

УДК 621.315.56:533.9

**В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. И. Тарасевич.,  
В. В. Федоров**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **СТОЙКОСТЬ ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ПЛАЗМОТРОНАХ КОСВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ**

*Представлены данные о стойкости графитовых катода и анода в зависимости от подводимой к плазматрону электрической мощности.*

**Ключевые слова:** мощность плазматрона, электрическая дуга, анод, катод, подвод газа, эрозия, нагрев.

*Подано дані про стійкість графітових катода і анода в залежності від електричної потужності, що подається на плазматрон.*

**Ключові слова:** потужність плазматрону, електрична дуга, анод, катод, підведення газу, ерозія, нагрів.

*The dates about resistance of graphite catode and anode from au electric power feeding to the plasmatron it were representated.*

**Keywords:** power of plasma, electric arc, anode, catode, feed of gas, erosion, heating.

**Н**адежность и срок эксплуатации металлургических плазматронов во многом зависят от стойкости электродов. Наиболее стойкими в окислительной среде являются термохимические катоды. Такие катоды изготавливают в виде цилиндрических вставок из циркония или гафния, которые запрессовывают в медную обойму. Повышенная стойкость термохимических катодов обусловлена возникновением на поверхности вставок тугоплавких пленок из нитридов и оксидов [1]. Эти пленки образуются в результате взаимодействия циркония и гафния с воздухом в высокотемпературной прикатодной зоне плазматрона. Установлено, что при работе в одинаковых условиях (для токов 300–320 А) ресурс эксплуатации катодных вставок из гафния почти в два раза больше, чем циркониевых [2, 3]. Незначительная эрозия гафниевых катодов позволила создать электродуговые плазматроны, которые не охлаждаются водой [4].

Увеличить ресурс работы плазматронов можно быстрой заменой изношенных катодов из недефицитных материалов или за счет увеличения массы электродов даже при повышенной их эрозии. Также можно использовать дешевые расходные электроды, которые по мере износа перемещают с сохранением постоянного межэлектродного расстояния в плазматроне.

Перспективным материалом для изготовления электродов в плазматронах является графит [5, 6]. Графит имеет хорошие электро- и теплопроводность, а так-

## Новые методы и прогрессивные технологии литья

же высокую термостойкость. При температурах 2300-2800 К удельная прочность графита выше, чем других известных материалов. Низкая химическая активность к цветным сплавам позволяет использовать графит для изготовления погружаемых в расплав плазмотронов.

Цель работы заключалась в определении потерь массы графитовыми электродами в плазмотроне в зависимости от конструкции катода и способа подвода газа в зону электрической дуги при разной мощности плазмотрона. Для этого изготовили плазмотрон косвенного действия (рис. 1) с водоохлаждаемым анодом и сменными катодами, которые крепили в графитовом катододержателе на резьбе. Исследование проводили на двух типах катодов с одинаковой площадью конической или сферической поверхности контакта электрической дуги в плазмотроне. Аргон в зону горения дуги подавали через центральное отверстие в катодах или по зазору между центральным электродом и корпусом плазмотрона (боковой подвод газа).

Потери массы катодом и анодом определяли при постоянном межэлектродном расстоянии  $25 \cdot 10^{-3}$  м, расходе аргона 8 л/мин и напряжении электрической дуги 35-40 В. Анод нагревали до температуры 1573 К при разной электрической мощности, подводимой к плазмотрону от выпрямителя тока ВДУ 506-УЗ. Температуру анода на расстоянии 30 мм от сопла при нагреве измеряли с помощью заглубленной на 10 мм в графит вольфрам-рениевой термопары и аналогового регулятора «ТермоПро». При достижении анодом указанной температуры в контролируемой точке отключали плазмотрон и взвешивали электроды. Для каждой установленной величины электрической мощности плазмотрона проводили по три испытания и определяли среднее значение потерь массы электродами (табл. 1).

Видно, что эрозия катодов с увеличением мощности плазмотрона повышается. При подаче аргона через катоды эрозия их меньше, чем при боковом подводе газа в зону электрической дуги. Возможно, это обусловлено более интенсивным охлаждением катодов при пропускании газа через центральный канал в них. В процессе нагрева анода до температуры 1573 К при мощностях плазмотрона 4,5-12 кВт потеря массы катодами, независимо от способа подвода аргона в зону дуги, не превышает 0,9 г. Это свидетельствует о том, что на ресурс и стабильность работы плазмотронов косвенного действия эрозия катодов оказывает слабое влияние.

