

# РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ

**А. Н. ШАПОВАЛ**, канд. техн. наук (Гос. инж. центр тверд. сплавов «Светкермет», г. Светловодск, Украина)

Предложен электрод, а также способ его изготовления, предусматривающий формирование в процессе соединения корпуса электрода и активной вставки для плотного контакта между ними. Разработан композиционный материал для активной вставки электрода плазмотрона с барьерным слоем из нитрида циркония.

*Ключевые слова:* плазмтроны, электроды, активные элементы, сердечники, нитрид циркония, цирконий, ресурс работы

В плазменной технике в качестве активного элемента термохимических электродов применяются цирконий и гафний. От ресурса работы электродов, подвергаемых электрическим и термическим нагрузкам, зависит расширение технологических возможностей плазменной обработки [1, 2].

Промышленное внедрение разработанной нами [3, 4] технологии производства композиционных материалов для активной вставки электродов потребовало изучения влияния электрической дуги на структуру и химический состав металла рабочей зоны электродов. С этой целью совместно с В. Г. Осинцевым и В. М. Ромашовым во ВНИИТС и ГИЦТС «Светкермет» [5] нами выполнено комплексное исследование полученных по разработанной технологии электродов с активными вставками — сердечника диаметром 2 мм из циркониевого сплава 110 (Zr + 1 % Nb); оболочки диаметром 2,5 мм из циркониевой бронзы (Бр.Цр 0,1).

Установлено, что важнейшим показателем, определяющим ресурс электрода, является уровень теплопроводности и электрической проводимости через контактную поверхность между сердечником и оболочкой, который обуславливается конструкцией и технологией изготовления активной вставки.

Плотный металлургический контакт между сердечником и оболочкой обеспечивается в ходе деформации биметаллической вставки по разработанной технологической схеме.

Не менее важное значение имеет обеспечение надежного контакта между поверхностями корпуса электрода и оболочкой активной вставки.

При изготовлении электродов соединение с корпусом активной биметаллической вставки осуществляется способом штамповки. Нами предложен и реализован в промышленности способ изготовления электрода, согласно которому в процессе запрессовки активного элемента в обойму на торцевых поверхностях обоймы формируются кольцевые углубления параболического сечения.

На рис. 1 показана пресс-форма двустороннего действия, обойма которой состоит из двух частей 7 и 8, соединенных штифтами 9. В полостях 10

обоймы размещен пуансон 6, рабочие торцы 1 которого имеют параболическую форму, как и рабочая поверхность 3 штампа 4. В ходе запрессовки активной вставки 2 в корпус 5 электрода на его поверхностях формируются углубления параболического сечения, которые позволяют интенсифицировать с одной стороны охлаждение корпуса, с другой (наружной) — формирование струи плазмообразующего газа. Кроме того, более глубокое проникновение зоны пластической деформации в процессе штамповки повышает плотность контакта между корпусом и активной вставкой, что улучшает теплофизические характеристики электрода и повышает его ресурс.

Эффективным приемом, повышающим ресурс электродов, является введение в конструкцию электрода барьерных слоев между активной вставкой и корпусом.

Нами разработан электрод, в котором в качестве промежуточного слоя на сердечник нанесен слой нитрида циркония с подслоем чистого циркония, при этом промежуточный слой покрыт внешним слоем материала корпуса. Отношение толщины слоя нитрида циркония к диаметру сердечника составляет 0,002...0,010, подслой из чистого циркония имеет

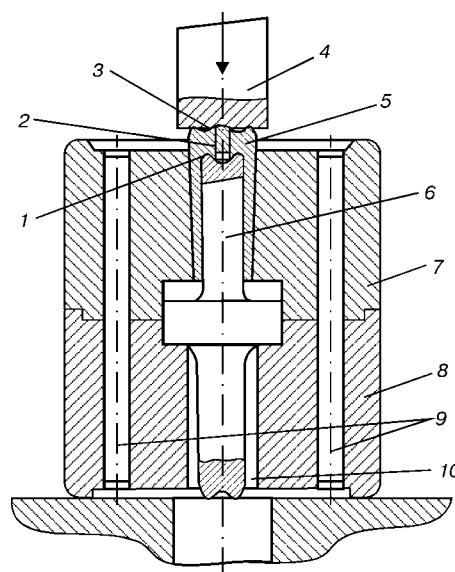


Рис. 1. Пресс-форма

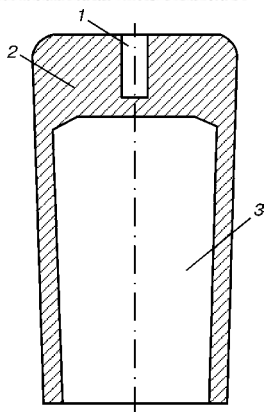


Рис. 2. Электрод плазмотрона

толщину 0,5...2,5 мкм, а сам промежуточный слой покрыт слоем из материала корпуса.

