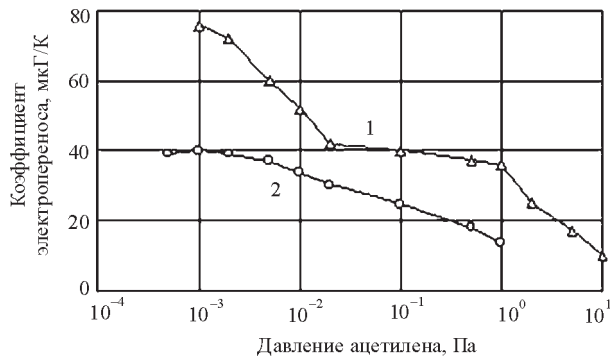


Рис. 9. Удельная эрозия титанового катода в присутствии ацетилена: 1 – температура катода 800 К; 2 – температура катода 390 К.

Поскольку наиболее вероятной причиной изменения значения χ для катода дуги, горящей в присутствии газа (в области давлений $10^{-4} \div 50$ Па), является изменение состояния поверхности катода, отличия в характере влияния температуры на скорость его эрозии в азоте и в ацетилене могут быть обусловлены отличиями в механизмах сорбции данных газов катодной поверхностью.

Так, при физической сорбции количество поглощаемого газа уменьшается с ростом температуры, в то время как при хемосорбции существует диапазон температур сорбента, в котором сорбция увеличивается с повышением температуры [23]. Наблюдаемый характер влияния температуры катода на скорость его эрозии позволяет предположить, что поглощение ацетилена катодной поверхностью не связано с химическим взаимодействием титана с углеродом или водородом, в то время как в системе титан-азот вклад хемосорбции является определяющим.

При исследовании элементного состава поверхности наличие на образцах различного рода загрязнений органического характера, вносимых при пребывании образцов в атмосфере, ведет к появлению в спектрах фотоэлектронов интенсивной линии Cls, наблюдаемой в случае напуска в систему, как азота, так и ацетилена (рис. 7). Это обстоятельство

не позволяет определить характер связи углерода с титаном методом РЭС в наших экспериментальных условиях. Однако при давлении ацетилена, превышающем 10 Па, на катоде образуется диэлектрическая пленка черного цвета, слабо связанная с его поверхностью. Малое количество образуемого конденсата не позволяет провести его химический анализ. Однако, приведенные в литературе [24] данные позволяют предположить, что он представляет собой углеродный конденсат, формирующийся при бомбардировке ионами плазмы частиц C_2H_2 и продуктов его диссоциации, сорбированных на катодной поверхности.

Изучение эрозии титанового катода в смесях азота с ацетиленом указывает на то, что ацетилен поглощается катодной поверхностью намного эффективнее азота. Так, при содержании ацетилена в смеси на уровне нескольких процентов коэффициент электропереноса для титана увеличивается в 1,5 раза по сравнению со значением χ в чистом азоте. При концентрации ацетилена, равной 10% и более, χ близок к его значению в чистом ацетилене (в ацетилене χ в 2,5 раза выше, чем в азоте на горячем титановом катоде) (рис. 10).



Рис. 10. Зависимость удельной эрозии титанового катода от состава ацетилен азотной смеси при $p = 1$ Па, $T_k = 800$ К

Столь существенное влияние C_2H_2 на скорость эрозии катода в ацетилен-азотных смесях связано с тем, что состав адсорбированных пленок совпадает с составом напускаемых в объем газовых смесей лишь в начальный момент сорбции. С течением времени за счет разницы в значениях теплоты сорбции и испарения на сорбирующей поверхности начинают преобладать ацетилен и

продукты его диссоциации в разряде, вытесняющие ранее сорбированный азот. (Необходимость учета замещения компонентов газовых смесей на сорбирующей поверхности углеводородами отмечается также в [25]).

Анализируя характер зависимости скорости эрозии медного катода от величины переносимого заряда, автор работы [4] обращает внимание на следующее обстоятельство. Поток частиц, покидающих катод, состоит из нейтральных паров и капель катодного материала и положительно заряженных ионов. Если обозначить потерю массы за счет ионов Δm_i , за счет нейтральных частиц – Δm_n , то коэффициент электропереноса можно записать в виде:

$$\chi = \frac{\Delta m_i}{I_a \Delta t} + \frac{\Delta m_n}{I_a \Delta t} \quad (1)$$

Ионный ток определяется выражением:

$$I_i = \frac{\Delta m_i \bar{Z} e}{M \Delta t}, \quad (2)$$

где M – масса атома катодного материала; \bar{Z} – средняя кратность заряда иона; e – элементарный заряд.

