

УДК 537.527.5; 621.365.29; 544.55  
DOI: 18.101/2306-2363-2019-2-3-20-26

### ПЛАЗМОТРОН С ВЫСОКОРЕСУРСНЫМ КАТОДОМ

© **Д. В. Мухаева**

кандидат технических наук  
заведующий аспирантурой  
Институт физического материаловедения СО РАН  
670031, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: din\_vas@mail.ru

© **Е. И. Карпенко**

доктор технических наук  
заведующий лабораторией плазменно-энергетических процессов и технологий  
Институт физического материаловедения СО РАН  
670031, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: karpenko@ipms.bscnet.ru

© **А. П. Ринчинов**

кандидат технических наук  
заведующий кафедрой Тепловые электрические станции  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В  
младший научный сотрудник  
Институт физического материаловедения СО РАН  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

Представлен обзор работ по созданию электродугового плазмотрона с высокоресурсным катодом. Показана принципиальная возможность неограниченного увеличения срока службы катода, покрытого пленкой из углеродных наноструктурированных материалов, которая формируется за счет осаждения ионов и атомов углерода из защитной углеродсодержащей атмосферы дуги. Сформировавшая пленка представляет собой графеновые структуры (графен, наноленты, нановолокна, жгуты углеродных нанотрубок), образующиеся на стеклоуглеродном основании и является идеальным материалом для защиты катода от эрозии. Показано, что для обеспечения устойчивой непрерывной работы плазмотрона необходимо обеспечить стабильность подачи углеводородного газа в прикатодную область дуги.

**Ключевые слова:** электродуговой плазмотрон, высокоресурсный электрод, «истинный» катод, графеновые наноструктуры, нановолокна, углеродные нанотрубки, прикатодная область.

**Для цитирования**

*Мухаева Д. В., Карпенко Е. И., Мессерле В. Е., Ринчинов А. П.* Плазмотрон с высокоресурсным катодом // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2019. Вып. 2-3. С. 22-30.

Электродуговые плазмотроны с цилиндрическими медными электродами применяются в энергетике для розжига и подсветки пылеугольного факела в топочных устройствах, а также имеют широкое применение в химической про-

мышленности и металлургии. Применение плазмотронов в данных технологиях предъявляет требование непрерывной и продолжительной работы этих устройств. Наиболее теплонпряженным и подверженным разрушению элементом в плазмотронах является электрод, поэтому к нему, как детали газоплазменной техники, находящейся в непосредственном контакте с плазмой, предъявляются жесткие требования по ресурсу непрерывной работы.

Одним из перспективных способов увеличения ресурса непрерывной работы катода является осаждение ионов и атомов на поверхность катода из дуги. Ионы и атомы углерода образуются в результате ионизации свободного углерода, выделяющегося при диссоциации молекул углеродсодержащей плазмообразующей среды. При температурах дуги углеродсодержащие газы диссоциируют с выделением свободного углерода, т.к. диссоциация метана, наиболее устойчивого из предельных углеводородов при нормальном давлении практически заканчивается уже при 1200 К, а углекислого газа при 4000 К [1].

#### **Возобновляющийся катод**

Осаждение ионов и атомов на поверхность катода из дуги по мнению автора обзорной работы [2], впервые наблюдалось в 1965 г. на химкомбинате г. Борзешти в Румынии во время процесса электрокрекинга природного газа до ацетилена. Тогда было обнаружено формирование нароста углерода в зоне движения пятна дуги на поверхности трубчатого чугунного внутреннего катода линейного плазмотрона. Формируемый нарост негативно сказывался на технологии, т.к. с течением времени нарост возрастал в радиальном направлении с последующим переходом на ось катода, к тому же примыкающий к вершине образовавшегося нароста участок дуги с момента образования нароста прекращал радиальное движение по внутренней поверхности чугунного трубчатого катода. Однако данное явление открыло перспективу и возможность защитить катод от эрозии.