Предлагаемый электрод плазмотрона (рис. 2) содержит активный элемент 1, размещенный в корпусе 2, выполненном из материала с высокой теплопроводностью, например из меди, и содержащем полость 3 для подвода охлаждающей воды.

Активный элемент (рис. 3) содержит сердечник 1 из циркониевого сплава, например сплава Э110 (основа — цирконий; 1 мас. % ниобия), на который нанесены последовательно подслой 2 чистого циркония, слой 3 нитрида циркония и внешний слой 4 из материала корпуса электрода, в данном случае из меди. Активный элемент электрода соединен с корпусом способом запрессовки.

Использование изготовленного по разработанной технологии сердечника 1 активного элемента из сплава циркония с ниобием позволило достичь высокой технологичности при производстве исходных прутков и проволоки, а также исключения в сердечнике расслоивших трещин и несплошностей.

Наличие на поверхности сердечника из циркониевого сплава тонкого подслоя 2 чистого циркония способствует созданию при горении дуги положительного (от центра к периферии) градиента термоэмиссионных свойств активного элемента, что положительно сказывается на его стойкости.

Барьерный промежуточный слой 3 из нитрида циркония предотвращает диффузию материала корпуса электрода в активный элемент. Это обусловлено значительной тугоплавкостью нитрида циркония и его химической инертностью по отношению к близлежащим компонентам электрода.

Внешний слой 4 из меди позволяет усилить контакт активного элемента с корпусом электрода при запрессовке, поскольку на поверхность слоя

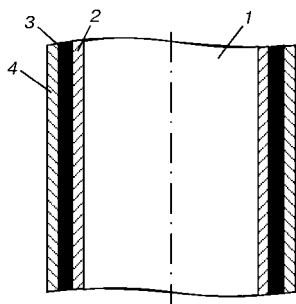


Рис. 3. Активный элемент электрода (продольное сечение)

3 из нитрида циркония он может быть нанесен предварительно с обеспечением плотного контакта (например осаждением), а с корпусом слой 4 соединяется плотно за счет химического сродства материалов корпуса и слоя, а также одинаковых физико-механических свойств.

Особенностью конструкции разработанного электрода является то, что отношение толщины барьерного слоя из нитрида циркония к диаметру сердечника должно составлять 0,002...0,010. При значениях менее 0,002 абсолютная толщина барьерного слоя на сердечниках диаметром 2,0...2,5 мм становится недостаточной для выполнения барьерных функций. Если же указанное отношение превышает 0,010, диффузия материала корпуса в активный элемент прекращается и дальнейшее увеличение толщины барьерного слоя нецелесообразно.

Подслоем 2 из чистого циркония имеет толщину 0,5...2,5 мкм. В процессе испытаний электродов установлено, что уменьшение толщины слоя ниже 0,5 мкм и увеличение свыше 2,5 мкм не оказывают существенного влияния на эксплуатационную стойкость электрода.

Толщина внешнего слоя 4 из материала корпуса электрода не регламентируется. Электрод плазмотрона получают следующим способом. Из материала с высокой теплопроводностью, например из меди, вытачивают корпус с посадочным отверстием под активный элемент, получаемый путем последовательного физического осаждения на сердечник-подложку (проволоку из циркониевого сплава) слоев чистого циркония, нитрида циркония и меди.

Осаждение нитрида циркония может производиться любым из известных способов при температурах подложки ниже температуры рекристаллизации (ниже 860 °С) материала активного элемента (в качестве материала активного элемента служит цирконий), одним из которых является ионно-плазменный способ конденсации вещества в вакууме ионной бомбардировкой (способ КИБ), позволяющий осажать как чистый цирконий, так и нитрид циркония последовательно за один цикл.

Практически осаждение подслоя циркония и слоя нитрида циркония осуществляется способом КИБ на установке ВУ-16. Сердечники из циркониевого сплава Э110 диаметром 2 мм и высотой 6 мм в один слой размещали на загрузочном устройстве, и установка вакуумировалась. При достижении вакуума 0,4 Па устанавливали ток подложки 2,0...2,5 А и напряжение 900...1100 В, зажигали плазмообразующую дугу и потоком ионов циркония осуществляли очистку поверхности сердечников с одновременным осаждением подслоя чистого циркония. При уменьшении тока подложки менее 2 А и напряжении менее 900 В цирконий не осаждается в виде сплошной пленки. При увеличении тока подложки свыше 2,5 А и напряжении свыше 1100 В температура разогрева сердечников превышала 860 °С, что недопустимо из-за рекристаллизации сплава.