Т.е. χ можно представить как сумму:

$$\chi = \chi_i + \chi_n; \quad (3)$$

$$\chi_i = \frac{I_i M}{I_a \bar{Z} e}. \quad (4)$$

Максимальное значение ионного тока, отбираемого из плазмы вакуумной дуги без нарушения режима горения разряда, составляет для любых металлов $\approx 10\%$ от тока дуги, причем эта величина не зависит ни от тока дуги, ни от времени горения разряда. Тогда (3) можно записать в виде:

$$\chi = 0,1 \frac{M}{\bar{Z} e} + \frac{\Delta m_n}{I_a \Delta t}. \quad (5)$$

По данным, опубликованным в [26], средняя кратность заряда иона в плазме вакуумной дуги при изменении разрядного тока изменяется незначительно. Зависимость \bar{Z} от времени горения дуги также слабая, о чем свидетельствует совпадение их значений для дуг, горящих на медном катоде в течение неско-

льких десятых долей секунды [26] и нескольких десятков минут [4, 27].

Таким образом, для токов дуги, по крайней мере, в несколько сотен ампер величина χ_i не зависит ни от времени горения разряда, ни от тока дуги. Следовательно, зависимость χ от этих параметров обусловлена изменением потерь массы катода за счет генерации потоков нейтральных частиц (атомов и капель) – Δm_n . Величина χ_i является нижним пределом значениях, достигаемого при $\chi_n \rightarrow 0$.

Представляет интерес проверка этого положения для дуги на титановом катоде, горящей в атмосфере азота. На рис. 11 зависимость ионного тока от давления представлена совместно с кривой $\chi(p)$; здесь же приведена зависимость $\chi_i(p)$, полученная путем пересчета кривой $I_i(p)$ по формуле (5) при $= 1,89$ [27] (кривая 3).

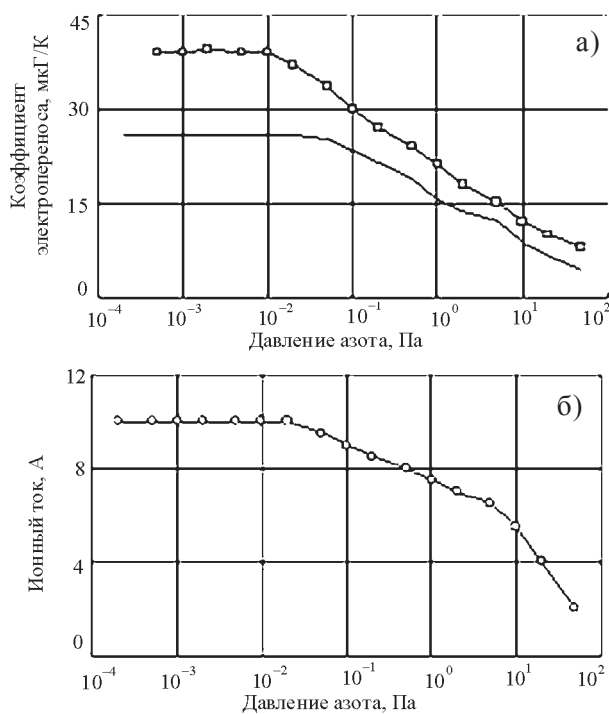


Рис. 11. Зависимости ионного тока и коэффициента электропереноса от давления азота для титанового катода: 1 – I_i ; 2 – χ ; 3 – χ_i .

При построении кривой $\chi_i(p)$ учтено, что резкое уменьшение I_i при $p \geq 1$ Па происходит за счет рекомбинации ионов в объеме [14]. По этой причине в области больших давлений зависимость $\chi_i(p)$ аппроксимировалась прямой с углом наклона относительно оси абсцисс $\alpha = d\chi_i/dp|_{p=1 \text{ Па}}$.

Сравнение кривых $\chi(p)$ и $\chi_i(p)$ показывает, что уменьшение скорости эрозии титанового катода при росте давления азота сопровождается увеличением доли ионов в массопереносе. Это явление также связано с образованием на поверхности катода нитрида титана, который обладает более низкой, по сравнению с чистым титаном, скоростью испарения при нагреве в вакууме [21] и более высокой температурой плавления [19]. Указанные свойства TiN обуславливают уменьшение доли эрозии в нейтральной фазе (в виде капель и атомов нейтрального пара), наблюдаемое в эксперименте при росте давления газа.

Одним из важнейших параметров, характеризующих прикатодные процессы вакуумной дуги, является падение напряжения на разрядном промежутке. Зависимости падения напряжения U_o от давления газа для титанового катода приведены на рис. 12.

