

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА КАТОДАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В.В.Васильев, А.В.Григорьев, И.В.Гурин, В.А.Гурин, В.М.Зуев, А.О.Омаров, В.Е.Стрельницкий, В.М.Топорков*

*Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт», г.Харьков, Украина*

Приведено результаты досліджень стабільності вакуумно-дугового розряду на катодах з різних графітових матеріалів. Зроблено припущення, що основною причиною погіршення стабільності дугового розряду на графітових катодах і зменшення вихідного струму іонів є збільшення теплопровідності графітових матеріалів. Уперше виявлено, що на катодах ГСП катодна пляма переміщується по робочій поверхні катода стрибками, зупиняючись на досить тривалий час на піроуглецевій структурній складовій графітового матеріалу з утворенням глибоких кратерів. Виявлено, що при зупинках катодної плями дуги вихідний струм іонів зменшується в міру поглиблення кратера, а падіння напруги на дузі зростає. При цьому відсутня видима емісія макрочасток. Високотемпературна обробка катодів ГСП робить графітовий матеріал гомогенним. Переміщення катодної плями дуги в цьому випадку не відрізняється від промислових графітів - КП переміщується рівномірно без істотних зупинок, що різко знижує імовірність утворення кратерів і робить ерозію катода рівномірною.

Показано, що зі збільшенням розмірів закритих пір чи розмірів зерна графітового порошку в катодах ГСП стабільність дугового розряду зменшується. Зроблено припущення, що при визначених розмірах порошку графіту і концентрації піроуглеродної компоненти можна мінімізувати емісію макрочасток з поверхні катода.

Приведены результаты исследований стабильности вакуумно-дугового разряда на катодах из различных графитовых материалов. Сделано предположение, что основной причиной ухудшения стабильности дугового разряда на графитовых катодах и уменьшения выходного тока ионов является увеличение теплопроводности графитовых материалов. Впервые обнаружено, что на катодах ГСП катодное пятно дуги перемещается по рабочей поверхности катода скачками, останавливаясь на довольно продолжительное время на пироуглеродной структурной составляющей графитового материала с образованием глубоких кратеров. Обнаружено, что при остановках катодного пятна дуги выходной ток ионов уменьшается по мере углубления кратера, а падение напряжения на дуге растёт. При этом отсутствует видимая эмиссия макрочастиц. Высокотемпературная обработка катодов ГСП делает графитовый материал однородным. Перемещение катодного пятна дуги в этом случае не отличается от промышленных графитов – КП перемещается равномерно, без существенных остановок, что резко снижает вероятность образования кратеров и делает эрозию катода равномерной.

Показано, что с увеличением размеров закрытых пор или размеров зерна графитового порошка в катодах ГСП стабильность дугового разряда уменьшается. Сделано предположение, что при определенных размерах порошка графита и концентрации пироуглеродной компоненты можно минимизировать эмиссию макрочастиц с поверхности катода.

Investigations of the vacuum-arc stability on cathodes from different graphite materials are given. It was made an assumption that the main reason of worsening of an electric-arc stability on graphite cathodes and decreasing of an ion current output is increasing of graphite materials thermal conductivity. For the first time it was revealed, that on cathodes from graphite combined by pyrocarbon (GCP) the cathode spot of an arc moves on the cathode working face with jumps stopping on rather long time on the pyrocarbon structural component of a graphite material with formation of deep craters. It was revealed, that during the cathode spot (CS) stop the output ion current is diminished as far as the crater depth increasing, and the arc voltage drop grows. Visual macroparticles emission under these conditions was absent. The high-temperature annealing of GCP cathodes makes a graphite material homogeneous. The CS moving in this case did not differ from industrial graphite – CS moved uniformly without essential stopping, that sharply reduces probability of the craters formation and makes cathode erosion uniform.

It was shown, that with increasing of the enclosed pore sizes or graphite dust sizes the electric arc stability is diminished for cathodes from GSP. It was made assumption, that under certain graphite dust sizes and pyrocarbon component concentration one can minimized macroparticles emission from the cathode surface.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумно-дуговой разряд с расходуемым катодом в настоящее время нашёл широкое применение в технологиях получения различных покрытий (защитных, декоративных, оптических, полупроводниковых, резистивных и т.п.). На поверхности катода разряд локализуется в виде так называемых катодных пятен, размеры которых лежат в пределах от нескольких мкм до нескольких десятков мкм. Высо-

кая концентрация энергии в области катодного пятна приводит к взрывному испарению материала катода, его ионизации и ускорению до средних энергий  $\sim (25 \dots 30)$  эВ [1]. Катодное пятно дуги эмитирует высокоскоростные плазменные струи со скоростью  $\sim 10^4$  м/сек, имеющие степень ионизации, близкую к 100 %. Высокая степень ионизации вещества позволяет легко управлять интенсивностью потока и энергией ионизованных частиц на обрабатываемые

поверхности изделий, создать на них покрытия с заданными физико-химическими свойствами. Особенно привлекательным выглядит использование вакуумно-дугового разряда для синтеза углеродных алмазоподобных покрытий (УАП), получаемых в условиях фильтрации электродуговой плазмы от макрочастиц. По своим механическим характеристикам синтезируемые покрытия приближаются к алмазу и могут успешно использоваться в качестве защитных покрытий в различных областях науки и техники. Однако для широкого использования электродугового метода получения УАП в промышленности необходимо решить ряд проблем, связанных со стабильностью горения дуги на графитовом катоде и уменьшением количества эмитируемых макрочастиц. В настоящее время в литературе отсутствуют какие-либо данные, касающиеся влияния материала графитовых катодов на стабильность дугового разряда.

