

В. Л. Найдек, А. В. Наривский, И. Н. Тарасевич, Н. И. Тарасевич, О. О. Токарева,  
В. В. Федоров, И. В. Корниец

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Стойкость графитовых электродов при разной электрической мощности плазмотрона косвенного действия

Представлены данные о стойкости графитовых анода и катода в зависимости от величины тока в плазмотроне.

**Ключевые слова:** плазмотрон, графит, катод, анод, эрозия, потеря массы электродом, сила тока

Срок эксплуатации металлургических плазмотронов во многом зависит от стойкости электродов. Наиболее надёжными при работе в окислительной среде являются термохимические катоды. Такие катоды изготавливают в виде цилиндрических вставок из циркония или гафния, запрессованных в медную обойму. Повышенную стойкость термохимических катодов обеспечивают тугоплавкие плёнки из нитридов и оксидов [1], которые образуются в результате взаимодействия циркония и гафния с воздухом при высоких температурах. Увеличить ресурс работы плазмотронов можно быстрой заменой изношенных электродов за счёт увеличения массы. Также в плазмотронах можно применять дешёвые расходоуемые электроды.

Для изготовления электродов в плазмотронах перспективным материалом является графит [2, 3], который имеет хорошие электро- и теплопроводность, высокую термостойкость. При температурах 2300–2800 К удельная прочность графита выше, чем других известных материалов. Основным недостатком графита является повышенное окисление его при работе в атмосферных условиях. Так, при нагреве электрическим током на воздухе до температуры 3450–3500 К, масса графита уменьшается со скоростью 0,08–0,10 г/с [4]. Для уменьшения окисления в графит вводят кремний, фосфор и другие добавки. Простым способом защиты графита от окисления является пропитка его соединениями фосфора или водным раствором азотнокислого аммония с последующей сушкой изделий при температуре ~640 К [5]. Следует также учитывать, что при обработке сплавов заглубленными в расплав плазмотронами графитовые электроды окисляются меньше, чем на воздухе.

В настоящей работе исследования проводили на плазмотроне косвенного действия с водоохлаждаемым корпусом и подвижным электродом (рис. 1). Определяли потерю массы электродами (плотный графит МПГ-7 (ТУ 48-20-50-84)) при разной величине тока в дуге плазмотрона. Подвижный электрод перемещается по вертикали с помощью червячного привода с реверсивным электродвигателем, который подключен к блоку управления (на рис. 1 не показан). С помощью этого блока и электродвигателя поддер-

живали постоянное расстояние между электродами в процессе работы плазмотрона. Величину тока дуги в плазмотроне задавали с помощью блока управления.

Износ электродов определяли при работе плазмотрона с катодами разного (10, 20 и 30 мм) диаметра, которые устанавливали в подвижном электроде. Для уменьшения окисления анод защищали от контакта с воздухом втулкой из графита. Потери массы катодом и анодом определяли при постоянном межэлектродном расстоянии 35 мм, расходе аргона 8 л/мин и напряжении дуги ~60 В, которое подавали на плазмотрон от выпрямителя тока ВПР-600. Электроды взвешивали после работы плазмотрона в течение 5 мин на разных токах. Для каждой установленной величины тока проводили по три испытания и определяли среднее значение потерь массы электродами (табл. 1).

Определили, что с повышением тока в плазмотроне потеря массы катодом увеличивается. Так, за

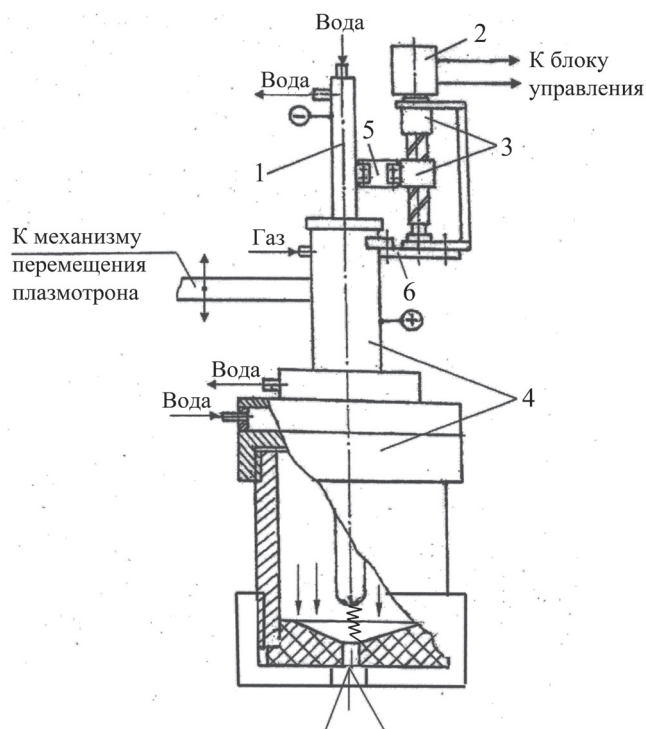


Рис. 1. Схема плазмотрона: 1 – подвижный электрод; 2 – реверсивный электродвигатель; 3 – червячный привод; 4 – корпус плазмотрона; 5 – вставка-изолятор; 6 – пластина