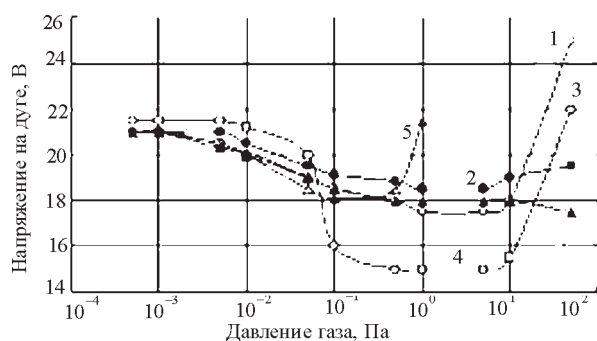


Рис. 12. Зависимость падения напряжения на дуге с титановым катодом от давления газа ($I_o = 110$ А): 1 – N_2 ; 2 – Ar ; 3 – N_2 ; 4 – $(80\%Ar + 20\%O_2)$; 5 – C_2H_2 ; 1, 2, 4, 5 – $T_k = 390$ К, 3 – $T_k = 800$ К.

При росте давления газа в диапазоне $p \sim 10^{-3} \div 10^{-1}$ Па для ацетилена, $p \sim 10^{-3} \div 1$ Па для азота и аргона, а для смеси аргон-кислород – во всем исследуемом диапазоне давлений наблюдается уменьшение падения напряжения на разрядном промежутке. С повышением давления аргона выше ≈ 1 Па наблюдается небольшое увеличение U_o , стабилизирующееся при $p \approx 15$ Па. Наличие в системе ацетилена при $p \geq 5 \cdot 10^{-1}$ Па и азота при $p \geq 10$ Па вызывает скачкообразное увеличение U_o .

Падение напряжения на разрядном промежутке складывается из катодного падения, па-

дения напряжения на положительном столбе дуги и анодного падения потенциала. Изменение каждой составляющей с ростом p может иметь различный характер и, следовательно, по-разному влиять на характер кривых $U_o(p)$. Оценка величины катодного падения производилась измерением напряжения на короткой дуге. При этом использовался анод в виде диска с отверстием, в котором располагался цилиндрический катод. Торцевая поверхность катода совпадала с плоскостью диска, а ширина кольцевого зазора между анодом и катодом составляла 1 мм. На практике роль этого диска выполнял дополнительный анод источника плазмы с автостабилизацией катодного пятна. Зависимость падения напряжения на короткой дуге от давления газа для титанового катода (рис. 13) свидетельствует о том, что уменьшение скорости эрозии при росте давления газа сопровождается уменьшением катодного падения.

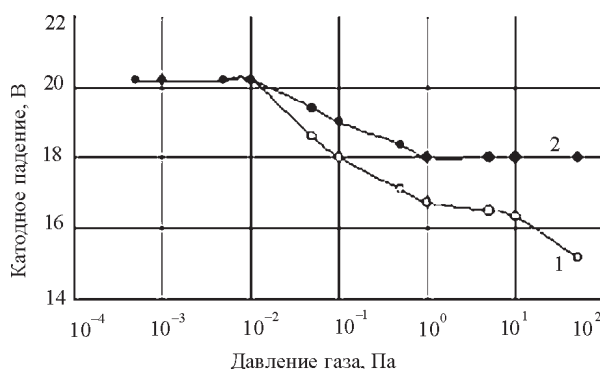


Рис. 13. Катодное падение от давления газа: 1 – N_2 , 2 – Ar .

Эта взаимосвязь объясняется тем, что катодное падение при постоянном токе дуги является количественной характеристикой электрической энергии, потребляемой разрядом и расходуемой на испарение катодного материала [28]. Для системы титан-аргон, характеризующейся независимостью χ от p , влияние газа на U_o существенно меньше и может быть связано с наличием примесей химических активных газов в аргоне.

Сравнение кривых $U_o(p)$, получаемых для всего разрядного промежутка (рис. 12) и короткой дуги (рис. 13) указывает на то, что уменьшение падения напряжения на разряде, наблюдаемое с ростом давления газа в диа-

пазоне давлений $p \sim 10^{-3} \div 1$ Па, связано с уменьшением величины катодного падения, обусловленного образованием соединений титана на поверхности катода. Уменьшение U_d особенно существенно для горячего катода (рис. 12), эффективность образования нитрида титана на котором выше, чем в случае холодного катода.

Рост U_d при $p \geq 10^{-1}$ Па для ацетилена и при $p \geq 1$ Па для азота и аргона обусловлен процессами в столбе дуги и в прианодной области разряда [29].

Прямой эксперимент по оценке влияния пленки нитрида титана на скорость эрозии катода и падение напряжения в вакуумной дуге проводился при горении разряда на титановом катоде с покрытием из TiN толщиной около 10 мкм. Покрытие получали конденсацией потока титановой плазмы в разреженной атмосфере азота по методике, описанной в работе [30].

Коэффициент электропереноса, измеренный в вакууме около 10^{-3} Па, при токе дуги 125 А и времени горения разряда 240 с составил 24,6 мкг/К, что существенно ниже, чем для катода из чистого титана в высоком вакууме. (Для титана $\chi = 39$ мкг/К в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па). При этом падение напряжения на разряде было на $5 \div 6,5$ В меньше, чем на чистом титане.