Целью данной работы является исследование влияния материала графитового катода на стабильность дугового разряда при минимальной эмиссии макрочастиц, что крайне важно для практических целей.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов использовался вакуумно-дуговой источник плазмы с автостабилизацией катодного пятна дуги на рабочей поверхности катода. Схематическое изображение данного источника приведено на рис.1. Для изменения величины и конфигурации магнитного поля на торцевой поверхности катода в данных экспериментах использовалась дополнительная катушка 12, размещенная вокруг стабилизирующей катушки 4.

Наблюдение за перемещением катодного пятна на рабочей поверхности катода осуществлялось через смотровое окно с помощью зеркала, установленного внутри вакуумной камеры, напротив катода, под соответствующим углом по отношению к смотровому окну. В качестве рабочего газа использовался аргон (Ar). Стабильность горения дуги измерялась по числу погасаний в единицу времени при различных давлениях газа Ar в вакуумной камере, токах дуги и параметрах магнитного поля (осевой  $H_z$  и

радиальной  $H_r$  компонент) в области торцевой поверхности катода. Измерения магнитного поля проводились в трёх точках по радиусу торца катода. Торцевая поверхность катода в рабочем положении устанавливалась на расстоянии 4...5 мм от отверстия вспомогательного анода. Для проведения экспериментов были использованы три различных конфигурации магнитного поля на рабочей поверхности катода. Данные измерений  $H_r$  и  $H_z$  компонент напряженности магнитного поля приведены в табл.1.

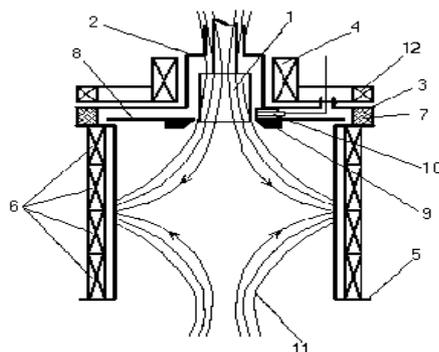


Рис.1. Источник с автостабилизацией катодного пятна использовавшийся в данных исследованиях  
1 - катод, 2 - экранирующий корпус, 3 - фланец, 4 - стабилизирующая катушка, 5 - анод, 6 - анодные магнитные катушки, 7 - электроизолирующая прокладка, 8 - вспомогательный анод, 9 - магнитный концентратор, 10 - высоковольтный узел поджига, 11 - силовые линии магнитного поля, 12 - дополнительная магнитная катушка

Катод имел форму цилиндра диаметром 60 мм и изготавливался из различных марок промышленного графита и промышленного графита, пропитанного пироуглеродом, по методу, описанному в работах [2-4], а также порошка графита, связанного пироуглеродом (ГСП) [5]. Пропитка промышленных графитов, а также порошков графита увеличивает плотность и, следовательно, теплопроводность, а также улучшает механические характеристики. Характеристики графитовых материалов, используемых в качестве катодов, представлены в табл.2.

Таблица 1.

Конфигурация МП	I		II		III	
	$I_{ст.к.}=0,7A, I_{доп.к.}=0$		$I_{ст.к.}=0,7A; I_{доп.к.}=6A$		$I_{ст.к.}=0,7A; I_{доп.к.}=9A$	
r, мм	$H_r, Э$	$H_z, Э$	$H_r, Э$	$H_z, Э$	$H_r, Э$	$H_z, Э$
0	0	57	0	67	0	73
15	5	54	6	64	8	70
30	8	40	12	49	12	52

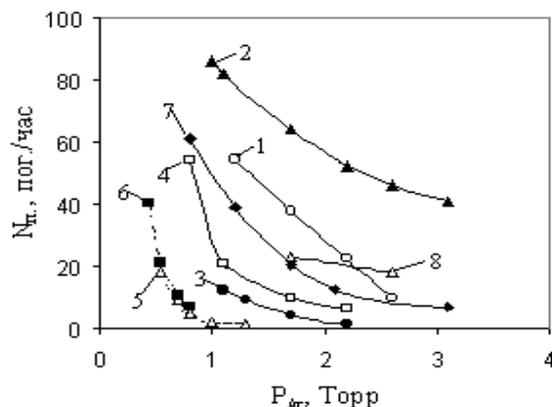
Таблица 2

МАТЕРИАЛ ГРАФИТОВОГО КАТОДА	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная электропроводность, мк Ом·м	Размер зерен, мкм	Открытая пористость, %
МГА	1,65	-	0...63	
МГ	1,69	15	0...63	19
МГ, уплотненный пироуглеродом	1,87	15	0...63	8,83
ЭГ-0	1,65	8...10	1...3 мм	
(ГСП) ЭГ-0	1,75	30	0...630	
ГСП (ЭГ-0)	1,64	30	0...63	
(ГСП) ЭГ-0, ВТО при 2700 °С 15 мин.	1,65	18	0...630	

