

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ В ПЛАЗМЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Кузнецов В.Г.

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: вакуумная дуга, плазмодукт, магнитное поле, плазменный поток, покрытие, микрокапли, цилиндр, конус.

Аннотация. Разработана математическая модель для расчета магнитных систем транспортировки плазменных потоков, обеспечивающих равномерную обработку поверхности протяженных осесимметричных изделий простой и сложной геометрической формы. Для осесимметричных изделий, например, цилиндр или конус, сжатие плазменного потока предложено осуществлять магнитным плазмодуктом, охватывающим их снаружи. Получены аналитические выражения для расчета плазмодуктов при обработке внешней поверхности изделий цилиндрической и конусообразной формы.

COATING DEPOSITION ON LARGE-SIZED PRODUCTS IN VACUUM-ARC DISCHARGE PLASMA

Kuznetsov V.G.

*Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of
Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

Keywords: vacuum arc, plasma duct, magnetic field, plasma flow, coating, micro droplets, cylinder, con.

Abstract. A mathematical model has been developed for calculating of magnetic systems for transporting plasma flows that ensure uniform surface treatment of extended ax symmetric products of simple and complex geometric shapes. For ax symmetric products, for example, a cylinder or a cone, compression of the plasma flow is proposed to be carried out by a magnetic plasma guide covering them from the outside. Analytical expressions have been obtained for calculating plasma conveyors when processing the outer surface of cylindrical and cone-shaped products.

Для машиностроения, авиастроения, энергетики, электроники и других областей является актуальной задача равномерного нанесения покрытий на крупногабаритные изделия. Однако это вызывает трудности практически для любого метода нанесения. В условиях ускоренного плазменного потока, ограниченных размеров вакуумной камеры, неравномерного по плотности потока наносимого материала, что характерно для вакуумно-дуговой технологии, вопрос о равномерности нанесения покрытий является одним из важнейших.

В [1] получено выражение для распределения толщины покрытия на внутренних стенках цилиндрической полости. Если при аналогичных условиях наносить покрытие на боковую (внешнюю) поверхность цилиндрических изделий, неравномерность покрытия по толщине вдоль цилиндра будет значительной. Она обусловлена уменьшением концентрации

ионов в плазменном потоке,двигающемся вдоль цилиндра, за счет его расширения и ухода зарядов на поверхность цилиндра. Поэтому для равномерного нанесения покрытия на боковую поверхность цилиндра необходимо концентрацию ионов в плазме на границе с поверхностью поддерживать постоянной. Такое условие может быть выполнено за счет сжатия плазменного потока при движении его вдоль цилиндра. На практике эффект сжатия или фокусировки плазменных потоков [2, 3], сформированных вакуумно-дуговыми испарителями, обеспечивается магнитным полем с использованием принципов плазмооптики при относительно небольших напряженностях (до ста эрстед). При осуществлении фокусировки потоков плазмы необходимо учитывать воздействие внешнего магнитного поля на условия горения разряда в системе. Характер этого воздействия зависит от механизма стабилизации дуги в источнике.

Рассмотрим движение плазменного потока вдоль боковой поверхности цилиндра. Цилиндр радиусом R помещен в плазменный поток,двигающийся со скоростью V_{nl} . Ось симметрии цилиндра направлена параллельно вектору скорости потока. Сжатие плазменного потока осуществляется магнитным плазмодом, охватывающим цилиндр. Расстояние от боковой поверхности цилиндра до плазмодода при $Z=0$ обозначим через h_0 , а на расстоянии Z от торца цилиндра – через h . Плазменный поток, попадая в промежуток между цилиндром и плазмодом, по мере движения вдоль поверхности начинает сжиматься. Причем форма плазмодода выбирается такой, чтобы концентрация ионов в поперечном сечении потока плазмы вдоль оси Z оставалась постоянной.

