

Применение систем фильтрации пароплазменного потока дугового разряда для повышения качества формируемых покрытий

Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

dkkostrin@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности состава пароплазменного потока, генерируемого вакуумной дугой. Показана необходимость применения специализированных систем фильтрации, позволяющих очистить поток испаряемого вещества от микрокапельной составляющей. Приведен обзор наиболее распространенных систем для фильтрации потока плазмы, применяемых в современных вакуумно-дуговых установках. Продемонстрирована работа наиболее простой в реализации системы сепарации типа «жалюзи» при формировании алюмонитридных покрытий. Применение данной системы при относительно невысоких затратах на модернизацию технологической установки позволяет в значительной мере повысить качество наносимых покрытий, особенно в случае создания многослойных структур.

Ключевые слова: дуговой разряд, нанесение покрытий, технологическая установка, микрокапли, фильтрация плазмы

Для цитирования: Кострин Д. К. Применение систем фильтрации пароплазменного потока дугового разряда для повышения качества формируемых покрытий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 9. С. 18–29. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-18-29.

Original article

Application of Steam-Plasma Flow Filtration Systems of Arc Discharge to Improve the Quality of Formed Coatings

D. K. Kostrin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

dkkostrin@mail.ru

Abstract. Considers the features of the composition of the steam-plasma flow generated by a vacuum arc. The necessity of using specialized filtration systems to purify the flow of the evaporated substance from the microdroplet component is shown. An overview of the most common plasma flow filtration systems used in modern vacuum arc installations is given. The work of the easiest-to-implement separation system of the «jalousie» type in the formation of aluminitrile coatings is demonstrated. The use of this system at relatively low costs for the modernization of the technological installation makes it possible to significantly improve the quality of the applied coatings, especially in the case of the creation of multilayer structures.

Keywords: arc discharge, coating deposition, technological installation, microdroplets, plasma filtration

For citation: Kostrin D. K. Application of Steam-Plasma Flow Filtration Systems of Arc Discharge to Improve the Quality of Formed Coatings // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 9. P. 18–29. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-18-29.

Введение. Формирование пленок и покрытий для различных технических применений возможно с применением ряда вакуумно-плазменных технологических установок, в частности функционирующих на основе ускорителей плазмы [1]–[3]. В таких устройствах применяется вакуумная дуга, которую можно описать как электрический разряд, поддерживаемый в условиях высокого вакуума и характеризуемый большой плотностью тока и малыми межэлектродными напряжениями [4], [5].

В отличие от большинства других технологических установок, в устройствах на основе вакуумной дуги частицы наносимого материала обладают повышенным уровнем энергии, которым можно управлять с помощью параметров технологического процесса, что дает возможность формировать покрытия с улучшенными эксплуатационными характеристиками и высоким адгезионным сцеплением с подложкой [6]–[8]. Также можно отметить, что, используя разные режимы вакуумно-дуговой установки, можно осуществлять процессы очистки поверхности обрабатываемого изделия и дальнейшего формирования на ней пленки или покрытия в рамках одного технологического цикла [9]–[11].

Устойчивое поддержание вакуумной дуги в большинстве случаев обеспечивается испарением вещества с поверхности катода. Данный электрод либо охлаждается проточной водой и обычно называется «холодным», либо значительно нагревается в процессе работы и может быть охарактеризован как «горячий» [1], [2]. В условиях поддержания относительно невысокой температуры катода на его поверхности возникают хаотически движущиеся «катодные пятна», служащие источниками эмиссии электронов, а также заметного испарения вещества, из которого сформировано тело катода [12]–[21]. Данные образования имеют размеры порядка микрометра, а значение приходящей на них плотности тока может достигать нескольких мегаампер на квадратный сантиметр площади катода. При отсутствии охлаждения катода его температура может приближаться к температуре плавления вещества, из которого сформирован катод, и разряд охватывает собой полную поверхность электрода.

Особенности пароплазменного потока вакуумной дуги. Пароплазменный поток, создаваемый катодным пятном дугового разряда, характеризуется наличием в нем заметной доли микрокапельной составляющей. Эмиссия микрокапельной фазы является следствием выброса расплавленного материала из эрозионных кратеров под действием давления плазмы (рис. 1).

