

УДК 621.729

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

канд. техн. наук, доц. А.Л. ГОЛОЗУБОВ

(Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина)

*Рассматриваются технологические и конструктивные особенности дугового плазматрона для нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении. Проведенный комплекс экспериментальных и конструкторских работ позволил оптимизировать технологию нанесения тонкопленочных покрытий, улучшить качество наносимого покрытия и повысить стабильность процесса за счет использования новых решений, исключая или значительно ослабляющих проявление негативных процессов внутри плазматрона.*

**Ключевые слова:** плазматрон, нанесение покрытий, усовершенствование, качество, стабильность.

**Введение.** Развитие современного производства напрямую связано с разработкой новых высокоэффективных технологических процессов, позволяющих получать материалы с заданными свойствами.

Нанесение тонкопленочных покрытий (ТП) осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении – сравнительно новый метод поверхностного упрочнения металлических поверхностей, который обладает рядом несомненных преимуществ перед ранее применявшимися технологиями.

Наиболее перспективным направлением использования ТП является нанесение барьерных покрытий, необходимых для создания на металлических поверхностях защитных пленок с заданными свойствами: износостойкостью, твердостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Область применения таких покрытий – упрочнение и защита прецизионных поверхностей (посадочных мест, контактирующих поверхностей узлов трения), где точность обработки должна соответствовать высоким критериям. Нанесение износостойких ТП толщиной до 2 мкм из дуговой плазмы позволяет улучшить показатели шероховатости поверхности и повысить ее триботехнические свойства. Высокая точность нанесения ТП по толщине до 0,3 мкм дает возможность применять технологический процесс для упрочнения контактирующих поверхностей прецизионных узлов трения, штамповой оснастки и других деталей, не допускающих последующей механической обработки из-за высоких требований к точности изготовления и сборки.

Процесс нанесения плазмохимических покрытий включает в себя пиролиз кремнийорганических соединений в потоке плазмообразующего газа для получения однородной реакционной плазмы, транспортировку продуктов пиролиза к месту протекания реакции и собственно нанесение покрытия из газовой фазы на подложку. Эффективность работы плазмохимического реактора увеличивается при обеспечении образования гомогенной смеси реагента с плазмообразующим газом. Особенностью плазмохимических процессов является большое количество входных параметров, влияющих на энергетические характеристики плазменной струи (температура, энтальпия, режим и скорость истечения плазмы, энергия заряженных частиц), от которых зависит качество наносимого покрытия и свойства подложки.

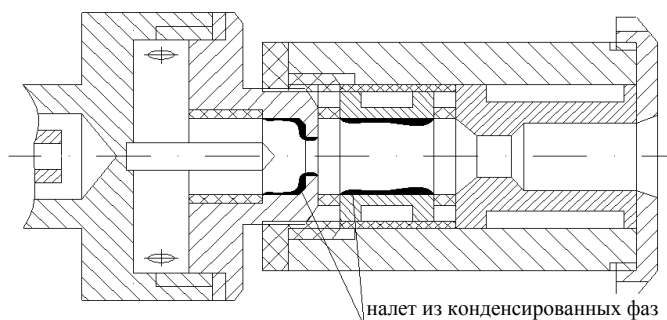
Учитывая, что дефектность структуры ТП не снижает их защитных свойств, а в ряде случаев и повышает, в последнее время наметилась тенденция к освоению новых технологий получения ТП, не связанных с вакуумной техникой. Наибольшее внимание исследователей привлекают плазменные технологии, как наиболее эффективные и изученные с точки зрения аппаратного обеспечения. Применение плазменной техники также связано с успехами в области синтеза нового класса веществ – металлоорганических соединений (МОС). Для генерации плазмы в основном используются различные виды высокочастотного (ВЧ) разряда, имеющие, однако, существенные недостатки: наличие вредного излучения, высокая энергоемкость, ограничения по массе и габаритам обрабатываемых деталей, высокая стоимость.