Первые результаты о возможности создания постоянно возобновляющегося катода, формирующегося из материала газовой фазы при горении сжатой дуги постоянного тока в предельных углеводородах, были представлены в работе [3]. В этой работе был получен слой пироуглерода на рабочей поверхности катода и обнаружено качественное изменение режима работы катода с некоторого момента времени. При этом первоначально установленный катод выполнял функцию подложки, на которой высаживается углерод, в дальнейшем формирующий слой («истинный катод»), выполняющий функцию катода. На начальном этапе процесса наблюдался рост толщины слоя, затем прирост толщины слоя прекращался, и тепловой поток стабилизировался, т.е. происходило качественное изменение режима работы катода. Было проведено рентгенографическое исследование центрального и периферийного участков «истинного» катода, которое показало, что высадившийся углерод имеет ярко выраженную структуру графита.

В работе [4] рассматривался возобновляющийся катод, в основе которого положен составной катод с активной вставкой. В ней также было показано, что начиная с некоторого момента времени, когда вся поверхность вставки полностью покрывается углеродом, непрерывно поступающим из газовой атмосферы дуги, происходит качественное изменение режима работы плазмотрона. По мере работы образуется осесимметричная по отношению к катоду чашечка диаметр

которой 4-6 мм со стенками толщиной 1-2 мм и высотой до 5-7 мм. Изменению состояния рабочей поверхности катода соответствовало и характерное изменение теплового потока в катод. Тепловой поток в катод рос только в первый момент зажигания дуги. Достигнув максимума, с момента, соответствующему полному покрытию поверхности углеродом, тепловой поток снижался до постоянного уровня, определяемого величиной тока. Аналогичный переход наблюдался и от режима холодного катода для меди. На начальной фазе до покрытия поверхности углеродом тепловой поток 3-4 раза выше. Из этого следует, что вставка фактически была активна лишь первые секунды после зажигания дуги и служила непосредственно катодом лишь до полного покрытия углеродом. Далее, после образования «истинного» катода из графита вставка становится пассивной и выполняет функции теплопередающего звена от рабочей поверхности катода к охлаждающей воде, как и медный водоохлаждаемый корпус.

Дальнейшие исследования возобновляющихся катодов в углеродосодержащей среде при токах до 750 А [5, 6] показали, что его возобновление возможно лишь при выполнении ряда условий. Необходимость поддержания концентрации свободного углерода в газовой атмосфере дуги, предъявило строгие требования к составу и расходу плазмообразующей смеси, к источнику электропитания. Обязательным условием является наличие активной вставки из материала, обеспечивающего оптимальный режим работы составного катода в целом, в работе оговаривается необходимость обеспечения малого времени формирования «истинного» катода, прочной связи подложки с углеродом «истинного» катода, материал вставки должен обладать хорошими теплофизическими и термомеханическими свойствами. Необходимость выполнения выше указанных требований ограничила, по мнению автора работы [6], круг исследованных материалов карбидообразующими металлами 4 и 6 групп периодической таблицы, медью и графитом. Эти материалы использовались в виде стержней диаметром 1.2-2.0 и длиной 3-4 мм. Стержни запрессовывались в медные корпуса составных катодов. После работы катоды разрезались в диаметральной плоскости, осмотр выполненных на поверхности реза шлифов показал, что под «истинным» катодом в средней части вставки находится слой пеннообразной структуры толщиной 40 мкм и диаметром 0.5-0.6 мм. Микротвердость по этому слою изменяется от 2300-2400 ед. Н<sub>v</sub> на границе с пирографитом до уровня соответствующему чистому гафнию. Вблизи границы с медным корпусом образуются раковины усадочного характера. Результаты анализа вставок из карбидообразующих металлов показали, что при первом зажигании дуги до формирования «истинного» катода значительный объем вставки расплавляется и насыщается углеродом до образования карбидов различного состава. В процессе работы активная вставка первоначально однородная разделяется по высоте на слои с различным химическим составом и свойствами, что приводит к появлению термических напряжений и деформации вплоть до нарушения теплового контакта с корпусом и разрушения составного катода. При использовании катода из меди формирование «истинного» катода затягивается на десятки секунд и вызывает появление лунок на месте выплавленной меди и низкую прочность сцепления «истинного» катода с медью. Отсутствие химического взаимодействия и низкая растворимость углерода в меди определяют постоянство состава и характеристик катода, таких как теплопроводность, проч-