Результаты измерений хорошо согласуются с данными для титанового катода при давлении азота 10^{-1} Па. Более значительного снижения χ и U_d не происходит из-за частичного отслаивания покрытий на ряде участков катода под воздействием катодного пятна дуги.

ВЛИЯНИЕ РАЗРЯДНОГО ТОКА

Зависимости коэффициентов электропереноса от тока дуги, полученные для источника плазмы с автостабилизацией катодного пятна в вакууме около $1 \cdot 10^{-3}$ Па и при давлении азота $p = 5$ Па представлены на рис. 14.

Для кривой $\chi(I_d)$, полученной в высоком вакууме, наблюдается монотонное увеличение χ с ростом I_d , причем при $I_d \geq 180$ А производная $d\chi/dI_d$ резко возрастает (кривая 1). Такой характер изменения χ в области

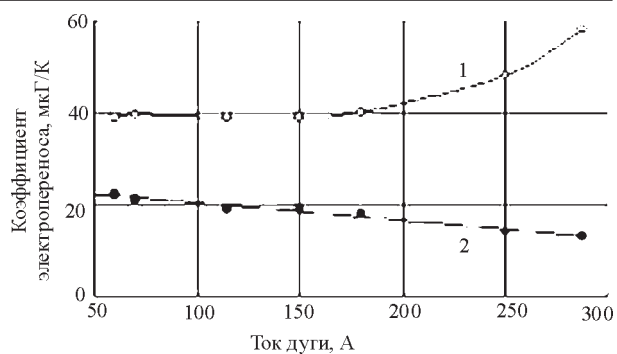


Рис. 14. Зависимости коэффициентов электропереноса от тока дуги с титановым катодом: 1 – $p = 10 \cdot 10^{-3}$ Па; 2 – $p_N = 5$ Па.

больших токов связан с общим перегревом катода. В связи с этим величина I_d , при которой наблюдается резкое увеличение χ , зависит от конкретных экспериментальных условий.

Небольшое увеличение коэффициента электропереноса при росте тока дуги в области токов $40 \div 180$ А может быть связано с локальным повышением температуры катода в окрестности катодных пятен, что согласуется с результатами работы [28]. В соответствии с ней данное явление связано с тем, что количество поступающего в катод тепла при росте I_d и постоянной плотности тока в катодном пятне пропорционально квадрату его радиуса. При росте I_d температура катода возрастает, вызывая рост χ . Увеличение χ при этом сопровождается ростом U_d , что также наблюдается в данной работе (рис. 15). Однако, увеличение U_d в наших экспериментальных условиях, одной из особенностей которых является значительная длина разрядного промежутка (~ 10 см), может происходить также и за счет роста напряжения на столбе дуги, как отмечалось в работе [31].

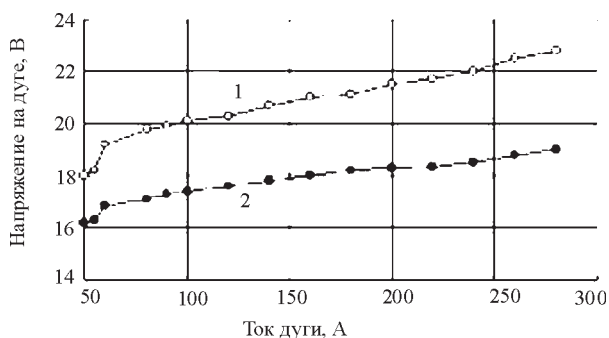


Рис. 15. Вольтамперные характеристики дуги с титановым катодом: 1 – $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па; 2 – $p_N = 5$ Па.

При наличии в системе азота характер зависимости $\chi(I_d)$ меняется: с ростом тока разряда наблюдается уменьшение коэффициента электропереноса (рис. 14, кривая 2). Это связано с повышением локальной и общей температуры катода, что, как отмечалось выше, способствует образованию на его поверхности нитрида титана, уменьшающего скорость эрозии катода. Образование TiN является причиной уменьшения падения напряжения на разряде (см. рис. 15, кривая 2), наблюдаемого при росте давления азота в системе. Уменьшение крутизны вольтамперной характеристики dU_d/dI_d при наличии азота в объеме разрядного промежутка также связано с повышением эффективности образования TiN на поверхности катода с ростом его температуры, наблюдаемом при увеличении тока разряда.

С ростом тока дуги, как в высоком вакууме, так и при наличии азота, линейно возрастает скорость хаотического движения катодного пятна (рис. 16).