Значительно расширить область применения плазменной технологии нанесения ТП позволяет использование электродуговых плазматронов. Экологичность, маневренность, низкая стоимость плазматронов выгодно отличают данную технологию от традиционных методов получения ТП [1].

**Анализ конструктивных решений.** Разработанный плазматрон для нанесения плазмохимических покрытий конструктивно состоит из корпуса, водоохлаждаемых торцовых анода и катода, электронейтральной вставки, изолированной от корпуса и анода, вихревой камеры, расположенной соосно на торцовом катоде, имеющей по меньшей мере одно тангенциальное отверстие (рис. 1) [2].

Недостаток разработанного плазматрона состоит в том, что реагент вводится вместе с плазмообразующим газом в паровой фазе непосредственно в катодную область плазматрона и вызывает осаждение соединений кремния в виде ультрадисперсного порошка внутри самого плазматрона, преимущественно

на внутренних поверхностях катодного узла и электронеутральной вставки. В результате уменьшается внутреннее проходное сечение, увеличивается граничное трение по внутренним поверхностям плазмотрона, что способствует турбулизации плазменной струи и снижает качество наносимого покрытия за счет ухудшения защиты зоны осаждения покрытия от влияния атмосферного воздуха. Кроме того, образование внутреннего налета на стенках плазмотрона вызывает необходимость выключения плазмотрона для его очистки, с периодичностью 15...20 минут, что снижает производительность процесса и качество нанесения покрытия и приводит к повышению себестоимости изготовления деталей.



**Рисунок 1 – Места образования налета из конденсированных фаз на внутренних поверхностях плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий**

Таким образом, задача совершенствования конструкции плазмотрона – повышение качества наносимых покрытий, повышение производительности процесса, снижение себестоимости изготовления деталей и получение за счет этого экономического эффекта, что достигается исключением образования налета на внутренних поверхностях катодного узла и электронеутральной вставки.

Анализ конструктивных решений плазмотрона позволил выделить отдельные детали плазмотрона, изменение конструкций которых позволит достичь требуемых результатов с наименьшими затратами и без существенной переделки плазмотрона в целом.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для снижения или исключения количества конденсированного налета на внутренние стенки плазмотрона наиболее эффективный метод – уменьшение пути прохождения (и соответственно времени нахождения) парообразного реагента в реакционной плазме. Лимитирующим фактором в этом случае является время нахождения реагента в реакционной плазме, имеющей достаточную температуру.

Рассматривая конструкцию плазмотрона с точки зрения минимизации затрат на модернизацию, выделено два возможных варианта:

- 1) подача реагента в область электронеутральной вставки;
- 2) подача реагента в область анода.

Первый вариант сопряжен с техническими трудностями реализации – малой толщиной стенок электронеутральной вставки и наличием диэлектрической втулки между ней и корпусом плазмотрона, что делает реализацию этого варианта нецелесообразной.

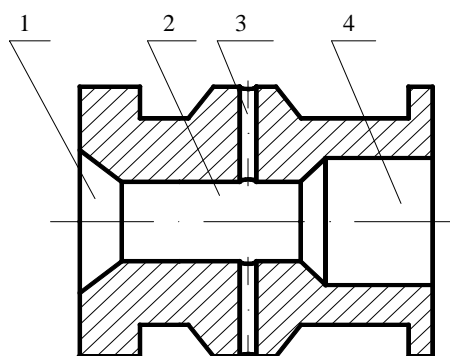
Второй вариант не вызывает технических трудностей в реализации, а проведенные эксперименты показали, что в данном варианте время пребывания реагента в плазме будет достаточным для протекания пиролиза реагента и получения реакционноспособной плазмы с необходимыми характеристиками.

С учетом вышесказанного разработана новая конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий. На рисунке 2 показана разработанная конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий.

Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий представляет собой деталь цилиндрической формы, имеющую входную коническую поверхность 1, служащую для зажигания дуги плазмотрона, внутренний коаксиальный канал 2, служащий для стабилизации плазменной струи и имеющий проходные отверстия 3, служащие для подачи газа-носителя, насыщенного парами реагента, наружный коаксиальный канал 4, большего диаметра для ламинаризации плазменной струи.