ность, коэффициент линейного расширения, и т.д. в течение всего времени горения дуги исключают возникновение термомеханических деформаций и напряжений. Графитовые вставки на токах 500-700 А работают в течение десятков часов в безэрозийном режиме, при плотностях тока через «истинный» катод  $8 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>.

Вставки, изготовленные из графита, создают оптимальные условия для формирования и работы возобновляющегося катода. Решение тепловой задачи позволило выявить связь температурных условий и геометрии катода и определить влияние диаметра вставки, глубины ее заделки в медный корпус на температуру рабочей поверхности графита [7]. В работе показано, что геометрические размеры графитовой вставки зависят от условий охлаждения катода. При выборе диаметра вставки необходимо потребовать, чтобы температура поверхности графита не превышала 4000 К. Высота вставки определяется технологией заделки в корпус катода и не превышает 1,5 и 3 мм. Обеспечение надежного теплового контакта графит-медь затрудняется из-за металлургической связи и низкого коэффициента трения этой пары. Поэтому в случае варианта паянного катода на поверхность графитовой вставки электролитическим путем наносится медь, а в случае прессованного катода вставка предварительно зачеканивается. Для обеспечения длительной работы катода требуется интенсивное охлаждение и, качественный контакт был получен при использовании свинцово-титанистого припоя. Его температура плавления ниже температуры плавления меди. В случае появления трещин в графите, он их заполняет, обеспечивая стабильный тепловой контакт на границе медь-графит.

#### **Электродуговые плазмотроны с защитным наноструктурированным углеродным покрытием электродов**

В работах [8, 9] проведена критика предыдущих конструкций возобновляющихся электродов. По мнению авторов опыты показали, что описанные выше схемы катодов имеют существенные недостатки. Тепловой и газодинамический режим работы катода должен поддерживаться с высокой степенью точности. Для обеспечения стабильной работы графитовую вставку электрода необходимо интенсивно охлаждать, вследствие чего охлаждающая вода близко подводится к вставке, что приводит к опасности быстрого прогара катододержателя при отклонении от оптимального режима работы. Размеры катодной вставки жестко связаны с величиной тока, что предъявляет повышенные требования к выбору геометрии катодной камеры завихрителя с точки зрения газодинамических характеристик. Конструкция катодного узла должна обеспечивать точную сборку и хорошее совпадение осей графитовой вставки и газового вихря. В противном случае возможно смещение опорного пятна дуги с графита на металл катододержателя и его проплавку.

Для устранения жестких требований была разработана и испытана конструкция плазмотрона [10], содержащий наружный электрод (анод) и изолированный от него, расположенный соосно внутренний электрод-катододержатель, каждый из которых размещен в своей индукционной катушке, с вихревой камерой подачи плазмообразующего газа между электродами. В полости внутреннего электрода-катододержателя, в его донной части закреплена вставка из графита

(катод). Вставку во внутреннем катододержателе располагают так, чтобы между донной частью катододержателя и торцевой поверхностью вставки осталась полость. Полость соединена с резервуаром, содержащим углеводороды метанового ряда. В указанном плазмотроне плазмообразующим газом является воздух, который подается тангенциально между внутренним электродом-катододержателем и наружным электродом (анодом). В плазмотроне углеводороды метанового ряда подаются по винтовым каналам, выполненным в виде многозаходной резьбы на цилиндрической графитовой вставке в прикатодную область. В результате этого в полости катода образуется среда, состоящая преимущественно из углеродосодержащего газа. При работе плазмотрона, образовавшиеся в результате диссоциации молекул пропан-бутановой смеси и ионизации атомов углерода положительные ионы углерода под действием прикатодного падения потенциала осаждаются на графитовой вставке, образуя конденсат.