Износ графитовых электродов при разных значениях тока в плазмотроне

Ток дуги в плазмотроне, А	Потери массы электродами, г					
	катодом			анодом		
	диаметр, мм			диаметр, мм		
	10	20	30	10	20	30
150	$\frac{0,38}{1,91}$	$\frac{0,12}{0,48}$	$\frac{0,03}{0,21}$	6,0	2,5	0,5
200	$\frac{0,55}{2,55}$	$\frac{0,2}{0,64}$	$\frac{0,15}{0,28}$	11,8	6,2	1,7
300	$\frac{0,71}{3,82}$	$\frac{0,34}{0,96}$	$\frac{0,21}{0,42}$	17,6	9,6	3,2
350	-	-	-	20,1	11,4	4,3
375	-	-	-	21,0	11,7	-
400	$\frac{0,90}{5,09}$	$\frac{0,42}{1,27}$	$\frac{0,28}{0,57}$	21,4	11,5	5,3
450	-	-	-	19,1	9,0	5,7
500	$\frac{1,04}{6,37}$	$\frac{0,52}{1,59}$	$\frac{0,34}{0,71}$	17,4	8,5	5,4
550	$\frac{1,1}{7,0}$	$\frac{0,58}{1,75}$	$\frac{0,36}{0,78}$	15,7	-	5,2
575	-	-	-	15,2	7,5	5,0
600	$\frac{1,22}{7,64}$	$\frac{0,65}{1,91}$	$\frac{0,38}{0,85}$	14,8	7,2	4,8

Примечание: числитель – потери массы катодом, г; знаменатель – плотность тока в катод, А/мм<sup>2</sup>

5 мин работы износ катодов диаметром 20 и 30 мм при повышении тока дуги от 200 до 600 А увеличивается в 2-3 раза (от 0,15 ... 0,2 до 0,38 ... 0,65 г), что соответствует скорости потери массы 0,05 ... 0,10 г/мин. За это время масса катода диаметром 10 мм уменьшается от 0,55 до 1,22 г (0,13...0,14 г/мин). Повышенный износ катодов меньшего диаметра можно объяснить более высокими значениями плотности тока, который проходит через них.

При разных токах в плазмотроне масса анода уменьшается более интенсивно по сравнению с катодами. С повышением тока дуги до 300 А эрозия анода увеличивается практически по линейной зависимости (рис. 2). Максимальные потери массы анодом в плазмотроне с катодами разного диаметра наблюдаются при токах 350-400 А (рис. 3). По мере дальнейшего увеличения силы тока в плазмотроне износ анодов замедляется. Так, за 5 мин работы плазмотрона с катодом диаметром 20 мм при повышении тока от 400 до 600 А потери массы анодом уменьшаются на 4,0-4,5 г (от 11,5 до 7,2 г). При таком же увеличении тока дуги износ анода в плазмотроне с катодом ( $\varnothing = 10$  мм) снижается более, чем на 30 % (от 21,4 до 14,8 г).

Уменьшение износа анода при повышенных значениях тока обусловлено стабильностью горения дуги в плазмотроне. Наблюдения за прикатодной зоной в плазмотроне через смотровое окно (рис. 4) показали, что при токах до 350 А электрическая дуга пере-

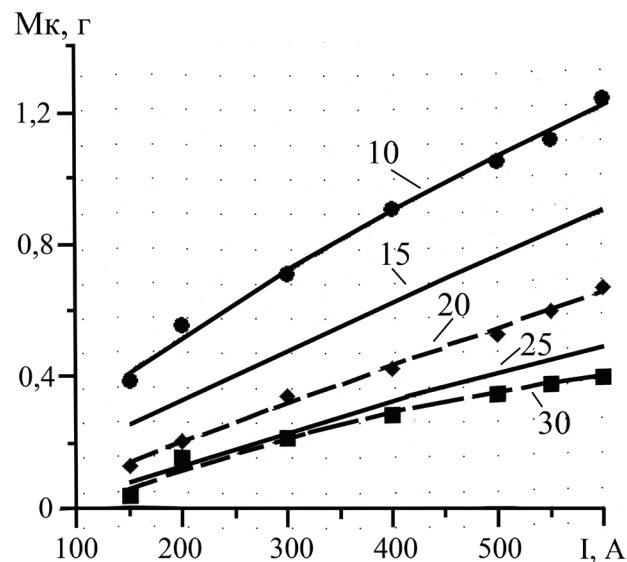


Рис. 2. Потеря массы катодами разного диаметра от величины тока в плазмотроне

мещается по внутренней поверхности анода. При более высоких (> 400 А) значениях тока дуга привязывается к аноду на небольшой площади контакта. Поэтому можно предположить, что уменьшение площади анодного пятна при повышенной плотности тока способствует стабильному горению дуги и замедляет процесс эрозии анода в плазмотроне.