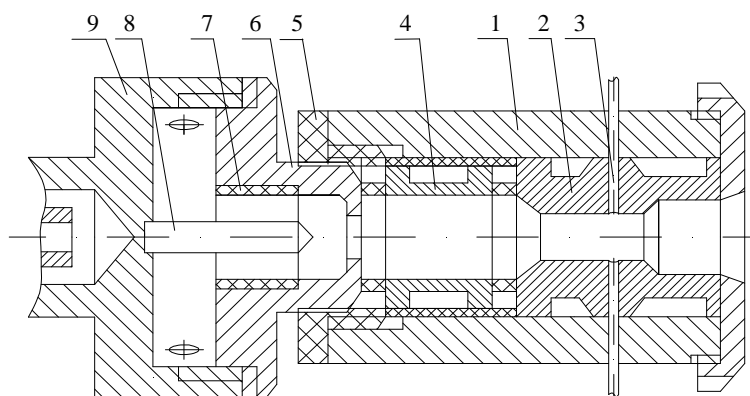
При этом ввод реагента в паровой фазе осуществляется отдельно с плазмообразующим газом и происходит не в катодной области плазмотрона, а в его аноде через отверстия, по которым насыщенный парами реагента газ-носитель (например, аргон) поступает в реакционную плазму. Место ввода транспортирующего газа, насыщенного парами реагента, должно отстоять от наружного среза сопла плазмотрона на расстоянии, достаточном для протекания реакции пиролиза реагента в плазменной струе и гомогенизации ее состава. Это расстояние зависит от внутреннего диаметра анода плазмотрона, давления и

расхода плазмообразующего газа, силы тока дуги плазмотрона, расхода газа-носителя и степени насыщенности его парами реагента, должно обеспечивать ламинарный режим истечения плазменной струи и в общем случае для конкретной модели плазмотрона определяется экспериментально.



**Рисунок 2 – Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий [4]**

Разработанная конструкция анода плазмотрона (см. рис. 2) для плазмохимического нанесения покрытий работает следующим образом. Транспортирующий газ, насыщенный парами реагента, поступает по отверстиям 3 во внутренний коаксиальный канал 2, по которому движется плазменная струя, смешивается с ней, в результате чего происходит пиролиз паров реагента и образование реакционноспособной плазменной струи, благодаря чему исключается образование налета на внутренних поверхностях катодного узла и электронной вставки, расположенных до анода плазмотрона (рис. 3), и, соответственно, обеспечивается более высокая производительность плазмотрона и более высокое качество наносимого покрытия. Кроме указанного, внутренний коаксиальный канал 2 имеет меньший диаметр, чем электронейтральная вставка и наружный коаксиальный канал 4, поэтому в нем плазменная струя имеет более высокую скорость, что способствует более интенсивному перемешиванию плазменной струи с транспортирующим газом, насыщенным парами реагента, в результате чего состав реакционной плазмы гомогенизируется более интенсивно.



**1 – корпус; 2 – сопло; 3 – канал ввода транспортирующего газа реагента;  
4 – электронейтральная вставка; 5 – изолирующая втулка; 6 – вспомогательное сопло;  
7 – изолирующая втулка; 8 – катод; 9 – вихревая камера**

**Рисунок 3 – Конструкция плазмотрона для нанесения плазмохимических покрытий**

В ходе экспериментальных исследований выяснилось, что разработанная конструкция анода плазмотрона не лишена недостатков. Недостатком разработанной ранее конструкции анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий, является постепенное засорение проходных отверстий для подачи паров реагента ультрадисперсным порошком за счет конденсации продуктов пиролиза реагента по краям отверстия канала ввода транспортирующего газа. Данное явление обусловлено газодинамическим воздействием плазменной струи, попадающей в проходные отверстия для подачи паров реагента и создающей дополнительное сопротивление их движению. Кроме того, она создает зоны, в которых происходит процесс пиролиза реагента и обратный процесс конденсации продуктов пиролиза, так как внут-

