

## ХАРАКТЕР РАБОТЫ ГРАФИТОВЫХ КАТОДОВ С ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ДУГОВОГО РАЗРЯДА



*А. О.Омаров, В.В.Васильев, В.Е.Стрельницкий*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
61108, г. Харьков, ул. Академическая,1, Украина*

Произведено сравнение характера горения дугового разряда на катодах из отобранных марок графита. Определена применимость статистической методики описания стабильности горения дугового разряда на металле для случая дугового разряда на графитовых катодах.

### ВВЕДЕНИЕ

В 70-х годах прошлого столетия получил широкое применение в промышленности вакуумно-дуговой метод (ВДМ) нанесения различных многофункциональных покрытий как металлических, так и неметаллических, а также сложных композитных покрытий. В настоящее время интерес к данному методу возрос в связи с появлением эффективных источников фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы [1], что, в свою очередь, открывает большие возможности по использованию ВДМ для синтеза более высококачественных покрытий, обладающих не только высокими трибологическими свойствами, но и высокими защитными характеристиками из-за резкого уменьшения количества дефектов в покрытии. В частности, данный метод является достаточно эффективным и привлекательным для синтеза углеродных алмазоподобных покрытий.

В основе ВДМ лежит генерирование сверхзвуковых плазменных струй с катодных пятен вакуумно-дугового разряда, возбуждаемых на поверхности интегрально-холодного катода. Степень ионизации вещества в генерируемой плазме достигает 100%, что позволяет управлять интенсивностью потока и энергией ионизованных частиц при их осаждении и формировать покрытия с заданными физико-химическими свойствами [2]. Наиболее перспективными, с практической точки зрения, являются алмазоподобные углеродные покрытия, обладающие высокой твердостью, близкой к алмазу, низким коэффициентом трения, высокой химической стойкостью и высокой оптической прозрачностью в инфракрасной области спектра.

Однако для широкого применения ВДМ в данном направлении необходимо решить ряд проблем, связанных с особенностями распыления графитовых катодов электрической дугой.

В настоящее время дуговой разряд на графитовых катодах ещё слабо изучен по сравнению с дугой на металлических катодах. В литературе практически отсутствуют данные, определяющие зависимость стабильности горения разряда с графитового катода от структурных и физико-механических характеристик графита, для различных внешних условий (давления газа в вакуумной камере, тока дуги, параметров магнитного поля на поверхности катода и т. п.). Промышленно

изготавливаемый графит имеет широкий диапазон различных друг от друга физических свойств, в связи с различной ориентацией кристаллитов, величиной и количеством пор, размером зерен, электропроводностью и плотностью, что оказывает значительное влияние на стабильность дугового разряда на графитовых катодах.

В работах [3, 4] проводились исследования зависимости усредненной частоты погасания дугового разряда на графитовых катодах от их физических и структурных характеристик. Обнаружены некоторые закономерности, влияющие на стабильность дугового разряда. Однако для более полного их изучения исследования необходимо продолжить, что очень важно для создания новых технологий получения графитовых катодных материалов, обеспечивающих высокую стабильность дугового разряда.

В данной работе предложена альтернативная методика обработки ранее полученных результатов, основанная на среднестатистическом определении времени горения дуги для катодов, выполненных из различных графитовых материалов в зависимости от давления газа (аргона) в вакуумной камере.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов использовался вакуумно-дуговой источник плазмы с автостабилизацией катодного пятна дуги на рабочей поверхности катода. Схема данного источника приведена на рис. 1. В качестве рабочего газа использовался аргон.

Стабильность горения дуги определялась по числу погасаний в единицу времени при фиксированных давлении аргона в вакуумной камере, токе дуги и параметрах магнитного поля (осевой  $H_z$  и радиальной  $H_r$  компонент) в области рабочей поверхности катода. Ранее нами проводились измерения осевой ( $H_z$ ) и радиальной ( $H_r$ ) компонент магнитного поля в трех точках по радиусу рабочего торца катода для трех различных конфигураций магнитного поля у рабочей поверхности катода [5]. Для данных измерений была выбрана конфигурация, указанная в табл. 1, как наиболее оптимальная для равномерной эрозии рабочей поверхности катода. Это важно как для стабильности технологического процесса, так и для эффективности использования материала катода.