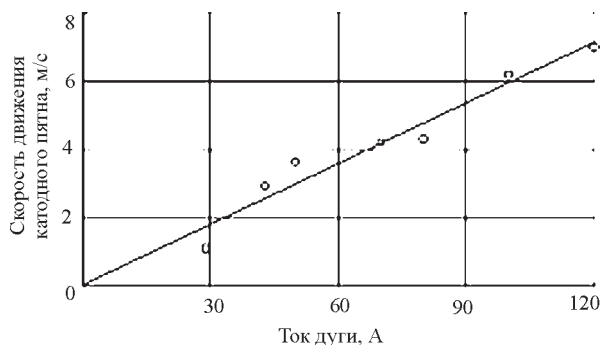


Рис. 16. Зависимость скорости движения катодного пятна от тока дуги.

При этом в диапазоне токов $30 \div 120$ А возможно одновременное существование двух катодных пятен. При токах дуги более 120 А вероятность одновременного существования двух катодных пятен близка к единице.

Вероятностный характер процесса деления катодных пятен наблюдается также для меди в работе [32]. При одновременном существовании на катоде двух пятен наблюдается уменьшение их скорости, причем при различных размерах катодных пятен большее пятно движется с большей скоростью. Это позволяет сделать заключение о том, что скорость катодного пятна прямо пропорциональна току

на пятно, а не общему току разряда. Измерение скорости движения катодных пятен при токах дуги свыше 120 А, когда на катоде существует не менее двух пятен, теряет смысл, вследствие неопределенности тока на пятно.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Влияние магнитного поля на эрозионные характеристики титанового катода вакуумной дуги исследовали в источнике плазмы с автостабилизацией катодного пятна и в источнике с магнитным удержанием катодного пятна. При проведении экспериментов с источником плазмы с автостабилизацией катодного пятна между катодным узлом источника плазмы и вакуумной камерой устанавливали магнитную катушку L_2 , корпус которой служил анодом разряда. Корпус катушки имел форму полого усеченного конуса, обращенного своим основанием к катоду.

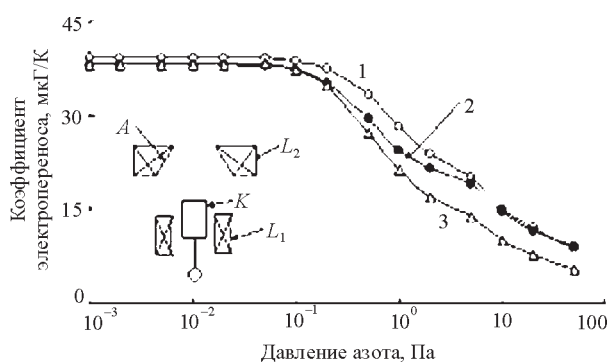


Рис. 17. Зависимость коэффициента электропереноса от давления азота для титанового катода в системе с магнитным полем; в левом нижнем углу — схематический чертеж экспериментальной установки: K — катод, A — анод, L_1 и L_2 — соленоиды. 1 — L_1 и L_2 выключены, 2 — включен соленоид L_1 , 3 — включен соленоид L_2 . $T_k = 340$ К, $I_d = 110$ А.

Из представленных на рис. 17 зависимостей кривая 1 получена без магнитного поля (соленоиды L_1 и L_2 выключены). Кривая 2 получена при горении дуги с включенной катушкой L_1 , охватывающей боковую поверхность катода и расположенную коаксиально с ним. Кривая 3 — при включенном соленоиде L_2 .

Величина магнитного поля, создаваемого соленоидом L_1 на поверхности катода составляет 30 Э. Это поле влияет на характер движения катодного пятна, смещая его от центра

к краям торца катода [33]. В этом случае обеспечивается равномерная эрозия всей рабочей поверхности катода, в то время как в случае отсутствия магнитного поля катод эродирует, в основном, в центральной части. Это обстоятельство связано с локализацией пятна в данной области катода под действием собственного магнитного поля дуги. Расширение области миграции катодного пятна под действием поля соленоида L_1 увеличивает время, за которое пятно обходит всю эродирующую поверхность катода. При этом уменьшается удельная тепловая нагрузка на поверхность катода, что в соответствии с [83] приводит к некоторому уменьшению скорости эрозии катода за счет уменьшения количества генерируемых капель (рис. 17, кривая 2 при $p \leq 5 \cdot 10^{-2}$ Па).

При наличии азота в объеме, расширение области миграции пятна приводит к увеличению промежутка времени, в течение которого на участках поверхности катода, не занятых пятном, происходит формирование включений нитрида титана и, следовательно, к росту содержания TiN на поверхности катода. Это обуславливает более существенное, по сравнению со случаем отсутствия магнитного поля на катоде, уменьшение скорости эрозии в диапазоне давлений $5 \geq p \geq 5 \cdot 10^{-2}$ Па.