Раман-спектроскопия и анализ сформированного катодного защитного конденсата на электронном микроскопе показали, что сформированный слой представляет собой композитный нанокристаллический материал, состоящий на 100% из углерода. Полученный материал представляет собой графеновые структуры (графен, наноленты, нановолокна, жгуты углеродных нанотрубок), образующиеся на стеклогуглеродном основании [11].

Графеновые структуры обладают широким и уникальным набором физико-химических свойств: электропроводность выше, чем у всех известных проводников, имеют высокую теплопроводность, стабильны химически, отличаются чрезвычайной механической прочностью (в 100 раз прочнее стали) способны выдерживать плотности тока на два порядка большие, чем обычные металлы. С точки зрения защиты катода особенно важно, что графеновые структуры обладают химической инертностью при большой напряженности электрического поля ( $10^7$ - $10^8$  В/м) и бомбардировке ионами остаточных газов, а также высокой эмиссионной способностью. Выше перечисленные свойства графеновых структур показывают, что нанокристаллические структуры и композиты на их основе являются идеальным материалом для защиты электродов плазмотрона от эрозии.

Проведенные стендовые испытания плазмотрона показали, что общий ресурс электродов плазмотрона составил более чем 1000 ч непрерывной работы.

Однако в данном устройстве винтовые каналы, выточенные в виде многозаходной резьбы для подачи углеводородов в прикатодную область, забиваются графитовой пылью. Данное обстоятельство препятствует равномерной подаче углеводородного газа в прикатодную область и не позволяет обеспечить достаточное количество углеводородного газа для создания защитной атмосферы электрода. К тому же в устройстве отсутствует диафрагма для удержания защитной атмосферы (углеводородного газа) и предотвращения воздействия кислорода на катод в прикатодной области, что также создает условия для недостаточной защиты углеродной вставки от эрозии. Для устранения недостатков были предложены следующие варианты решения [11]:

- 1) вытачивать каналы подачи углеводородного газа в прикатодную область в виде винтовой многозаходной резьбы с широким шагом на выступах внутренней полости электрода-катододержателя;

2) каналы подачи углеводородного газа в прикатодную область напрямую подводить к вихревой камере, расположенной в сопле, сопло в форме конфузора закрепить на внутреннем электроде-катододержателе на резьбе;

3) каналы подачи углеводородного газа в прикатодную область вытачивать в виде винтовой многозаходной резьбы с широким шагом поверх крепежной винтовой резьбы на медной обойме с запрессованным наноструктурированным углеродным материалом, в саму медную обойму закрепить в полости внутреннего электрода-катододержателя на крепежной резьбе.

### Выводы

Для достижения устойчивой непрерывной работы электродугового плазмотрона с защитным наноструктурированным покрытием катода необходимы:

1) наличие графитовой вставки, либо медной обоймы с запрессованным наноструктурированным углеродным материалом, закрепленной в полости внутреннего катода-электрододержателя;

2) надежный контакт графитовой вставки, или медной обоймы с запрессованным наноструктурированным углеродным материалом с катодом-электрододержателем;

3) равномерная подача углеводородного газа в прикатодную область для создания защитной атмосферы электрода, которая обеспечивается разными вариантами изготовления каналов подачи на внутреннем электроде-катододержателе, либо медной обойме с запрессованным наноструктурированным углеродным материалом.

### Литература

1. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. — Новосибирск: Наука. — 1999. — 712 с. — (Низкотемпературная плазма. Т.17)

2. Кривандин В. А. Светящееся пламя природного газа. — М.: Metallurgy. — 1973. — 136 с.