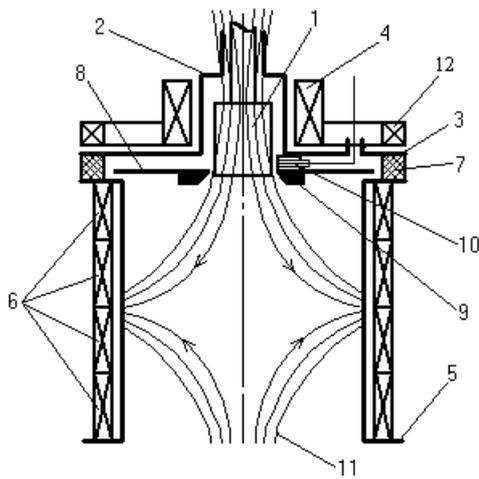


Рис 1. Источник электродуговой плазмы с автостабилизацией катодного пятна:

1 – катод; 2 – корпус; 3 – фланец; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – анод; 6 – анодные магнитные катушки; 7 – изолятор; 8 – вспомогательный анод; 9 – магнитный концентратор; 10 – высоковольтный узел поджига; 11 – силовые линии магнитного поля; 12 – дополнительная магнитная катушка

Катод 1 (см. рис. 1) выполнен в форме цилиндра диаметром 60 мм, изготавливался из различных марок промышленного графита, характеристики которых приведено в табл. 2.

Для выяснения природы погасаний дуги на графитовых катодах устанавливался характер распределения интервалов времени  $t_i$  от момента возбуждения разряда до его спонтанного погасания, аналогично тому, как это делалось для металлических ка-

тодов в работах Кесаева И. Г. с сотрудниками [6]. Обнаружено, что для графитовых катодов, так же как и для металлических, распределение этих интервалов достаточно хорошо описывается функцией:

$$N_i = N e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – число отсчетов с продолжительностью разряда, превышающей то или иное значение временного интервала  $t$ ;  $N$  – полное число отсчетов за все время измерения;  $T$  – средняя продолжительность горения разряда.

Из уравнения (1) и первоначальных данных продолжительностей дугового разряда, использованных в работах [3, 4] для определения среднеарифметического времени горения дугового разряда  $T_a(\text{Ar})$ , определялось среднестатистическое время горения дугового разряда  $T(P_{\text{Ar}})$  и сравнивалось с  $T(P_{\text{Ar}})$ .

Таблица 1

Расстояние от центра катода $r$ , мм	$N_r$ , Э	$N_z$ , Э
0	0	73
15	8	70
30	12	52

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны зависимости продолжительности горения вакуумно-дугового разряда с графитовых катодов различных марок (табл.2) от давления аргона в вакуумной камере, рассчитанные по двум вышеприведенным методикам для данных, полученных в работе [3,4]. Для катодов из графита марок МПГА и ГСП при давлении газа больше  $1 \cdot 10^{-4}$  Торр погасаний дугового разряда не зафиксировано.