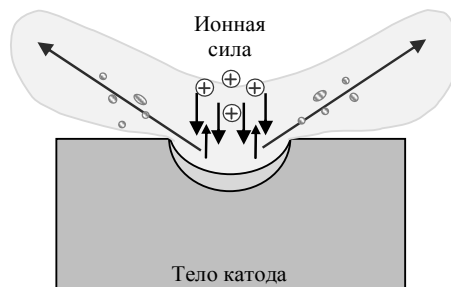


Рис. 1. Модель воздействия теплового потока на поверхность катода

Fig. 1. Model of the effect of heat flow on the cathode surface

Наличие в пароплазменном потоке вещества микрокапельной составляющей может быть объяснено возникновением в катодном пятне области, в которой температура материала катода превышает температуру плавления, а также образованием на рабочей поверхности катода кратерообразного рельефа (рис. 2).

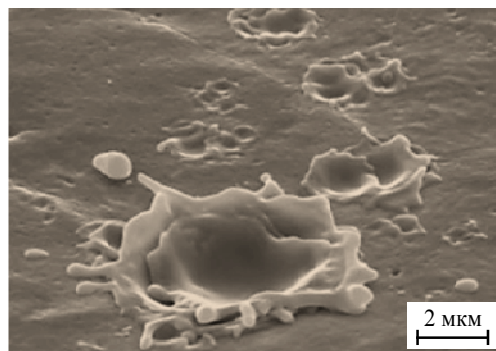


Рис. 2. Изменение рельефа рабочей поверхности катода в результате воздействия вакуумной дуги

Fig. 2. Change in the relief of the working surface of the cathode as a result of exposure to a vacuum arc

Над областью катодного пятна формируется зона с повышенной концентрацией металлического пара, возникшего вследствие эрозии поверхности катода. Ионный компонент пароплазменного потока оказывает воздействие на поверхность расплавленного материала на поверхности катода, что приводит к его разбрызгиванию с формированием микрокапельной составляющей, проникающей в объем технологической камеры [22]–[25]. На рис. 3 приведены результаты моделирования процесса выброса материала катода под воздействием ионной силы в области катодного пятна.

Распределение эмитируемых микрокапельных образований по таким специфическим параметрам, как размер, угол наклона траектории и скорость, существенно зависит от конструкции и режима работы вакуумно-дугового источника плазмы [9]–[11]. Наибольшая концентрация микрокапельной составляющей в пароплазменном потоке наблюдается в направлении $\approx 10...30^\circ$ к рабочей поверхности катода.

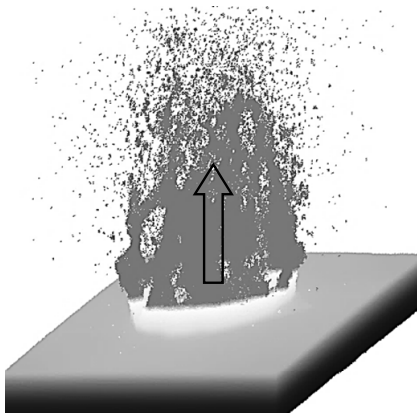


Рис. 3. Результаты моделирования процесса выброса материала катода
Fig. 3. Results of modeling the cathode material ejection process

Минимальный размер микрокапель в импульсных и стационарных вакуумных дугах оценивается как 5...20 нм, в то время как для катодов из легкоплавких материалов в стационарных дугах размер микрокапель может достигать десятков микрометров. Для всех материалов, используемых для формирования катодов, справедливо утверждение, что чем меньше температура плавления вещества и чем больше рабочая температура электрода, тем выше содержание микрокапельной составляющей в пароплазменном потоке. Скорость, приобретаемая фрагментами разбрызгиваемого расплавленного вещества, в дальнейшем превращающимися в перемещающиеся в технологическом объеме под небольшими углами к рабочей поверхности катода микрокапли, достигает нескольких сотен метров в секунду.