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### 3.1. Влияние давления газа на стабильность дугового разряда

На рис. 2 показаны зависимости частоты погасаний дуги на графитовых катодах, выполненных из семи различных графитовых материалов для фиксированных параметров магнитного поля в области рабочей поверхности катода. Видно, что с уменьшением давления газа, в частности Ar, в вакуумной камере стабильность дугового разряда ухудшается (растёт частота погасаний дуги) для всех, используемых в данных экспериментах, графитовых катодах. Наилучшими, с точки зрения стабильности дугового разряда, в исследуемом диапазоне давлений газа яв-



ляются катоды, изготовленные из промышленного мелкопористого графита марок МГ и МПГА (см. кривые 5,6).

Рис. 2. Зависимости частоты погасания дуги от давления Ar для катодов, изготовленных из различных марок графита,  $I_0=100A$ ,  $I_{ст.к.}=0,5A$ ,  $I_{доп.к.}=4,5A$ :

1 – ГСП,  $\rho=1,64$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(0...630)$ мкм; 2 – ЭГ-0 (пром.),  $\rho=1,57$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(1...3)$ мм; 3 – ГСП,  $\rho=1,75$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(0...63)$ мкм; 4 – ГСП,  $\rho=1,63$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(0...63)$ мкм; 5 – МПГА; 6 – МГ (пром.); 7 – МГ (пром.), пропитанный пироуглеродом, 8 – ЭГ-0 (пром.) пропитанный пироуглеродом,  $\rho=1,81$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(1...3)$ мм

Увеличение размеров пор за счёт увеличения размеров зерна графита приводит к резкому увеличению частоты погасаний дуги. В качестве примера на рис. 2 (кривая 2) показана зависимость частоты погасания дуги на промышленном крупнозернистом

электродном графите ЭГ-0. Размер графитовых зёрен в нём составляет величину 1...3 мм. Пропитка графита ЭГ-0 пироуглеродом приводит к уменьшению размеров пор и к увеличению стабильности дугового разряда (кривая 8). На этом же рисунке приведены зависимости частот погасаний дуги для катодов из графита ГСП различной плотности, выполненных на основе порошка графита ЭГ-0 разной зернистости. Видно, что с уменьшением размеров пор за счёт уменьшения размеров зёрен используемого для изготовления ГСП порошка графита ЭГ-0, а также при увеличении плотности материала ГСП стабильность дугового разряда возрастает (см. кривые 1, 4, 3 соответственно).

#### 3.2. Влияние величины и конфигурации магнитного поля на стабильность дугового разряда

На рис. 3,а,б приведены зависимости частоты погасания дуги от величины тока в дополнительной магнитной катушке  $I_{доп.}$  при фиксированном токе в стабилизирующей катушке  $I_{ст.к.}$  (см. рис.1) для различных графитовых материалов, полученных на основе порошков графита ЭГ-0 для двух фиксированных давлений газа (Ar). При токе  $I_{доп.к.}=6$  А и  $I_{ст.к.}=0,7$  А на торцевой поверхности катода реализуется конфигурация магнитного поля, обеспечивающая перемещение катодного пятна дуги по всей рабочей поверхности катода. При этих условиях стабильность дугового разряда для большинства катодов из ГСП ухудшается. При дальнейшем увеличении тока в дополнительной катушке  $I_{доп.к.}$  от 6 А до 9 А стабильность дугового разряда для различных графитовых материалов ведет себя по-разному в зависимости от давления газа в вакуумной камере. Например, для катодов с большим размером зерен и, следовательно, с более крупными закрытыми порами стабильность разряда улучшается, особенно для катодов ГСП, при давлениях газа  $P \geq 2 \cdot 10^{-4}$  Торр (см. рис. 3,б. С уменьшением давления  $P$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  Торр эта тенденция может нарушаться для ГСП низкой плотности ( $\rho \leq 1,63$  г/см<sup>3</sup>), полученных на основе графитового порошка ЭГ-0 с фракциями зёрен 0...63 мкм (см. рис. 3,а, кривая 4).

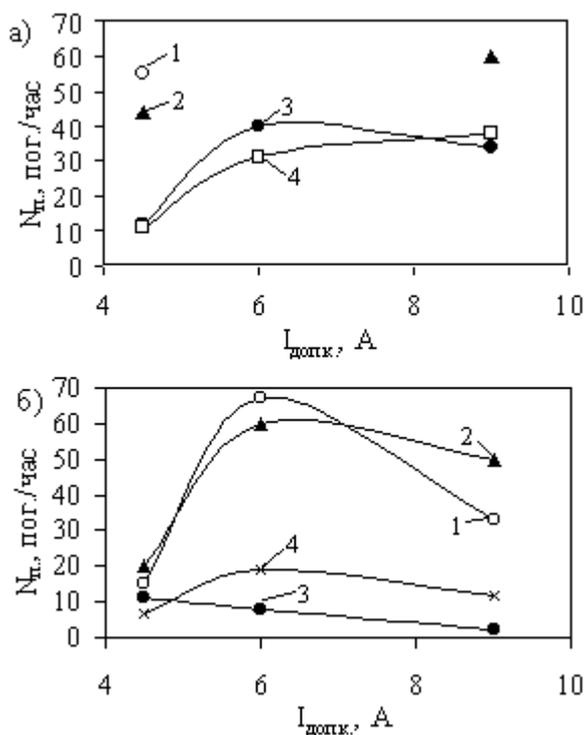


Рис. 3. Зависимости частоты погасания дуги от тока дополнительной катушки,  $I_0=100\text{A}$ ,  $I_{\text{ст.к.}}=0,75\text{A}$ .