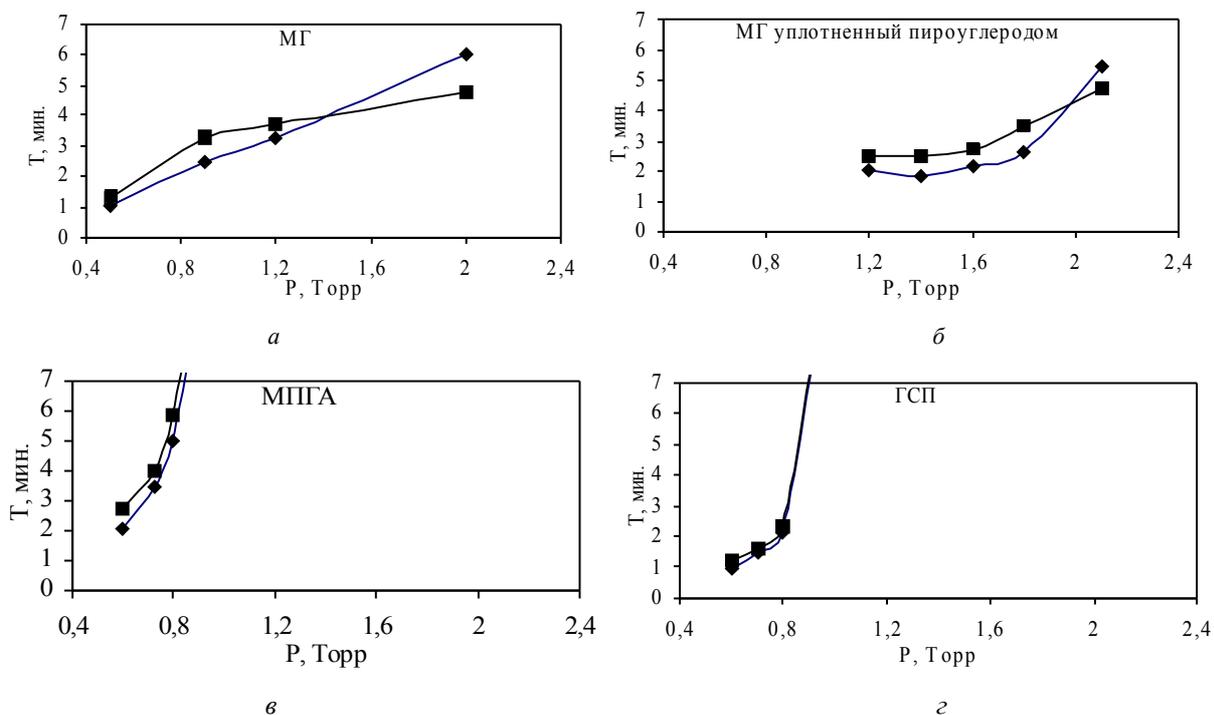


Рис. 2. Зависимость среднего времени горения дуги  $T$  от рабочего давления в камере  $P \times 10^4$ :  $\blacklozenge$  – расчет по методике [6] из функции (1);  $\blacksquare$  – расчет среднеарифметических временных интервалов горения дугового

разряда  $T_a(P_{Ar})$ . Катод из графита марки МГ (а); катод из графита марки МГ уплотненный пироуглеродом (б); катод из графита МПГА (в); катод из графита марки ГСП (г)

Таблица 2

Материал графитового катода	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная электропроводность, мкОм · м	Открытая объемная пористость, %	Размер зерен, мкм
МПГА	1.65	9	-	0...63
МГ	1.69	9...15	19	0...63
МГ уплотненный пироуглеродом	1.87	9...15	8.83	0...63
ГСП	1.91	20	10	0...63

Как видно из рис.2, обе методики дают одну и ту же закономерность изменения среднего времени дугового разряда  $T$  для различных графитовых материалов от давления аргона  $P_{Ar}$ , несмотря на некоторые отклонения (в пределах точности измерений) абсолютных значений  $T(P_{Ar})$ .

### ВЫВОДЫ

Показано, что для графитовых катодов, выполненных из различных графитовых материалов, применимо среднестатистическое описание длительности дугового разряда. Среднестатистическое время горения дугового разряда мало отличается от среднеарифметического.

Поэтому для тестирования графитовых катодов на стабильность дугового разряда применима методика определения среднеарифметического времени горения дугового разряда.

### 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*. 1979, т. 5, в.3, с. 607-612.
2. И.И.Аксёнов, В.Г.Падалка, В.Г.Толок, В.М.Хороших. Экспериментальное исследование плаз-

мооптической фокусировки потока металлической плазмы // *Источники и ускорители плазмы*. Харьков: изд-во ХАИ, 1978, в.3, с.5-55.

3. 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 пленки и пленки родственных материалов»*, 22-27 апреля 2002 г., Харьков, с. 111-115.
4. В. В. Васильев, А. В. Григорьев, И. В. Гурин, В. А. Гурин, В. М. Зуев, А. О. Омаров, В. Е. Стрельницкий, В. М. Топорков. Исследование стабильности вакуумно-дугового разряда на катодах из различных графитовых материалов // *ВАНТ. Серия: «Физ. рад. повреждений и рад. материаловедение» (81)*. 2002, №3, с. 122-129.
- а) 5. И. И. Аксёнов, В. В. Васильев, А. О. Омаров, В. Е. Стрельницкий. Влияние магнитного поля на форму эродирующей поверхности графитового катода // *Труды 15 Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Алушта, Крым, 2002 г.
6. Кесаев И. Г. *Катодные процессы электрической дуги*. М.: «Наука», 1968, с.78-95.

## ХАРАКТЕР РОБОТИ ГРАФІТОВИХ КАТОДІВ З ПІДВИЩЕНОЮ СТАБІЛЬНІСТЮ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ

*А.О.Омаров, В.В.Васильєв, В.Є.Стрельницький*

Проведено порівняння характеру горіння дугового розряду на катодах з відібраних марок графіту. Визначена прийнятність методики опису характеру горіння дугового розряду на металі у випадку дугового розряду на графітових катодах.

## THE CHARACTER OF GRAPHITE CATHODES WORK WITH ENHANCED STABILITY OF ARC DISCHARGE

*Omarov A. O., Vasil'ev V. V., Strel'nitskij V. E.*

In this work the comparison of arc discharge burning character on the cathodes of the selected marks of graphite is made. The applicability of a technique of the description of arc category burning character on metal is determined in case of the arc discharge on graphite cathodes.