Уравнение непрерывности тока ионов для такой модели при пренебрежении объемной рекомбинации имеет вид:

$$I_0 = I(z) + I_s(z); \quad (1)$$

$$I(z) = en_i \xi_i V_{nl} S_z; I_0 = I(z=0); \quad (2)$$

$$I_s(z) = 0,5en_{i\text{эп}} \xi_i (kT_e/M_i)^{1/2} S_{\text{бок}}, \quad (3)$$

где I_0 – ток ионов на входе в промежуток между цилиндром и плазмодом, n_i – концентрация ионов, ξ_i – среднее зарядовое число ионов, e – элементарный заряд, $n_{i\text{эп}}$ – концентрация ионов в плазме на границе с поверхностью цилиндра, k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронной компоненты плазмы, M_i – масса иона S_z – площадь поперечного сечения в промежутке между цилиндром и плазмодом; $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности цилиндра.

Учитывая, что $S(z=0) = \pi h_0(2R+h_0)$, $S_{\text{бок}} = 2\pi Rz$ и решая систему уравнений (1-3), получим выражение для определения расстояния между боковой поверхностью цилиндра и плазмодом вдоль оси Z , при котором на поверхности цилиндра формируется равномерное по толщине покрытие:

$$h = \sqrt{(R+h_0)^2 - \frac{Rz}{V_{nl}}(kT_e/M_i)^{1/2}} - R \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), по мере движения плазменного потока вдоль внешней поверхности цилиндра диаметр плазмоведа уменьшается, что приводит к сжатию плазмы, к поддержанию постоянства концентрации ионов наносимого материала в зазоре между цилиндром и плазмоводом, а, следовательно, способствует нанесению равномерного покрытия вдоль всей длины цилиндра.

Между геометрическими размерами R , h_0 и длиной цилиндра H имеется определенное соотношение, при котором зазор между цилиндром и плазмоводом на конце цилиндра обращается в ноль:

$$H = \frac{h_0(2R + h)}{\frac{R}{V_{nl}}(kT_e/M)^{1/2}} \quad (5)$$

Полученные выражения (4) и (5) позволяют рассчитывать геометрические размеры плазмоведа, обеспечивающего нанесение равномерных покрытий на боковую поверхность цилиндрических деталей с помощью вакуумно-дуговых испарителей. Величина напряженности магнитного поля, создаваемая плазмоводом, должна находиться в определенном соотношении с напряженностью магнитного поля, создаваемой магнитной системой, формирующей плазменный поток (фокусирующая или стабилизирующая катушки испарителя).

Аналогичным образом решена задача для определения размеров и формы плазмоведа, обеспечивающего равномерное нанесение покрытий на боковую поверхность изделий, имеющих форму конуса. Данная система представлена на рисунке 1.

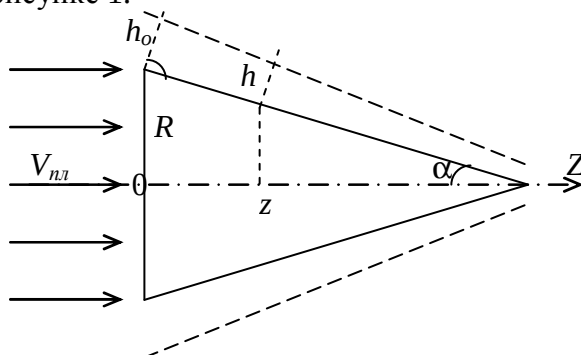


Рис. 1. Конусообразная деталь внутри магнитного плазмоведа

Конусообразную форму имеют некоторые виды штамповой оснастки, на которые с помощью вакуумно-дуговых испарителей наносили износостойкие покрытия из чистых металлов или нитридов и карбидов тугоплавких металлов. На рисунке 1 контур плазмоведа изображен пунктирными линиями, а деталь основанием конуса обращена навстречу вектору скорости плазменного потока. Такое расположение детали по отношению к потоку позволяет также решить вопрос о безкапельном нанесении покрытия на боковую (рабочую) поверхность конуса.

Аналогично предыдущему случаю:

$$S_z = \pi[h^2 \cos \alpha + 2h(H-z) \operatorname{tg} \alpha]; S_{\text{бок}} = \pi l_z(R+r); l_z = \frac{R-(H-z) \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha},$$

где α – половина угла вершины конуса, H – высота конуса, l_z – образующая конуса.