- 1 – ГСП,  $\rho=1,64 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots630)\text{мкм}$ ;
  - 2 – ЭГ-0 (пром.),  $\rho=1,57 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(1\dots3)\text{мм}$ ;
  - 3 – ГСП,  $\rho=1,75 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots63)\text{мкм}$ ;
  - 4 – ГСП,  $\rho=1,63 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots63)\text{мкм}$ ;
- а)  $P = (1\dots1,2) \cdot 10^{-4} \text{Торр}$ ; б)  $P = (2\dots2,2) \cdot 10^{-4} \text{Торр}$ ;

Из рис. 3,б видно, что с увеличением размеров зёрен графита для катодов из ГСП стабильность дугового разряда возрастает с увеличением тока в дополнительной магнитной катушке и, следовательно, с увеличением тангенциальной составляющей магнитные поля (см. табл.1), приводящей к увеличению ретроградной скорости перемещения катодного пятна дуги в периферийной области рабочей поверхности катода.

### 3.3 Влияние величины и конфигурации магнитного поля на скорость эрозии катода

На рис. 4 приведены зависимости скорости эрозии катодов из четырёх различных графитовых материалов от величины тока в дополнительной магнитной катушке. Из приведенных зависимостей видно, что увеличение тока в дополнительной катушке до величины  $I_{\text{доп.к.}}=6 \text{ A}$ , обеспечивающее перемещение катодного пятна дуги по всей рабочей поверхности катода, приводит к резкому уменьшению скорости эрозии катодов ГСП с более высокой плотностью (рис. 4, кривая 3) либо с большим размером зёрен (кривая 1). При дальнейшем увеличении  $I_{\text{доп.к.}}$  до 9 А скорость эрозии катода слабо изменяется. Кроме того, из рис. 4 видно, что для катодов ГСП с малым размером зёрен графита (кривая 4)

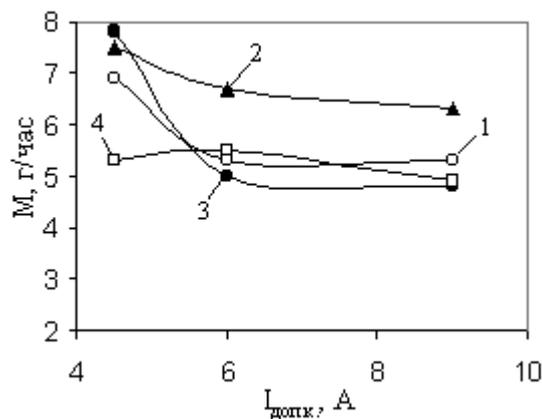


Рис. 4. Зависимости потерь массы катодами из различных марок графита при различных токах дополнительной катушки  $I_0=100\text{A}$ ,  $I_{\text{ст.к.}}=0,7\text{A}$ :  
 1 – ГСП,  $\rho=1,64 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots630)\text{мкм}$ ;  
 2 – ЭГ-0 (пром.),  $\rho=1,57 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(1\dots3)\text{мм}$ ;  
 3 – ГСП,  $\rho=1,75 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots63)\text{мкм}$ ;  
 4 – ГСП,  $\rho=1,63 \text{ г/см}^3$ ,  $d=(0\dots63)\text{мкм}$ .

уменьшение скорости эрозии катода происходит при больших токах  $I_{\text{доп.к.}}$ .

### 3.4. Влияние состава графитового материала на характер перемещения катодного пятна дуги и параметры дугового разряда

Визуальные наблюдения за перемещением катодного пятна (КП) дуги показали, что КП на катодах из ГСП, в отличие от промышленных сортов графита, перемещается скачкообразно, останавливаясь на отдельных участках рабочей поверхности катода от одной до нескольких секунд, а затем, быстро перемещаясь на расстояния от одного до нескольких миллиметров, вновь останавливается и т.д. При этом во время неподвижного существования КП и во время его перемещения резко изменяются характер эмиссии макрочастиц, давление газа в вакуумной камере, а также параметры дугового разряда и выходной ток ионов.

Весь процесс перемещения катодного пятна условно можно разбить на 3 стадии с тремя характерными временными интервалами  $\Delta t$ :

I стадия – катодное пятно находится в неподвижном состоянии и видимый поток макрочастиц с поверхности катода отсутствует  $\Delta t \sim 2\dots4 \text{ сек}$ . Напряжение на дуге по мере углубления кратера растёт от 30 до 50 В.

II стадия – переходная  $\Delta t < 1 \text{ сек}$  (сопровождается интенсивной эмиссией макрочастиц и скачком давления газа). При этом напряжение на дуге уменьшается от 50 до 25 В.