Повышение общего тока вакуумной дуги вызывает рост скорости распыления поверхности катода, что дает возможность увеличить эффективность операции нанесения пленки или покрытия. С другой стороны увеличение тока разряда вызывает заметное увеличение количества микрокапель в пароплазменном потоке. Снижением данного тока невозможно обеспечить уменьшение количества микрокапельных включений до некоторого удовлетворительно низкого значения вследствие того, что для поддержания разряда необходим ток, превышающий определенное минимальное значение.

При этом можно отметить, что дуговой разряд за счет своей положительной вольт-амперной характеристики может поддерживаться даже при относительно малых токах, когда на поверхности распыляемого электрода фиксируется только одно катодное пятно. В случае последующего снижения разрядного тока из-за меньшего энерговыде-

ления и снижения общего уровня эмиссии последнее катодное пятно исчезает и дуга погасает. Критическое значение разрядного тока обусловлено как характеристиками вещества, используемого для формирования тела катода, так и особенностями конструкции технологической установки и применяемыми мерами по управлению перемещением катодных пятен [26]–[30].

Все более широкое применение вакуумно-дуговых технологических установок для нанесения разнообразных пленок и покрытий требует разработки методов эффективной очистки пароплазменного тока от микрокапельной составляющей [31]–[34]. Сокращение суммарного числа микрокапель в пароплазменном потоке и снижение их диаметра может быть частично реализовано благодаря уменьшению общего тока вакуумной дуги. Снижением разрядного тока до уровня 40 % от стандартного можно добиться снижения содержания микрокапельной составляющей в пароплазменном потоке не более чем на четверть. При этом темп распыления тела катода уменьшается как минимум в пять раз, что крайне негативно сказывается как на производительности процесса формирования покрытий, так и на их качестве.

Методы фильтрации пароплазменного потока вакуумной дуги. Применение специализированных плазмооптических систем дает возможность благодаря подбору оптимальной конфигурации поля, создаваемого электромагнитной системой, управлять траекторией перемещения заряженных частиц пароплазменного потока вакуумной дуги. Необходимые параметры магнитного поля рассчитываются исходя из требований обеспечения условия замагниченности электронов.

При использовании установки с изогнутым плазмодом (рис. 4, где 1 – анодный узел; 2 – катодный узел; 3 – электромагниты системы стабилизации и фокусировки; 4 – изогнутый плазмод; 5 – электромагниты системы сопровождения; 6 – обрабатываемая поверхность) из-за малого коэффициента пропускания потери полезной составляющей пароплазменного потока могут достигать 98 % в случае применения поля электромагнитов с индукцией в две десятых тесла и подключения анода к «земле». Для повышения эффективности переноса напыляемого материала по изогнутому плазмоду требуется использование поля электромагнитов с индукцией, превышающей одну тесла. Получение такого уровня магнитной индукции требует решения ряда технических задач, вызванных существенным ростом габа-

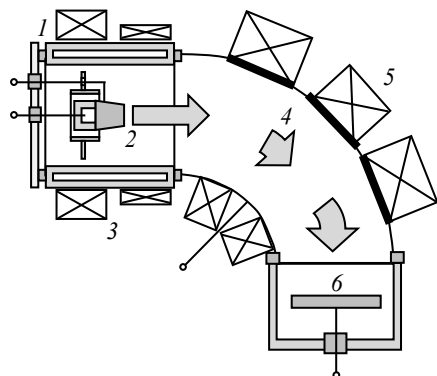


Рис. 4. Технологическая вакуумно-дуговая установка с изогнутым плазмодутом
Fig. 4. Technological vacuum arc installation with a curved plasma duct

ритов технологической установки и потребляемой от системы электропитания мощности.

Перемещение пароплазменного потока вакуумной дуги по изогнутому волноводу под воздействием как магнитного, так и электрического поля во многом упрощает контроль над транспортировкой заряженных частиц. На корпусе плазмодуота устанавливается потенциал с положительным знаком, что в сочетании с продольным полем, создаваемым электромагнитами системы сопровождения, приводит к появлению в пароплазменном потоке азимутального холловского электронного тока. Данный ток, в свою очередь, вызывает появление радиального электрического поля, ориентированного в направлении оси устройства. В данной системе под воздействием магнитного поля, копирующего форму изогнутой конструкции, ионы перемещаются к выходу из плазмодуота и попадают на обрабатываемую подложку.