При нахождении катодного пятна на включениях нитрида титана, уменьшается падение напряжения на разряде. Это приводит к тому, что при достаточной плотности включений TiN на поверхности катода в соответствии с принципом минимума Штеенбека дуга горит преимущественно на данном материале. Магнитное поле в этом случае не оказывает влияния на скорость эрозии катода. В наших условиях это имеет место при $p \geq 5$ Па (кривая 1 и кривая 2 на рис. 17 сливаются).

Соленоид L_2 создает магнитное поле $H \sim 100$ Э в объеме системы и $H \approx 30$ Э на поверхности катода. Влияние данного соленоида на характер движения катодного пятна, несмотря на отличие в структуре магнитных силовых линий в прикатодной области, аналогично влиянию поля соленоида L_1 [33]. Отличия кривых 2 и 3 на рис. 17 обусловлены процессами в объеме плазмы. Характер влия-

ния магнитного поля в объеме на скорость эрозии катода при образовании включений нитрида титана на его поверхности можно понять, если предположить, что в реакцию синтеза TiN вступают активированные частицы газа, а основным элементарным процессом, приводящим к активации азота в рассматриваемых экспериментальных условиях, является перезарядка ионов титана на молекулах газа. Это предположение представляется справедливым ввиду наличия в плазме вакуумной дуги большого количества многозарядных ионов [34], сечения перезарядки которых, в области малых энергий, могут существенно превышать газокинетические [35]. Образующиеся в результате перезарядки ионы азота, изменяют направление своего движения, при наличии в плазме электрических полей. В работе [36] показано, что при наличии внешнего магнитного поля, удовлетворяющего условию $\rho_i < \Lambda \ll \rho_e$ (ρ_i и ρ_e – ионный и электронный ларморовские радиусы, соответственно, Λ – характерный размер системы), в плазме вакуумной дуги возникает электрическое поле. Эквипотенциалами электрического поля являются магнитные силовые линии [37]. При использовании магнитного поля указанной выше геометрии в прикатодной области плазмы возникает компонент электрического поля, направленный к рабочей поверхности катода и ускоряющий ионы в данном направлении. При постоянном давлении газа в системе этот эффект приводит к увеличению потока активированных частиц на рабочую поверхность катода, что вызывает повышение эффективности синтеза TiN, образование которого определяет уменьшение эрозии катода в рассматриваемых условиях (см. рис. 17, кривая 3).

В экспериментах, проведенных с использованием источника плазмы с магнитным удержанием катодного пятна, исследовали влияние магнитного поля H_{ϕ} , создаваемого анодной катушкой, на скорость эрозии титанового катода в аргоне и в высоком вакууме. Поле катушки, стабилизирующей дугу на рабочем торце катода H_{cm} было постоянным и составляло 150 Э.

Установлено, что используемые на практике поля $H_\phi \leq 50$ Э не оказывают существенного влияния на удельную эрозию катода. Заметное уменьшение с наблюдается в полях $\sim 100 \div 150$ Э (рис. 18).

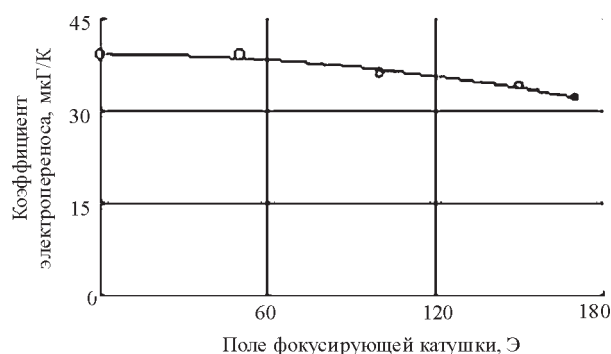


Рис. 18. Зависимость коэффициента электропереноса от напряженности магнитного поля фокусирующей катушки.

Уменьшение χ связано с отражением частиц от электромагнитной “пробки”, образуемой в аноде источника плазмы в случае, если $H_{ст}$ и H_ϕ – величины одного порядка. Эффективному отражению частиц способствует также повышение напряжения на разряде, значительная часть которого, как показано выше, приходится на положительный столб дуги.

В присутствии в вакуумной камере аргона скорость эрозии повышается в области давлений газа $5 \cdot 10^{-3} \div 1$ Па (рис. 19).

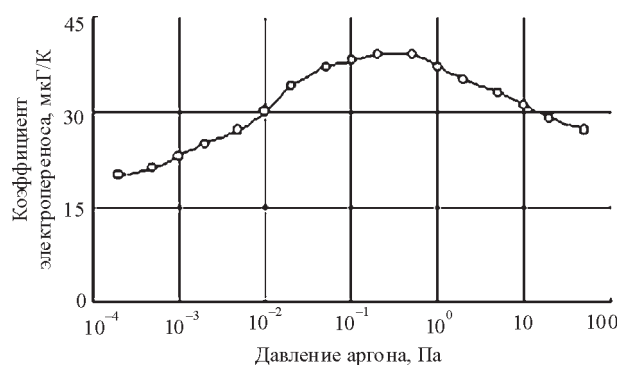


Рис. 19. Зависимость коэффициента электропереноса от давления аргона ($H_\phi = 150$ Э).