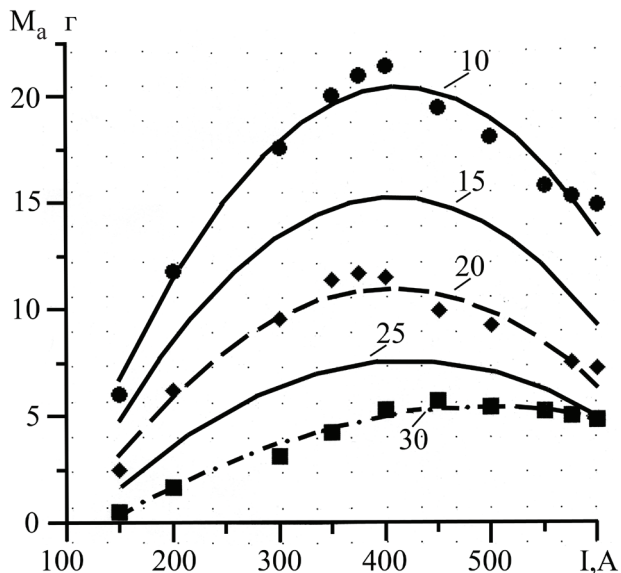


Рис. 3. Потери массы анодом в зависимости от силы тока и диаметра катода в плазматроне

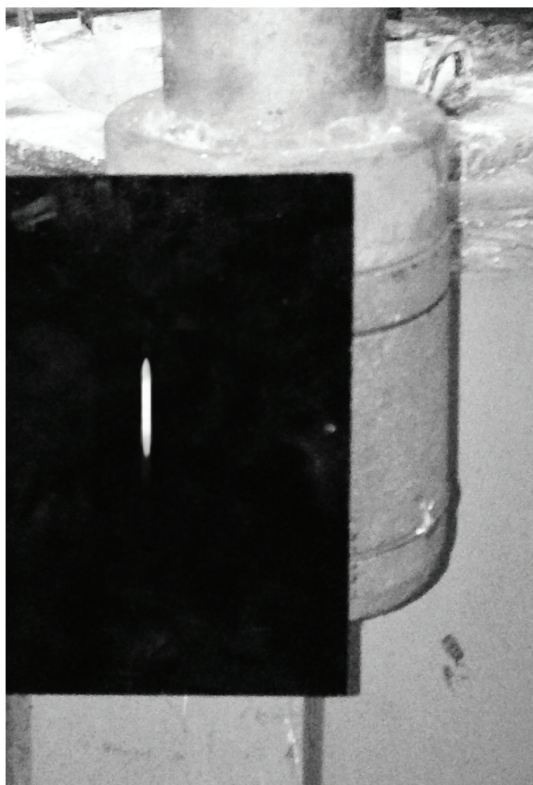


Рис. 4. Электрическая дуга в плазматроне (фотография сделана через световой фильтр).

Методами регрессионного анализа данных (табл.1) получены уравнения второго порядка, для оценки потерь массы электродами в зависимости от величины тока дуги в плазматроне. Высокие значения коэффициентов корреляции ( $R^2$ ) свидетельствуют об адекватном описании представленными уравнениями процессов износа электродов при разных токах в плазматроне (табл. 2).

Представленные в таблице 2 уравнения в общем виде описываются полиномом второй степени:

$$y = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2 \quad (1)$$

Коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  зависят от диаметра катода и принимают соответствующие различные значения. Используя информацию таблицы 2 о значениях соответствующих коэффициентов, установим их зависимости от диаметра катодов  $d$ :

$$a_0 = 0,232707 - 0,0195748 \cdot d + 0,00022144 \cdot d^2$$

$$R^2 = 100,00$$

$$a_1 = 0,00477042 - 0,000292281 \cdot d + 0,00000617435 \cdot d^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 100,00$$

$$a_2 = -0,00000289719 + 0,000000261779 \cdot d - 0,00000000676713 \cdot d^2$$

$$R^2 = 100,00$$

Для определения износа анода в плазматроне (табл. 2) значения коэффициентов рассчитывают по следующим зависимостям:

$$a_0 = -19,4767 + 0,628641 \cdot d - 0,049061 \cdot d^2$$

$$R^2 = 100,00$$

$$a_1 = 0,244114 - 0,00846443 \cdot d + 0,000057657 \cdot d^2 \quad (3)$$

$$R^2 = 100,00$$

$$a_2 = -0,000280167 + 0,00000803101 \cdot d - 0,000000003677 \cdot d^2$$

$$R^2 = 100,00$$

Таблица 2

Уравнения для определения потерь массы электродами при разных значениях тока в плазматроне