III стадия – перемещение КП (характеризуется малым падением напряжения на дуге (25...30) В, уменьшением тока дуги (на 5...10 А), эмиссией макрочастиц и увеличением выходного тока ионов).

Количественные характеристики этого процесса приведены в табл. 3.

Таблица 3

Стадия №	Падение напряжения на дуге, В	Ток дуги, А	Выходной ток ионов на коллектор, А	$P_{\Sigma}, 10^{-4}$ Торр	Видимый поток макрочастиц	$\Delta t$ сек
1	30...40	105	1...0,4	3	Нет	2÷4
	40...50	110	0,4...0,2	3	Нет	
2	50...25	110...100	0,2...2,4	3,4	Есть	<1
3	25...35	100...105	2,4...1,6	3	Есть	≤4

Следует отметить, что, несмотря на случайные направления перемещения КП дуги, общая тенденция его ретроградного перемещения за интервал времени, намного больший, чем максимальный период перехода от неподвижного состояния КП к подвижному и обратно, сохраняется.

В процессе движения КП дуги, в результате его последовательных остановок, рабочая поверхность катода покрывается серией глубоких лунок, что ухудшает со временем стабильность дугового разряда. При высокотемпературной обработке (ВТО) катода ГСП происходит графитизация пироуглеродной составляющей, сопротивление катода снижается до величины промышленного графита (см. табл.1). Характер перемещения КП и эрозия рабочей поверхности катода при этом меняется. КП, как и в случае промышленных графитов, перемещается более равномерно и с большей средней скоростью по всей поверхности катода без существенных задержек. Рабочая поверхность катода эродирует равномерно. Однако стабильность дугового разряда в этом случае ухудшается по сравнению с катодом без ВТО (см. рис. 5, кривые 3,5). Аналогичное ухудшение стабильности дугового разряда наблюдалось и при испытаниях промышленного графита ЭГ-0 с размером зёрен 1...3 мм (см. рис. 5, кривые 3,4).

На рис. 6,а,б,в приведены фотографии рабочих поверхностей катодов ГСП без ВТО (рис. 6,а,б) и после ВТО (рис. 6,в). На рис. 6,а видны следы эрозии в виде глубоких кратеров, образовавшихся в результате остановок КП в этих местах. На рис. 6,б видны одиночные следы эрозии на краю рабочей поверхности после непродолжительной работы катода. Максимальный диаметр кратеров не превышает 1 мм, а глубина изменяется от 0,5 мм до 1,5 мм. Эродирующая поверхность катода после ВТО имеет более гладкий вид, кратеры практически отсутствуют (рис. 6,в). Это свидетельствует о том, что КП перемещается по графитовой фазе практически без остановок в отличие от случая с присутствием пироуглеродной фазы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных выше результатов видно, что стабильность дугового разряда на графитовых катодах зависит от его состава (количества графитовой и пироуглеродной фаз), размеров графитовых зёрен и удельной плотности графитового материала, а также от внешних факторов (давление газа в вакуумной

камере, величины и конфигурации магнитного поля на рабочей поверхности катода). Эксперименты показывают, что все эти факторы существенным образом влияют как на скорость и характер перемещения КП по рабочей поверхности катода, так и на скорость эрозии графитового материала.

Основываясь на результатах, полученных в данной работе, а также на результатах работ, опубликованных ранее другими авторами, касающихся скорости перемещения КП дуги и скорости эрозии катода от величины тангенциальной составляющей магнитного поля для различных марок промышленного графита, отличающихся размером графитовых зёрен и пористостью [7], можно предположить, что основной причиной, влияющей на стабильность дугового разряда, является размер и количество закрытых пор. Наличие открытой пористости графитового материала, как было показано в [8], не приводит к каким-либо перемещениям КП по поверхности катодного материала.

В связи с тем, что размер пор и их количество зависит от размеров графитовых зёрен и плотности катодного материала, то качественно вместо таких параметров как размеры и количество закрытых пор,

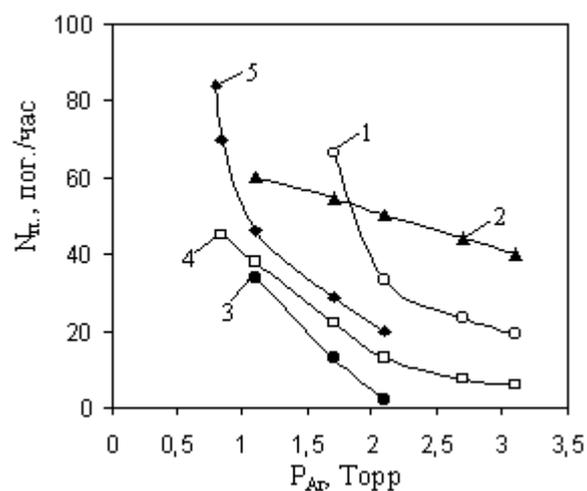


Рис.5. Зависимости частоты погасания дуги от давления  $Ar$  для катодов, изготовленных из различных марок графита  $I_{\theta}=100A$ ,  $I_{см.к.}=0,7A$ ,  $I_{дон.к.}=9A$ :