После разогрева сердечников, покрытых слоем чистого циркония, до 500...600 °С в камеру подают азот и устанавливают опорное напряжение

### Исследование ресурса электрода с композиционным барьерным слоем

Толщина подслоя, мкм	Активный элемент		Ресурс электрода (зажиганий дуги)
	Промежуточный слой		
	Толщина, мкм	$\delta$	
2,5	2	0,0010	52
2,5	4	0,0020	55
2,5	15	0,0075	63
2,5	20	0,0100	56
2,5	30	0,0150	53
3,5	15	0,0075	60
1,5	15	0,0075	60
0,5	15	0,0075	57
0,2	15	0,0075	55
2,5	15	0,0075	54

Примечания: 1. Сердечник активного элемента выполнен из сплава Э110 диаметром 2 мм, его подслой — из циркония, промежуточный слой — из нитрида циркония, внешний слой — из меди толщиной 10 мкм, корпус электрода — из меди М1. 2. Здесь  $\delta$  обозначено отношение толщины слоя нитрида циркония к диаметру сердечника.

90...110 В при неизменном токе подложки 2,0...2,5 А. В этих условиях происходит осаждение слоя нитрида циркония. При токе подложки менее 2 А и опорном напряжении менее 90 В процесс осаждения резко замедляется и не носит устойчивого характера. С увеличением тока свыше 2,5 А и напряжения более 110 В в слое нитрида циркония появляются макрочастицы чистого циркония, что нарушает сплошность и однородность слоя нитрида циркония, а также отрицательно сказывается на его барьерных свойствах.

Исследования эксплуатационной стойкости электродов разработанной конструкции произведено в сравнении с электродами известного исполнения. Критерием эксплуатационной стойкости принят ресурс электрода — предельное количество зажиганий дуги при сохранении целостности рабочего торца электрода.

Результаты испытаний, выполненных на установке ПВР-402УХЛ4 при плазменной резке стали толщиной 6 мм (ток резки 400 А, напряжение 180 В, скорость резания 0,12 м/с, длина реза 16,2 м), приведены в таблице. В ходе испытаний установлено, что ресурс разработанных электродов значительно выше ресурса, указанного в работе [2].

Как показали металлографические и рентгеноструктурные исследования зоны эрозионного кратера, повышение ресурса электродов обусловлено в определяющей степени барьерными свойствами слоя нитрида циркония (содержание меди в кратере снизилось в 3...4 раза по сравнению с известными электродами). В то же время эта конструкция электрода плазматрона характеризуется высокой

Electrode and also method of its manufacture are offered, joining the electrode body and active insert. A composite active insert with a zirconium nitride barrier layer.

плотностью контакта между сердечником и упомянутым слоем, чем интенсифицируется теплоотвод, снижается переходное электросопротивление.

Наличие внешнего слоя из меди на активном элементе обеспечивает увеличение плотности контакта между активным элементом и корпусом электрода и, как следствие, увеличение ресурса электродов.

Повышение ресурса электродов, достигнутое путем введения эффективного барьерного слоя, позволяет в более полной мере использовать возможности созданной в ИЭС им. Е. О. Патона плазменно-дуговой аппаратуры [1].

### Выводы

1. Экспериментальное исследование электрической эрозии и ресурса электродов с биметаллическим активными вставками, полученными по разработанной технологии, показало прямую связь между плотностью металлургического контакта компонентов и технологической характеристикой — ресурсом.

2. С учетом этих исследований разработаны конструкция электрода плазматрона и способ его изготовления.

3. Установлено, что наличие барьерного тугоплавкого слоя между активным сердечником и корпусом электрода плазматрона повышает ресурс электрода за счет ограничения диффузии материала корпуса в сердечник. Разработан композит для активного элемента электрода плазматрона, состоящего из тугоплавкого сердечника (циркониевый, гафнийциркониевый сплав), получаемого по разработанной технологической схеме, на поверхность которого последовательно нанесены слои чистого циркония, нитрида циркония (барьерный слой) и материала корпуса (медь или циркониевая бронза).

4. Проведенные исследования подтверждают широкие технологические возможности разработанной технологии производства композитов в плане получения высококачественных электродов для плазменно-дуговой аппаратуры.

1. Эсбиян Э. М. Плазменно-дуговая аппаратура. — Киев: Техника, 1971. — 164 с.
2. Амосов В. М., Карелин Б. А., Кубышкин В. В. Электродные материалы на основе тугоплавких металлов. — М.: Металлургия, 1976. — 233 с.
3. Шаповал О. М. Одержання та властивості цирконієвих композитів — активного матеріалу електродів плазмового різання // Прогресивні технології і системи машиностроєння: Міжнарод. сб. науч. тр. — Донець: ДонГТУ, 1999. — Вып. 7. — С. 203–207.
4. Шаповал А. Н., Познанский В. И., Хохлов Ю. Г. Разработка технологии производства электродов плазменной резки металла // Прогрессивная техника и технологии машиностроения: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Донецк, сент. 1995 г.) — Донець: ДонГТУ, 1995. — С. 263.
5. Шаповал О. М. Державний інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» / Інструментальний світ. — 1998. — № 3. — С. 28–29.

providing formation of a tight contact during the process of material has been developed for the plasmatron electrode

Поступила в редакцию 29.03.2001,  
в окончательном варианте 25.02.2002