По мере повышения положительного потенциала установленного на корпусе плазмодуота фиксируется рост степени пропускания системой заряженной части пароплазменного потока вакуумной дуги. Данное увеличение наблюдается лишь до некоторого значения, после достижения которого ток ионов на выходе системы начинает снижаться в связи с потерей части ионного потока из-за его отражения на входе в изогнутый плазмодуот.

Сепарация пароплазменного потока вакуумной дуги может осуществляться с применением других установленных в технологических установках систем, использующих контроль перемещения заряженных частиц с применением магнитных полей [35]–[38]. При этом конструкция части этих систем проще и их можно смонтировать в технологической установке без ее существенной перестройки.

На рис. 5 (1 – анодный узел; 2 – катодный узел; 3 – электромагниты системы стабилизации и фокусировки; 4 – плазмодуот; 5 – электромагниты системы сопровождения; 6 – обрабатываемая поверхность) приведена конструкция технологической установки, построенной с применением эффекта отражения заряженных частиц пароплазменного потока дугового разряда электромагнитным барьером, создаваемым полями электромагнитов системы сопровождения. Форма рабочего объема представляет собой усеченный конус, снаружи которого размещаются электромагниты, создающие поле, направленное противоположно полю источника пароплазменного потока. В рабочем объеме используются специальные экраны с установленным на них небольшим потенциалом с положительным знаком для формирования зон с небольшой проводимостью в местах пересечения корпуса силовыми линиями поля электромагнитов. В свою очередь обрабатываемые детали размещаются на крышке технологического объема.

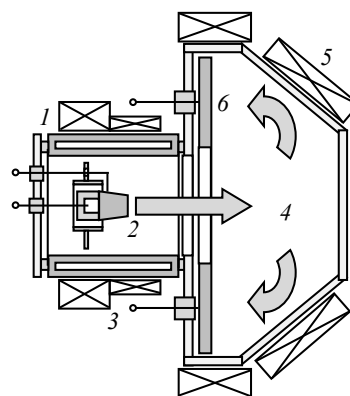


Рис. 5. Технологическая вакуумно-дуговая установка, использующая систему фильтрации пароплазменного потока с ее поворотом на 180°
Fig. 5. Technological vacuum arc installation using a steam-plasma flow filtration system with its 180° rotation

Контроль процесса сепарации фракций, составляющих пароплазменный поток, осуществляется с помощью потенциала, установленного на анодном узле. При этом производственная мощность вакуумно-дуговой установки в основном задается установленным на технологической камере напряжением, а также индукцией поля, формируемого системой электромагнитов. В случае формирования титановых покрытий на подложку наносится примерно одна треть от общей массы расплывленного в процессе горения дугового разряда вещества.

В системах фильтрации пароплазменного потока с «электромагнитным островком» (рис. 6, где 1 – анодный узел; 2 – катодный узел; 3 – электро-

магниты системы стабилизации и фокусировки; 4 – вспомогательный электромагнит; 5 – «электромагнитный островок»; 6 – обрабатываемая поверхность) имеющие заряд частицы перемещаются в направлении подложки по линиям симметричного относительно своей оси поля, формируемого двумя электромагнитами, работающими в противоположных направлениях. Отличительная черта данной системы по сравнению с рассмотренной ранее – это ее конструктивная простота, а также возможность получать более широко распространяющийся в направлении подложки очищенный от микрокапельных включений пароплазменный поток дугового разряда.