1 – ГСП,  $\rho=1,64$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(0...630)$ мкм; 2 – ЭГ-0 (пром.),  $\rho=1,57$  г/см<sup>3</sup>,  $d=(1...3)$ мм; 3 – ГСП,  $\rho=1,75$

г/см<sup>3</sup>, d=(0...63)мкм; 4 – ГСП, ρ=1,63 г/см<sup>3</sup>, d=(0...63)мкм; 5 – ВТО ГСП, ρ=1,75 г/см<sup>3</sup>, d=(0...63)мкм

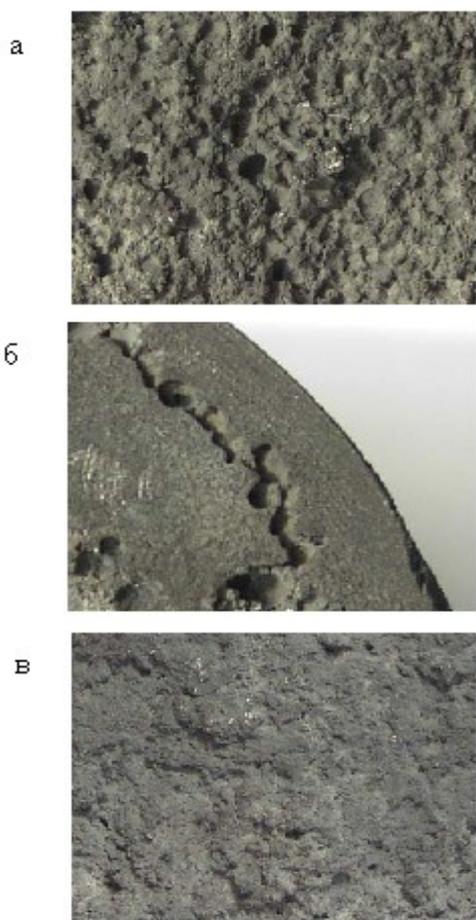


Рис. 6. Рабочие поверхности катодов ГСП без ВТО (а, б) и после ВТО (в)

можно использовать другие два параметра, а именно: зернистость и плотность графитового материала. Чем меньше размер зерна, тем меньше и размеры закрытых пор. Чем ниже плотность графитового материала, тем больше их количество. Адекватность такой замены параметров подтверждается сопоставлением свойств графитовых материалов, приведенных в [7].

Пропитка промышленных графитовых материалов пироуглеродом уменьшает только открытую пористость. При этом часть открытых пор превращается в закрытые поры, но меньших размеров [9]. Это приводит к тому, что в результате увеличения количества закрытых пор стабильность дугового разряда на промышленных графитовых материалах, пропитанных пироуглеродом, уменьшается [9].

Создание графитовых материалов на основе порошков промышленных или природных графитов различной зернистости путем связывания их пироуглеродом позволяет получать более прочные графитовые материалы ГСП как за счёт увеличения в них пироуглеродной составляющей, так и за счёт уменьшения открытой пористости. Результаты экспериментов показывают, что скорость эрозии таких

графитовых материалов существенно уменьшается по сравнению с промышленными графитами, в основном, за счёт уменьшения эмиссии макрочастиц (см., например, рис. 4, кривые 1,2).

Характер перемещения катодного пятна по поверхности катода коренным образом отличается от характера его перемещения для катодов из промышленных графитов. КП останавливается на пироуглеродной структурной компоненте графитового материала ГСП. В результате такой остановки в области КП образуется кратер. Находясь на дне кратера КП не может самостоятельно выйти из него, т.к. всегда стремится двигаться к месту токоподвода [10]. Таким местом для катодного пятна является дно кратера. Можно предположить, что механизмом, способным вытолкнуть КП дуги из образованного им кратера, является газ, содержащийся в закрытых порах ниже дна кратера. Оценки показывают, что при нагревании газа, содержащегося в закрытой поре, до температуры  $T > 3000^\circ\text{K}$ , давление в ней может превысить давление над КП.

Согласно [11] давление в области КП на графитовом катоде составляет приблизительно  $10^6$  Па, а температура  $T$  в зоне КП  $T = 4600$  К. При этих условиях, согласно фазовой диаграмме [11], углерод существует в жидкой фазе. Если давление газа в закрытой поре в процессе его нагрева превысит прочность графитового материала, например, пироуглерода, отделяющего жидкую фазу углерода от границы поры с учётом давления над КП, то происходит прорыв газа из поры и выброс КП из кратера. При этом одновременно идет эмиссия макрочастиц, преимущественно в жидкой фазе [11]. Давление в камере при этом резко увеличивается (см. табл. 3). Одновременно с увеличением глубины кратера растёт напряжение на разряде от 25 до 50 В. Это, по-видимому, может облегчать поджиг дуги на поверхности катода в непосредственной близости от кратера во время прорыва газа.

В зависимости от размера пор интенсивность таких выбросов может быть различной и приводит к перемещению КП от кратера на расстояние от 1 до нескольких мм или к погасанию дуги, если пора достаточно крупная (см. рис. 6,б).

Выше было отмечено, что размеры закрытых пор пропорциональны размерам зёрен графитового порошка, используемого в качестве основы для катодов ГСП. Поэтому можно адекватно утверждать, что с увеличением размеров зёрен графитового порошка стабильность дугового разряда уменьшается (см. рис. 2, 5, кривые 1, 4).