При решении системы уравнений (1-3), получено выражение для определения расстояния между боковой поверхностью конусообразной детали и плазмодом, охватывающим ее:

$$h = \sqrt{h_0^2 + \frac{2Hh_0 \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha} + (H-z)^2 \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{\cos^2 \alpha} - 0,5 \frac{V_s}{V_{nl}} \cdot \frac{R^2 - (H-z)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{\cos^2 \alpha} - (H-z) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha}}, \quad (6)$$

где V_s – ионно-звуковая скорость.

Таким образом, проблема получения равномерных покрытий на изделиях, имеющих осевую симметрию, успешно решается использованием фокусирующих плазмодов, внутри которых располагаются обрабатываемые изделия. Кроме того, решается проблема уменьшения микрокапельной фракции или полное устранение ее в покрытиях. Так, в случае с конусообразными изделиями, если боковая поверхность конуса находится вне зоны прямого попадания капель со стороны катода, капли в покрытии отсутствуют. Другим преимуществом данной системы является возможность ее использования при нанесении покрытий на длинномерные изделия при расположении их вдоль оси симметрии плазменного потока. При поперечном расположении изделий плазменному потоку обеспечение равномерности нанесения покрытий осуществляется сканированием потока или использованием нескольких испарителей.

Отмеченные преимущества рассмотренной выше системы – равномерность нанесения покрытий, уменьшение или устранение микрокапельной фракции, простота реализации расширяют области применения технологии вакуумно-дугового нанесения покрытий и номенклатуру обрабатываемых изделий.

Использование магнитных плазмодов при нанесении антисхватывающих покрытий на прессформы для получения оптической керамики позволило не только сформировать покрытия с высокой адгезией и высокой равномерностью по всей поверхности, но и не ухудшить состояние поверхности с точки зрения ее шероховатости (12 и 14 классы). На поверхность конусообразного восьмигранного в основании пуансона наносили покрытия Mo и W толщиной не более 0,5 мкм. Исследования поверхностных слоев показали, что в покрытиях отсутствовали дефекты в виде микрокапель продуктов эрозии катода. Таким образом, разработанная конструкция является эффективным сепаратором от микрокапель и обеспечивает высокое качество поверхностной обработки, как в режиме очистки поверхности, так и в режиме нанесения покрытия.

Изложенная методика и полученные выражения позволяют определять форму и геометрические размеры фокусирующих плазмодов. Довольно

хорошее (в пределах 10%) совпадение экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о пригодности предложенной методики и правильности расчетных соотношений и допущений при ее обосновании.

Список литературы

1. Кузнецов В.Г., Кострин Д.К. Взаимодействие потоков металлической плазмы с поверхностью сложной геометрической формы // Труды 14-й Международной конференции “Пленки и покрытия-2019”. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 19-23.
2. Кузнецов В.Г. Нанесение покрытий на электроды мощных генераторных ламп из плазмы вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18, № 2. – С. 111-118.
3. Абрамов И.С., Быстров Ю.А., Вильдгрубе В.Г. Плазменные ускорители и их применение в технологии // Обзоры по электронной технике. Серия 4. Электровakuумные и газоразрядные приборы. – 1986. – Вып. 3(1204). – 42 с.

References

1. Kuznetsov V.G, Kostrin D.K. Interaction of metal plasma flows with a surface of complex geometric shape // Proceedings of the 14th International Conference “Films and Coatings-2019”. – Saint-Petersburg, 2019. – P. 19-23.
2. Kuznetsov V.G. Coating the electrodes of high-power generator lamps from vacuum-arc discharge plasma // Vacuum engineering and technology. 2008, vol. 18, no. 2, pp. 111-118.
3. Abramov I.S., Bystrov Yu.A., Wildgrube V.G. Plasma accelerators and their application in technology // Reviews on electronic technology. Series 4. Electro-vacuum and gas-discharge devices. – 1986. – Issue 3(1204). – 42 p.

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией	Kuznetsov Viacheslav Gennadievich – doctor of science, head of laboratory
kvg-ipme@yandex.ru	

Received 01.11.2022