Диаметр катода, мм	Потери массы электродами, г	
	катодом	анодом
10	$M_k = 0,059373 + 0,00246505 \cdot i - 0,000000956113 \cdot i^2$ $R^2 = 96,3632 \%$	$M_a = -13,6809 + 0,165235 \cdot i - 0,000200225 \cdot i^2$ $R^2 = 95,6703 \%$
20	$M_k = -0,0691319 + 0,00139455 \cdot i - 0,000000368459 \cdot i^2$ $R^2 = 99,415 \%$	$M_a = -8,86632 + 0,0978878 \cdot i - 0,000121018 \cdot i^2$ $R^2 = 95,6703 \%$
30	$M_k = -0,152808 + 0,00155892 \cdot i - 0,00000113423 \cdot i^2$ $R^2 = 97,8425 \%$	$M_a = -5,03296 + 0,042072 \cdot i - 0,0000425464 \cdot i^2$ $R^2 = 97,5944 \%$

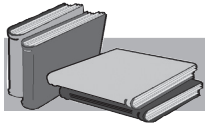
Таким образом, для определения износа электродов при разных диаметрах катода и режимах работы плазматрона можно воспользоваться уравнениями:

$$M_k = (0,232707 - 0,0195748 \cdot d + 0,000224144 \cdot d^2) + (0,00477042 - 0,000292281 \cdot d + 0,00000617435 \cdot d^2) \cdot i + (-0,00000289719 + 0,000000261779 \cdot d - 0,00000000 \cdot d^2) \cdot i^2; \quad (4)$$

$$M_a = (-19,4767 + 0,628641 \cdot d - 0,049061 \cdot d^2) + (0,244114 - 0,00846443 \cdot d + 0,000057657 \cdot d^2) \cdot i + (-0,000280167 + 0,00000803101 \cdot d - 0,000000003677 \cdot d^2) \cdot i^2, \quad (5)$$

где  $M_k, M_a$  – потеря массы катодом и анодом соответственно, г;  $d \in (10 \div 30)$  мм – диаметр катода;  $i \in (100 \div 600)$  А – сила тока в плазматроне.

С помощью уравнений 4 и 5 была проведена оценка потери массы электродами в плазматроне от силы тока с катодами диаметром 15 и 25 мм (рис. 2, 3). Видно, что расчётные зависимости имеют идентичный характер, а их значения находятся в пределах величин, которые установлены экспериментально.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.
2. Мельник Г. А. Плазменный нагрев в ферросплавном производстве / Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, К. И. Лежава. и др // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2000. – № 2. – С. 45-47.
3. Мельник Г. А. Некоторые возможности обработки стали в дуговых и плазменных ковшах-печах / Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, М. Л. Жадкевич // Там же. – 2002. – № 1. – С. 26-31.
4. Петров П. П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / П. П. Петров. – М.: Машиностроение, 1975. – 202 с.
5. Баранов В. И. Повышение износостойкости графитовых материалов, применяемых для изготовления кристаллизаторов установок непрерывного литья / В. И. Баранов, Е. И. Марукович // Литьё и металлургия. – 2001. – № 2. – С. 82-83.

### Анотація

*Найдек В. Л., Нарівський А. В., Тарасевич І. М., Тарасевич М. І., Токарева О. О., Федоров В. В., Корнієць І. В.*

Стійкість графітових електродів за різною електричною потужністю плазматрону побічної дії

Представлено дані про стійкість графітових анода та катода залежно від величини струму в плазматроні.

### Ключові слова

плазматрон, графіт, катод, анод, ерозія, втрата маси електродом, сила струму

### Summary

*Naidek V., Narivskiy A., Tarasevich I., Tarasevich M., Tokareva O., Fedorov V., Kornietc I.*

Resistance graphite electrodes under different electric power plasmatorch indirect action

The dates on the stability of the graphite anode and cathode depending on the current value in the plasmatorch are presented.

### Keywords

plasmatorch torch, graphite, cathode, anode, erosion, loss of mass of the electrode, the current strength

Поступила 23.07.2015