На этих же рисунках видно, что стабильность дугового разряда на всех графитовых материалах в исследуемом диапазоне давлений газа ( $A_r$ ) уменьшается с уменьшением давления  $A_r$ . Причём наиболее резкое ухудшение стабильности дугового разряда для двухкомпонентных и однокомпонентных графитовых материалов наблюдается при различных давлениях  $A_r$ . В частности, для катодов, содержащих пироуглеродную структурную компоненту, – в диапазоне давлений  $P \geq (2...2,2) \cdot 10^{-4}$  Торр, а для од-

нокомпонентных графитовых материалов – при  $P \geq (1...1,2) \cdot 10^{-4}$  Торр (см. рис. 5, кривые 1,3,4 и 2,5 соответственно). При этом с уменьшением величины магнитного поля (с уменьшением тока в дополнительной катушке) значения этих давлений смещаются в меньшую сторону (см. рис. 2). Этот факт указывает на то, что с увеличением величины магнитного поля (радиальной составляющей) в области рабочей поверхности катода при заданной величине тока дуги уменьшается тепловая нагрузка в области катодного пятна дуги. В результате этого уменьшается и количество испаряемого с катодного пятна дуги вещества, необходимого для поддержания дугового разряда при данном токе разряда. При фиксированном напряжении на источнике питания дуги разрядный ток уменьшается. Катодное падение потенциала возрастает, однако, не настолько, чтобы восполнить потерю тока дуги. В этом случае стабильность дугового разряда нарушается, если КП дуги случайно переместилось в область катода с большим значением тангенциальной составляющей магнитного поля.

Увеличение давления Ar восстанавливает тепловую нагрузку в области КП дуги. Поэтому, несмотря на увеличение скорости перемещения КП, стабильность дугового разряда также восстанавливается.

Аналогичный уменьшению давления газа эффект проявляется и при увеличении теплопроводности графитового материала, в частности, в результате пропитки его пироуглеродом, приводящей к уменьшению открытой пористости (см. рис. 2, кривые 6, 7).

Чем выше теплопроводность графитового материала, тем больше давление Ar, необходимо для восстановления температуры в области КП дуги, обеспечивающей стабильность дугового разряда на том же уровне, что и для материала с меньшей теплопроводностью.

Для анализа рассмотренных процессов в зоне КП дуги и оценки доли ионного тока  $S$ , возвращаемого на катод для поддержания соответствующей температуры в КП, можно воспользоваться известной формулой для теплового потока  $Q_k$ , поступающего в тело катода, [12]

$$Q_k = I[s(a_i U_k + U_i) - \phi] + Q', \quad (1)$$

где  $\phi$  – работа выхода;  $Q'$  – тепловой поток неучтенных процессов;  $U_i$  – потенциал ионизации вещества в зоне КП дуги;  $U_k$  – катодное падение потенциала,  $S = I_i/I$  – составляющая полного тока  $I = I_c + I_i$ ,  $a_i$  – коэффициент аккомодации.

Минимальное значение  $S_{\min}$  можно определить, приравняв теплоотвод  $Q_k$  нулю. Если не учитывать подвод тепла со стороны столба дуги  $Q'$ , то

$$S_{\min} = \frac{\phi}{a_i U_k + U_i} \quad (2)$$

Для  $\phi \approx 4,5$  В (углерод),  $a_i = 1$ ,  $U_k = 20$  В,  $U_i = 11,3$  В получим  $S_{\min} = 0,14$ .

Для “холодного” катода наиболее вероятным механизмом эмиссии электронов является термоавтоэмиссия, в котором большую роль играют бомбар-

дировка поверхности катода ионами испаряемого материала в области КП. Исходя из условия воспроизводства ионов и учитывая затраты энергии на вырывание автоэлектрона, получаем:

$$S_{\max} = \frac{U_k - \phi}{a_i U_k + U_i - \phi} \quad (3)$$

Принимая для оценки те же значения  $\phi$ ,  $U_k$ ,  $a_i$  и  $U_i$ , получаем  $S_{\max} = 0,578$ .

Эта величина может быть увеличена, если допустить наличие малого коэффициента аккомодации  $a_i$ .

Во всех случаях, при любом типе катода, имеется ограничение на величину ионного тока, возвращаемого на катод, определяемого величиной тока насыщения из условия стопроцентной ионизации паров материала катода в зоне, примыкающей к КП.

Добавка в разряд Ar приводит к уменьшению значения  $S_{\max}$  из-за более высокого значения потенциала его ионизации ( $U_i = 15,5$  В). Однако Ar имеет большое число метастабильных уровней, что позволяет достаточно легко ионизировать его, повышая тем самым плотность плазмы в разряде. Это увеличивает бомбардировку поверхности катода в области катодного пятна, что повышает стабильность дугового разряда, наблюдаемую в экспериментах.

Уменьшение теплопроводности графитового материала приводит к уменьшению  $S$  и, следовательно, к увеличению стабильности дугового разряда.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Выяснены основные причины, влияющие на стабильность дугового разряда на различных графитовых материалах.