Во всех экспериментах масса анодов уменьшалась более интенсивно по сравнению с катодом. При подаче аргона через катод эрозия анодов больше, чем в плазмотронах с боковым подводом газа в зону дуги. Так, с увеличением мощности плазмотрона с 4,5 до 10, кВт вес анодов уменьшается на 6-8 г за счет износа их внутренних стенок в зоне действия дуги. Это обусловлено тем, что выходящая из катода струя аргона оттесняет электрическую дугу к боковым стенкам анода и приводит к неустойчивости ее контакта (дуга неравномерно перемещается по поверхности анода). В результате этого плазменная струя имеет низкую температуру (желтое свечение) и нагрев анода до заданной температуры происходит медленно. Дальнейшая струя при мощности плазмотрона 10 кВт не превышает  $(8-10) \cdot 10^{-3}$  м.

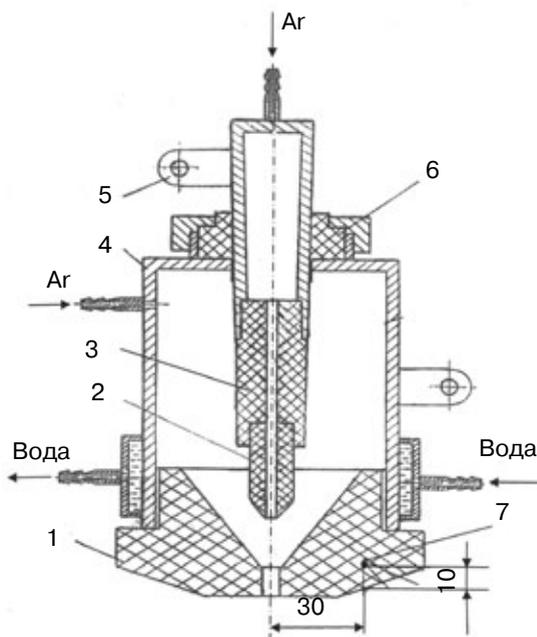
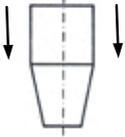
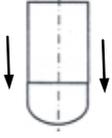


Рис. 1. Схема экспериментального плазмотрона: 1 – анод; 2 – катод; 3 – катододержатель; 4 – корпус; 5 – токоподвод; 6 – втулка изоляционная; 7 – термопара

Таблица 1. Потери веса электродами в плазмотронах разной мощности

Конструкция катода и способ подачи аргона (показан стрелками)	Мощность плазмотрона N, кВт	Потеря массы электродами, г	
		анод	катод
	4,5	10,0	0,52
	6,0	10,2	0,55
	8,0	10,5	0,62
	10,0	10,9	0,69
	12,0	11,2	0,76
	4,5	11,0	0,34
	6,0	12,2	0,40
	8,0	13,8	0,50
	10,0	15,6	0,62
	12,0	17,2	0,74
	4,5	7,0	0,70
	6,0	7,6	0,75
	8,0	9,0	0,78
	10,0	9,7	0,84
	12,0	10,8	0,90
	4,5	9,0	0,64
	6,0	10,8	0,70
	8,0	13,0	0,75
	10,0	15,3	0,83
	12,0	17,2	0,88

В случае бокового подвода аргона электрическая дуга обжимается газом и центрируется. За счет этого обеспечивается стабильный контакт электрической дуги между электродами, увеличивается температура плазменной струи и ее дальность. При мощности плазмотрона 10 кВт длина высокотемпературной (белое свечение) струи аргона достигала  $(70-80) \cdot 10^{-3}$  м. Эти данные свидетельствуют о том, что глубинную обработку сплавов более эффективно проводить плазмотроном с боковой подачей газа в прикатодную зону.