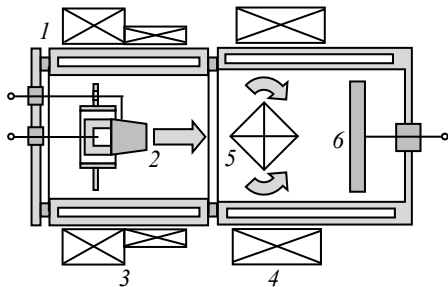


Рис. 6. Технологическая вакуумно-дуговая установка, использующая систему с «электромагнитным островком»
Fig. 6. Technological vacuum arc installation using a system with an «electromagnetic island»

Можно уточнить, что во многих образцах технологического оборудования не представляется возможным реализовать описанные методы фильтрации пароплазменного потока вакуумной дуги. Более просто в технической реализации и при этом не менее эффективно сепарирующее устройство типа «жалюзи», формирующее непрерывный и непреодолимый для перемещающейся по прямому направлению микрокапельной составляющей барьер. В данной системе микрокапельная фракция осаждается на стороне сепарирующего устройства, ориентированной в направлении торца катодного узла. Можно отметить, что скорость формирования пленки или покрытия на размещенной в технологической камере подложке задается только значением плотности тока ионов, поступающих на обрабатываемую поверхность.

На рис. 7 (1 – анодный узел; 2 – катодный узел; 3 – электромагниты системы стабилизации и фокусировки; 4 – сепаратор типа «жалюзи»; 5 – вспомогательный электромагнит; 6 – обрабатываемая поверхность) показано устройство технологической вакуумно-дуговой установки с сепарирующим устройством типа «жалюзи», имеющим кольца в форме скошенных конусов, направленные

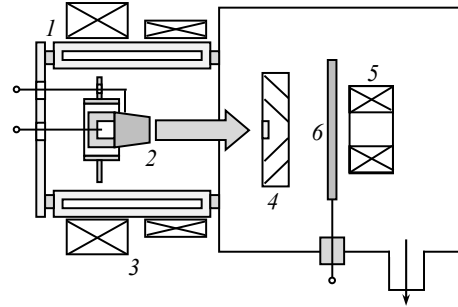


Рис. 7. Технологическая вакуумно-дуговая установка с сепарирующим устройством типа «жалюзи»
Fig. 7. Technological vacuum arc installation with a separating device of the «jalousie» type

ных меньшей стороной в ориентации поверхности подложки.

В данной установке пароплазменный поток вакуумной дуги преодолевает сепарирующее устройство с высокими потерями массы материала, превышающими 85 %. Большие потери вещества связаны с перемещением заряженных частиц плазмы в нисходящем, пространственно расходящемся, симметричном относительно оси системы поле, формируемом системами электромагнитов. При этом кольца сепарирующей системы расположены под углом относительно перпендикуляра к торцу катода, что осложняет их преодоление составляющими пароплазменного потока.

С целью снижения степени ослабления потока плазмы вакуумной дуги и повышения скорости формирования пленок и покрытий на обрабатываемой поверхности за держателем подложки можно расположить вспомогательный электромагнит [39]. На рис. 8 приведены результаты моделирования распределения аксиальной компоненты индукции поля, создаваемого системами электромагнитов, в такой вакуумно-дуговой технологической установке.

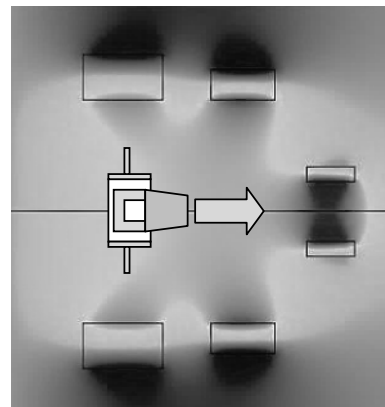


Рис. 8. Распределение аксиальной компоненты индукции поля, создаваемого системами электромагнитов, в рабочем объеме вакуумно-дуговой установки
Fig. 8. Distribution of the axial induction component of the field generated by the electromagnet systems in the working volume of the vacuum arc installation

При согласном подключении вспомогательно-го электромагнита к электромагнитам систем стабилизации и фокусировки создаются условия для локализации пароплазменного потока вакуумной дуги, что повышает эффективность преодоления заряженными частицами сепарирующего устройства. Продуктивность системы переноса заряженных частиц пароплазменного потока к подложке зависит от согласованности формы применяемого сепарирующего устройства и картины распространения поля, формируемого вспомогательной системой электромагнитов.