Это связано, как будет показано в последующих разделах, с разрушением потенциального рельефа в аноде за счет столкновений электронов с частицами газа [35]. При этом ухудшается магнитная изоляция стенок анода, что ведет к снижению напряжения на разряде. В области давлений $p \geq 1$ Па происходит

уменьшение χ за счет возврата частиц на катод, обусловленное столкновениями ионов с атомами аргона.

ВЫВОДЫ

- 1) Значения коэффициентов электропереноса для стационарной вакуумной дуги и для импульсных или квазистационарных разрядов близки в случае интенсивного охлаждения катодов. Повышение интегральной температуры катодов ведет к росту эрозии за счет увеличения генерации частиц в виде капель и нейтральных атомов катодного материала.
- 2) Наличие газа в объеме разрядного промежутка стационарной вакуумной дуги в диапазоне давлений $\sim 10^{-3} \div 10$ Па влияет на скорость эрозии катода; влияние особенно существенно в случае химически активной пары металл – газ.
- 3) Характер влияния интегральной температуры катода на его удельную эрозию в присутствии химически активного газа определяется механизмом сорбции напускаемого газа катодной поверхностью.
- 4) Подаваемый в объем разрядного промежутка азот содержится на катодной поверхности в виде химического соединения газа с материалом катода.
- 5) При наличии газовых смесей в объеме разрядного промежутка определяющее влияние на эрозию катода оказывает компонент смеси, наиболее эффективно сорбируемый катодной поверхностью.
- 6) Уменьшение скорости эрозии титанового катода в азоте и в ацетилене сопровождается уменьшением величины катодного падения.
- 7) Влияние разрядного тока на эрозионные характеристики разряда связано с локальным и общим перегревом поверхности катода.
- 8) Скорость хаотического движения катодного пятна составляет величину порядка $1 \div 10$ м/с, что существенно меньше его значений для импульсных и квазистационарных разрядов, и прямо пропорциональна величине тока на пятно.

- 9) Магнитное поле в прикатодной области и в объеме плазмы изменяет характер зависимости скорости эрозии катода от давления газа, характер влияния определяется величиной и структурой магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башаров Р., Гавриловская Е.Н., Малкин О.А., Трехов Е.С. Исследование катодных пятен импульсного разряда между параллельными электродами //ЖТФ. – 1965. – Т.35, Вып. 10. – С. 1853-1853.
2. Kimblin C.W. Anode phenomena in vacuum and atmospheric pressure arcs//IEEE Transactions on plasma science.– 1974.– Vol. PS-2, № 12.– P. 310-319.
3. Зыкова Н.М., Канцель В.В., Раховский В.И., Селиверстова И.Ф., Устинец А.П. Динамика развития катодной и анодной областей электрической дуги. 1. Исследование поведения катодных и анодной областей при пониженных давлениях и в вакууме//ЖТФ. – 1970.– Т. 40, Вып. 11. – С. 2361-2367.
4. Daalder J.E. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arc//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1975.– Vol. 8, № 14. – P. 1647-1659.
5. Juttner B. Cathode phenomena with arcs and breakdown in vacuum//Beitrag Plasmaphysik. – 1981.–Bd. 21, h. 2. – P. 217-232.
6. Achert J., Altucher B., Juttner B. et.al. Influence of surface contaminations on cathode processes in vacuum discharges//Beitrag Plasmaphysik. – 1977.– Bd. 17. h. 6. – P. 419-431.
7. Хороших В.М. Катодный узел электродугового источника плазмы. В сб. Вопросы атомной науки и техники, физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение//1998.– В. 3(69), 4(70). – С. 250-254.
8. Аксенов И.И., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. – 83 с.
9. Kimblin C.W. Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs//J. Appl. Phys.– 1973.– Vol. 44, № 7. – P. 3074-3081.
10. Rakhovskii V.I. Experimental study of the dynamics of cathode apots developaent//IEEE Transactions on Plasma Science. – 1976. – Vol. PS-4, № 2.– P. 81-102.
11. Rondeel W.G.J. Cathodic erosion in the vacuum arc//Phys. D: Appl. Phys. – 1973. – Vol. 6, №14. – P. 1705-1711.
12. Reece M.P. The vacuum switch. Part I. Properties of the vacuum arc //Proc. IEE.– 1963.– Vol. 110, № 4. – P. 793-811.
13. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М., Брень В.Г. Исследование эрозии катода стационарной вакуумной дуги// Препринт ХФТИ 84-6, М., ЦНИИАтоминформ, 1984.
14. Аксенов И.И., Брень В.Г., Коновалов И.И. и др. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. II. Влияние интегральной температуры катода//ТВТ. – 1983.– Т. 21, № 4. – С. 646-651.
15. Мальцев М.В. Термическая обработка тугоплавких, редких металлов и их сплавов.– М.: Metallurgiya, 1974. – 344 с.
16. Cobine J.P., Vanderslise T.A. Erosion of electrodes and gas eduction in vacuum arcs//IEEE Trans. Commun. and Electron.– 1963, № 66.– P. 240-246.
17. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М.: Энергия, 1971.– 276 с.
18. Emtage P.R. Interaction of the cathode spot with low pressure of ambient gas//J. Appl. Phys.– 1975.– Vol. 46, № 9. – P. 3809-3816.
19. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. – М.: Metallurgiya, 1976. – 768с.
20. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Першин В.Ф., Шпилинский Л.Ф. Об эрозии катода дуги низкого давления//ТВТ. – 1986. – Т. 26, № 3. – С. 441-444.
21. Вол А.Н. Строение и свойства двойных металлических систем.Т. 1. – М.: Физматгиз, 1959. – 528 с.
22. Аксенов И.И., Брень В.Г., Падалка В.Г., Хороших В.М. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы //ЖТФ. – 1978. – Т. 48, Вып. 6. – С. 1165- 1169.
23. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники.– М.: Мир, 1964. – 892 с.
24. Бакай А.С., Стрельницкий. Структурные и физические свойства углеродных конденсатов, полученных осаждением потоков быстрых частиц// Обзор. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. – 96 с.
25. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 287 с.
26. Плюто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг //ЖЭТФ. – 1964. – Т. 47, № 2. – С. 494-507.
27. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.И. Исследование некоторых характеристик плазмы