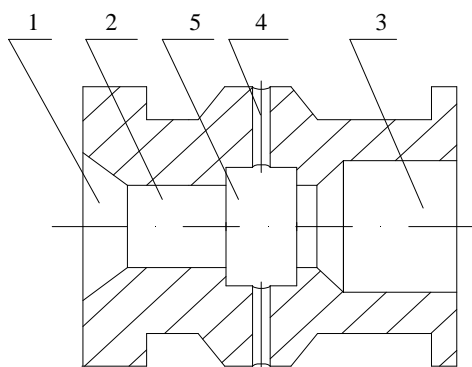
ренные поверхности отверстий для подачи паров реагента по мере удаления от внутреннего коаксиального плазменного канала имеют значительно меньшую температуру за счет принудительного охлаждения наружной поверхности анода водой.

Засорение отверстий для подачи паров реагента уменьшает размер их проходных сечений и вызывает снижение концентрации реагентов в плазменной струе. Снижение концентрации реагентов в плазменной струе приводит к уменьшению скорости осаждения покрытия, а также перегреву подложки, за счет чего снижается качество наносимого покрытия и увеличивается время обработки.

Следующая задача совершенствования конструкции анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий заключалась в определении увеличения времени безостановочной работы плазмотрона и улучшении качества наносимых покрытий за счет повышения стабильности процесса путем создания условий, обеспечивающих поддержание заданной концентрации реагентов в плазменной струе.

Для решения поставленной задачи в конструкцию анода плазмотрона были внесены изменения. Новая конструкция анода плазмотрона (рис. 4) отличается от ранее разработанной тем, что внутренний канал стабилизации плазменной струи, имеющий проходные отверстия для подачи паров реагента, дополнительно снабжен кольцевой выточкой в месте входа в него проходных отверстий для подачи паров реагента [5]. При этом снижается газодинамическое воздействие плазменной струи на процесс ввода паров реагента и тем самым исключается засорение проходных отверстий для подачи паров реагента за счет конденсации ультрадисперсного порошка в виде соединений кремния из продуктов пиролиза реагента.

Экспериментальные исследования показали, что место ввода транспортирующего газа, насыщенного парами реагента, должно отстоять от стенки внутреннего канала стабилизации плазменной струи плазмотрона на расстоянии не менее 1–2 диаметров проходных отверстий для подачи паров реагента.



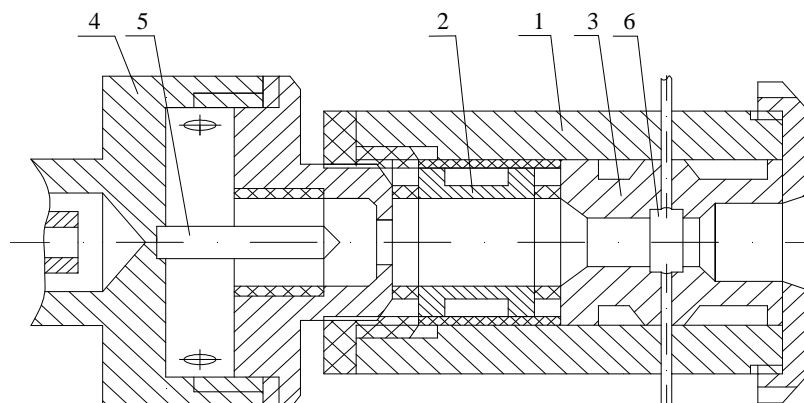
1 – входная коническая поверхность; 2 – внутренний коаксиальный канал;  
3 – наружный коаксиальный канал; 4 – проходные отверстия  
для подачи транспортирующего газа; 5 – кольцевая выточка

Рисунок 4 – Анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий [4]