При боковом подводе газа в зону дуги и подводимой мощности 4,5-12 кВт к плазмотрону с катодами разной формы износ анодов составляет 7-17,2 г. Потери массы анодами обусловлены эрозией внутренних стенок и сопла в них под действием электрической дуги, а также в результате окисления графита. На воздухе графит начинает окисляться при температуре 720 К с образованием CO и CO<sub>2</sub>. Примеси, кроме фосфатов, ускоряют процесс окисления графита [7]. При нагреве электрическим током на воздухе до температуры 3450-3500 К масса графита уменьшается со скоростью 0,08-0,1 г/с [8]. Для уменьшения окисления в графит вводят кремний, фосфор и другие добавки. Самыми простыми способами защиты графита от окисления является пропитка его соединениями фосфора или водным раствором азотнокислого аммония с последующей сушкой изделий при температуре 640 К [9]. Следует также учитывать, что при глубинной обработке плазмотроном металлических расплавов окисление анода будет значительно меньше, чем на воздухе.

На основании экспериментальных данных установили математические зависимости потерь массы графитовыми электродами от подводимой к плазмотрону мощности (табл. 2). Эти уравнения позволяют определить потери веса электродами в плазмотронах, работающих при более высоких значениях мощности, чем исследованные.

При износе анода в процессе эксплуатации плазмотрона увеличивается диаметр сопла в нем. В результате этого уменьшаются основные параметры плазмен-

**Таблица 2. Уравнения для расчета массы электродами в плазмотроне**

Форма катода	Подвод газа в зону дуги	Потери массы электродами, г	
		Анод	Катод
Конус	боковой	$A = 9,24 + 0,164 N$	$K = 0,036 + 0,033N$
	через катод	$A = 7,22 + 0,83 N$	$K = 0,084 + 0,054N$
Сфера	боковой	$A = 4,68 + 0,51 N$	$K = 0,59 + 0,026 N$
	через катод	$A = 4,16 + 1,12 N$	$K = 0,5 + 0,032 N$

ной струи (скорость истечения, дальнобойность, межфазная поверхность в расплаве и др.). С целью уменьшения эрозии сопла в плазмотроне разработали конструкцию анода (рис. 2) со сменной вставкой из плотного графита МПГ-7 (ТУ 48-20-50-84). Корпус анода изготавливают из обычного электродного графита (ТУ 48-20-86-81). Для повышения стойкости сопла и дальнобойности плазменной струи отверстие в вставке выполнено в виде сопла Лавала [10]. Вставку закрепляют в корпусе анода с помощью резьбы, что позволяет быстро ее заменять и регулировать расстояние между электродами по мере их износа.

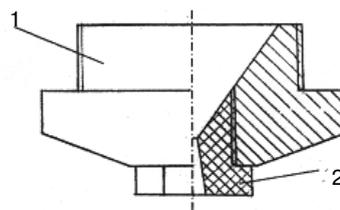


Рис. 2. Конструкция анода в плазмотроне: 1 – корпус анода; 2 – сменная вставка

Испытания показали, что при работе плазмотрона вставка нагревается до более высокой температуры, чем корпус анода. Это обусловлено повышенным тепловым сопротивлением на границе резьбового соединения вставки с анодом. Интенсивный нагрев вставки способствует надежной привязке электрической дуги к высокотемпературной поверхности анода у сопла плазмотрона. В результате этого стабилизируются температура и скорость истечения плазменной струи, увеличивается срок эксплуатации плазмотрона.



### Список литературы

1. Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.
2. Термохимические катоды / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогоров, Г. Н. Дандарон, А. Н. Тимошевский. – Новосибирск: Наука, 1985. – 129 с.
3. Быховский Д. Г. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1972. – 168 с.
4. Хренов К. К. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М.: Наука, 1973. – С. 84-88.
5. Проблемы специальной электрометаллургии / Г. А. Мельник, О. С. Забарило, К. И. Лежава и др. – 2000. – № 2. – С. 45-47.
6. Проблемы специальной электрометаллургии / Г. А. Мельник, О. С. Забарило, М. Л. Жадкевичи др. – 2002. – № 1. – С. 26-31.
7. Аникин Л. Т. Пайка и сварка графита. – М.: Энергия, 1970. – 200 с.
8. Петров П. П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. – М.: Машиностроение, 1975. – 202 с.
9. Баранов В. И., Марукович Е. И. Литье и металлургия. – 2001. – № 2. – С. 82-83.
10. Патент Украины № 86687, МПК H05B 7/22, H05H 1/26. Плазмотрон для глубокой обработки цветных сплавов / В. Л. Найдек, А. В. Наривский, Н. С. Ганжа, Д. М. Беленький. – Бюл. № 9. – 2009.

Поступила 23.10.2014