- вакуумной металлической дуги. II//ЖТФ. – 1977. – Т. 47. Вып. 7. – С. 1491-1495.
28. Lapshin V.I., Nekrashevitch I.G. The connection of cathode drop with vacuum arc electrode erosion//Proc. 7-th Intern. Symp. on Discharges and Electric Insul. in Vacuum. Novosibirsk. – 1976. – P. 321-322.
29. Спитцер Л. Физика полностью ионизованного газа. – М.: Изд-во иностран. лит., 1957. – 291 с.
30. Аксенов И.И., Антуфьев Ю.П., Брень В.Г., Падалка В.Г., Попов А.И., Хороших В.М. Влияние замагниченности электронов плазмы вакуумной дуги на кинетику реакций синтеза нитридсодержащих покрытий//ЖТФ.– 1981. – Т. 51, Вып. 2. – С. 303-309.
31. Аксенов И.И., Брень В.Г., Осипов В.А. и др. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. I. Формирование потоков плазмы//ТВТ. – 1983. – Т. 21, № 2. – С. 214-220.
32. Diakov B.E., Holmes R. Cathode spot structure and dynamics in low-current vacuum arcs//J. Phys. D.: Appl. Phys. – 1974. – Vol. 7, № 4. – P. 569-580.
33. Аксенов И.И., Андреев А.А. О движении катодного пятна вакуумной дуги в неоднородном магнитном поле//Письма в ЖТФ. – 1977. – Т. 3, Вып. 23. – С. 1272-1275.
34. Mitchell G.R. High current vacuum arcs. Part I. An experimental study //Proc. IEE. – 1970. – Vol. 117, № 12. – P. 2315-2326.
35. Хастед Дж. Физика атомных столкновений.– М.: Мир, 1965. – 862 с.
36. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. – 83 с.
37. Морозов А.И. Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях//ДАН СССР. – 1965. – Т. 163, Вып. 6. – С. 1363-1367.

**ЕРОЗИЯ КАТОДА І ВИТРАТА МАСИ
КАТОДНОГО МАТЕРІАЛУ У
СТАЦІОНАРНІЙ ДУЗІ НИЗЬКОГО
ТИСКУ**

Хороших В.М.

Наведено результати досліджень стаціонарної вакуумної дуги на твердих металевих катодах, що горять у присутності різних газів в обсязі розрядного проміжку. Дані стосуються вимірів швидкості катодної плями, визначенню коефіцієнтів електропереносу, вимірюванню іонного струму й оцінці величини катодного падіння.

**CATHODIC EROSION AND THE
CATHODIC MASS LOSSES IN
STEADY-STATE LOW-PRESSURE
ARC DISCHARGE**

Khoroshikh V.M.

The investigations results of steady-state vacuum arc on solid metal cathodes are have been introduced. The dates concerns of the arcs which burns in presence of variant gasses in discharge ambient. Particularities of cathode processes have been studied. Main factors influencing upon the velocity and nature of cathodic erosion were determined