3. Фридлянд М. Г. Исследование работы стержневого неплавящегося катода при горении дуги в углеводородах // Теплофизика высоких температур. — 1973. — Т. 11, № 5. — С. 414-415.

4. Фридлянд М. Г., Неймотин А. М., Косс В. А. Катод, формирующийся из газовой фазы при горении сжатой дуги в углеводородах, как источник информации о прикатодных процессах // Теплофизика высоких температур. — 1976. — Т. 14, № 1. — С. 21-25.

5. Фридлянд М. Г. Особенности работы стержневого неплавящегося катода при горении дуги в углеводородах // Автоматическая сварка. — 1977. — № 1. — С. 16-18.

6. Фридлянд М. Г. Условия работы катода сильноточной дуги в режиме постоянного возобновления // Изв. СО РАН СССР. Серия техн. наук. — 1981. — № 3, вып. 1. — С. 121-125.

7. Фридлянд М. Г., Филиппов К. О. Технология изготовления катодов для работы в режиме постоянного возобновления // Электротехническая промышленность. Серия. Электросварка. — 1982. — № 1(70). — С. 1-3.

8. Гольш В. И., Буянтуев С. Л., Зяятуев Х. Ц., Тютеебаев С. С. Плазмотрон с самовосстанавливающимися электродами // Сб. матер. межд. науч.-практ. конф. «Энергосберегающие и природоохранные технологии на Байкале», 2001. — С. 27-31.

9. Гольш В. И., Мессерле В. Е., Мансуров З. А., Тютеебаев С. С., Лукьященко В. Г. Высокорекурсивный плазмотрон с пироуглеродным катодом // Мат-лы III межд. науч.-практ.

конф. «Плазменно-энергетические процессы и технологии». — Улан-Удэ, 2000. — С. 119-125.

10. Гольш В. И., Карпенко Е. И., Лукьященко В. Г., Мессерле В. Е., Устименко А. Б., Ушанов В. Ж. Высокорекурсивный элетродуговой плазмотрон // Химия высоких энергий. — 2009. — Т. 43, № 4. — С. 371-376.

11. Карпенко Е. И., Карпенко Ю. У., Мессерле В. Е., Мухаева Д. В., Устименко А. Б. Патент РФ. № 2541349. Высокорекурсивный электродуговой генератор низкотемпературной плазмы с защитным наноструктурированным углеродным покрытием электродов. — 2015. — БИ № 4.

#### PLASMA TORCH WITH THE HIGH-LIFE CATHODE

*D. V. Mukhaeva*

Candidate of Technical Sciences  
Head of Department of Postgraduate Education  
Institute of Physical Materials Sciences SB RAS  
670047 Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6  
E-mail: din\_vas@mail.ru

*E. I. Karpenko*

Doctor of Technical Sciences  
Head of Laboratory  
Institute of Physical Materials Sciences SB RAS  
670047 Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6  
E-mail: karpenko@ipms.bscnet.ru

*A. P. Rinchinov*

Candidate of Technical Sciences  
Head of the Department Thermal Power Plants  
East Siberian State University of Technology and Management  
670013, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, Str., 40B  
junior researcher  
Institute of Physical Materials Science SB RAS  
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy, Str., 6  
E-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

Literature review on the creation of electric arc plasma torch with high-life cathode is presented. The principal possibility of an unlimited increase in the service life of the cathode coated with a film of carbon nanostructured materials, which is formed due to the deposition of ions and carbon atoms from the protective carbon-containing atmosphere of the arc, is shown. The formed film is a graphene structure (graphene, nanofibers, nanofibers, bundles of carbon nanotubes) formed on a glass-carbon base and is an ideal material to protect the cathode from erosion. It is shown that in order to ensure stable continuous operation of the plasma torch, it is necessary to ensure the stability of the supply of hydrocarbon gas to the cathode region of the arc.

*Keywords:* electric arc plasma torch, high-life electrode, "true" cathode, graphene nanostructures, nanofibers, carbon nanotubes, cathode region.