2. Сделано предположение, что основной причиной ухудшения стабильности дугового разряда на графитовых катодах и уменьшения выходного тока ионов является увеличение теплопроводности графитовых материалов.

3. Впервые обнаружено, что на катодах ГСП катодное пятно дуги перемещается по рабочей поверхности катода скачками, останавливаясь на довольно продолжительное время на пироуглеродной структурной составляющей графитового материала с образованием глубоких кратеров.

4. Обнаружено, что при остановках катодного пятна дуги выходной ток ионов уменьшается по мере углубления кратера, а падение напряжения на дуге растёт. При этом отсутствует видимая эмиссия макрочастиц.

5. Сделано предположение, что выход катодного пятна дуги из кратера осуществляется в результате вырывания газа из закрытых пор, находящихся под катодным пятном дуги, и сопровождается интенсивным выбросом макрочастиц и, одновременно, резким увеличением выходного ионного тока. Возрастание напряжения на дуге до 50 В способствует возбуждению катодного пятна на поверхности катода вблизи кратера.

6. Высокотемпературная обработка катодов ГСП делает графитовый материал гомогенным. Переме-

щение катодного пятна дуги в этом случае не отличается от промышленных графитов – КП перемещается равномерно, без существенных остановок, что резко снижает вероятность образования кратеров и делает эрозию катода равномерной.

7. Показано, что увеличение напряжённости магнитного поля в области рабочей поверхности катода приводит к уменьшению скорости его эрозии, причём наибольший эффект достигается для катодов ГСП с более высокой плотностью.

8. Показано, что с увеличением размеров закрытых пор или размеров зерна графитового порошка в катодах ГСП стабильность дугового разряда уменьшается.

9. Экспериментально показано, что наибольшая стабильность дугового разряда для различных внешних условий реализуется для графитовых катодов, выполненных из промышленного графита марки МГ и МГА с размерами пор, не превышающими 68 мкм.

10. Сделано предположение, что при определенных размерах порошка графита и концентрации пироуглеродной компоненты можно минимизировать эмиссию макрочастиц с поверхности катода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.И.Аксёнов, В.Г.Падалка, В.М.Хороших. Исследование плазменного потока, генерируемого стационарным эрозионным электродуговым ускорителем с магнитным удержанием катодного пятна. // *Физика плазмы*, 1979г., т.5, вып.3, с.607–612.
2. V.F.Zellenskij, V.A.Gurin, I.V.Gurin. Gasphase impregnation by a pyrocarbon of the porous mediums by a methods of a radially driven pyrolysis zone // *Twenty-Fourth Biennial Conference on Carbon, Lightsey Conference Center, Charleston USA*, 1999, p.50–51.
3. V.A.Gurin, I.V.Gurin, V.V.Kolosenko, Yu.E.Murin. Researches on the development of gasphase methods of carbon-carbon items manufacturing // *Twenty-Fourth Biennial Conference on Carbon, Lightsey Conference Center, Charleston USA*, 1999, p.662–663.
4. В.Ф.Зеленский, В.А.Гурин, Ю.Ф.Конотоп, Н.П.Одейчук. Графит ГСП // *Вопросы атомной науки и техники*, 1999, №4 (76), с.67–78.
5. В.А.Гурин, И.В.Гурин, Ю.Е.Мурин, С.Г.Фурсов, В.В.Колосенко, А.А.Корнеев, Н.П.Одейчук, А.Н.Букулов. Некоторые особенности реализации метода движущейся зоны пиролиза при газофазном уплотнении пористых наполнителей пироуглеродом // *Вопросы атомной науки и техники*, 19981, №№ 1(67)–2(68), с.76–78.
6. Munther Kandah and Jean-Luc Meunier. Vacuum arc cathode spot movement on various kinds of graphite cathodes // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1996, v.5, p.349–355.
7. Munther Kandah and Jean-Luc Meunier. Erosion Study on Graphite Cathodes Using Pulsed Vacuum Arcs // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1996, v.24, No.2, p.523–527.
8. M.Chhowalla, M.Weiler, C.A.Davis, B.Kleinsorge and G.A.J. Amaratunga. Deposition of smooth tetrahedral amorphous carbon thin films using a cathodic arc without a macroparticle filter // *Appl. Phys. Lett.* 1995, 67(7), p.894–896.
9. В.В.Васильев, И.В.Гурин, В.А.Гурин, А.О.Омаров, В.Е.Стрельницкий, В.М.Топорков. Исследование влияния структурных и электрофизических характеристик материала графитовых катодов на стабильность вакуумно-дугового разряда // *Сборник докладов 5-го Международного симпозиума “Алмазные плёнки родственных материалов”* 22-27 апреля 2002 г., Харьков, Украина, с. 111–115.
10. И.И.Аксёнов, С.А.Смирнов. Газоразрядные коммутаторы низкого давления // *ИТЭ*, 1972, №3, с.269–270.
11. Munther Kandah and Jean-Luc Meunier, Study of microdroplet generation from vacuum arcs on graphite cathodes // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1995, A13(5), Sep./Oct., p. 2444–2450.
12. М.Ф.Жуков, В.Я.Смоляков, Б.А.Урюков. *Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны)*, М.: «Наука», 1973, с.149–163.