Усовершенствованный анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий (см. рис. 4) работает следующим образом. Транспортирующий газ, насыщенный парами реагента, поступает по отверстиям 3 в кольцевую выточку внутреннего коаксиального канала 2, по которому движется плазменная струя, смешивается с ней, в результате чего происходит пиролиз паров реагента и образование реакционно-способной плазменной струи. При этом исключается образование налета из ультрадисперсного порошка путем конденсации продуктов пиролиза реагента на внутренних поверхностях проходных отверстий для подачи паров реагента, за счет чего обеспечивается более высокая производительность плазмотрона и более высокое качество наносимого покрытия. Кроме того, наличие кольцевой выточки во внутреннем коаксиальном канале способствует более равномерному вводу реагента в плазменную струю, в результате чего состав реакционной плазмы гомогенизируется быстрее. Усовершенствованный анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий не требует значительного усложнения технологии изготовления.

**Обсуждение результатов исследований.** Проведенные экспериментальные исследования показали, что повышение качества наносимого ТП и улучшение эксплуатационных характеристик плазмотрона для нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении можно обеспечить путем применения новых конструктивных решений, не требующих кардинальных изменений в конструкции плазмотрона. Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективным направлением улучшения эксплуатационных характеристик плазмотрона является уменьшение пути и времени нахождения реагента в плазменной струе за счет изменения места ввода реагента в плазму. Особенности протекания газодинамических процессов в аноде

плазмотрона привели к необходимости совершенствования его конструкции путем изменения геометрии внутренней поверхности (рис. 5).



1 – корпус; 2 – электронейтральная вставка; 3 – сопло;  
4 – вихревая камера; 5 – катод; 6 – кольцевая выточка

**Рисунок 5 – Усовершенствованная конструкция плазмотрона для нанесения плазмохимических покрытий**

**Заключение.** Проведенный комплекс экспериментальных и конструкторских работ позволил оптимизировать технологию нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении, улучшить качество наносимого покрытия и повысить стабильность процесса за счет использования новых конструктивных решений, исключающих или значительно ослабляющих проявление негативных процессов внутри плазмотрона. Принятые конструктивные решения существенно не изменили конструкцию плазмотрона в целом и не привели к значительным дополнительным затратам, что положительно сказалось на конкурентоспособности технологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голозубов, А.Л. Теоретические и технологические аспекты осаждения защитных тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий из дуговой низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении / А.Л. Голозубов. – Мозырь: Белый ветер, 2012. – 218 с.
2. Плазмотрон для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 2306 Респ. Беларусь, С1 ВУ, МКИ6 Н 05Н 1/26 / А.Л. Голозубов, Э.М. Пархимович, О.В. Иванина, А.Р. Андреев. – № 950023; заявл. 10.01.1995; опубл. 16.03.1998 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1998. – № 3. – С. 222.
3. Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 7362 Респ. Беларусь, МПК Н05Н 1/26 (2006.01) / А.Л. Голозубов, А.М. Старовойтов, А.А. Голозубова; заявитель УО «МГПУ им. И.П. Шамякина». – № u 20100984; опубл. 2011.06.30 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 3.
4. Анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 8893 Респ. Беларусь, МПК Н05Н 1/26 (2006.01) / А.Л. Голозубов, А.А. Голозубова; Д.А. Ворончук; Ю.Н. Купрацевич; заявитель УО «МГПУ им. И.П. Шамякина». – № u 20120452; опубл. 2012.12.30 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – № 6.

Поступила 14.12.2015

#### PERFECTION OF DESIGN PLASMA GENERATOR FOR PLASMA CHEMICAL DRAWING OF THIN-FILM COVERINGS

A. GOLOZUBOV

*Are considered technological and design features arc plasma generator for drawing of thin-film siliceous coverings by sedimentation from arc plasma at atmospheric pressure. The spent complex of experimental and design works has allowed to optimise technology of drawing of thin-film coverings, to improve quality of a put covering and to raise stability of process at the expense of use of the new decisions excluding or negative processes considerably weakening display inside plasma generator.*

**Keywords:** plasma generator, drawing of coverings, development, quality, stability.