Эффективное согласование всех упомянутых ранее параметров технологической установки позволяет снизить потери материала при прохождении пароплазменным потоком объема сепаратора до 55 %. Дополнительно снизить потери при преодолении заряженными частицами барьера типа «жалюзи» можно с помощью установки на нем потенциала с положительным знаком. Однако при этом возникает еще более сложная техническая проблема охлаждения корпуса сепаратора в ходе нанесения пленок и покрытий.

Применение систем фильтрации пароплазменного потока вакуумной дуги при формировании пленок и покрытий. Рассмотрим использование системы очистки пароплазменного потока типа «жалюзи» (рис. 7) в процессе плазмохимического синтеза алюминитридного покрытия [40]–[46]. Свойства таких покрытий, формируемых с применением вакуумно-дуговых технологических установок в атмосфере азота при распылении алюминиевого катода, во многом зависят от присутствия в покрытии алюминиевых микрокапель, а также их диаметра. Используемый в технологическом процессе алюминиевый пароплазменный поток отличается достаточно большой долей микрокапельной составляющей. В результате экспериментов были обнаружены микрокапельные включения с диаметром более десяти микрон, что достаточно близко к толщине синтезируемых покрытий. Таким образом, алюминитридные покрытия не могут формироваться без применения специализированных систем фильтрации пароплазменного потока вакуумной дуги.

На рис. 9 показаны результаты микрофотографии двух образцов с нанесенным на их поверхность с применением вакуумно-дуговой установки алюминитридным соединением. В случае применения устройства сепарации типа «жалюзи» алюминитридные покрытия толщиной около двух микрон включают в себя зерна с диаметром не более 1/20 мкм.

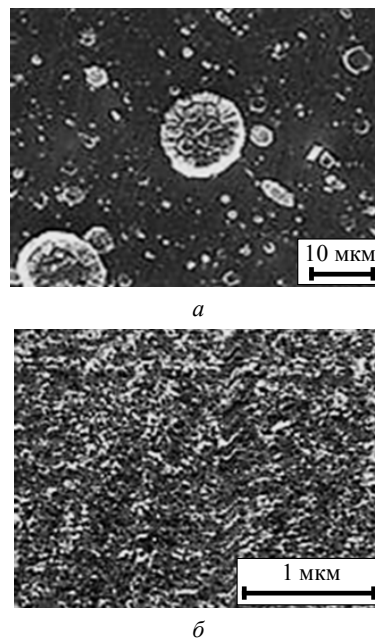


Рис. 9. Микрофотографии алюминитридных покрытий, полученных с применением вакуумно-дуговой установки: а – без использования дополнительных устройств; б – с использованием сепарирующего устройства типа «жалюзи»

Fig. 9. Microphotographs of the aluminitride coatings obtained using a vacuum arc installation: а – without the use of additional devices; б – using a separating device of the «jalousie» type

Рассмотрим нанесение сложных комбинированных покрытий на примере нитрида титана-алюминия [47]–[50]. Комбинированные соединения могут формироваться с использованием вакуумно-дуговой технологической установки, включающей в себя два параллельно функционирующих генератора плазмы с катодами из разных материалов (рис. 10, где 1 – анодные узлы; 2 – катодные узлы; 3 – электромагниты систем стабилизации и фокусировки; 4 – аттенюатор; 5 – сепаратор; б – обрабатываемая поверхность). Важнейшие технические задачи, решение которых требуется для получения высококачественных покрытий, – это выравнивание уровней ионных токов обоих генераторов плазмы и фильтрация алюминиевого пароплазменного потока от микрокапельной составляющей. Снижение интенсивности титанового пароплазменного потока осуществляется с применением аттенюатора, а фильтрация алюминиевого пароплазменного потока – с помощью сепарирующего устройства типа «жалюзи». В итоге значения плотностей ионных токов двух материалов, приходящиеся на обрабатываемую поверхность, составляет не более двадцати миллиампер на квадратный сантиметр.

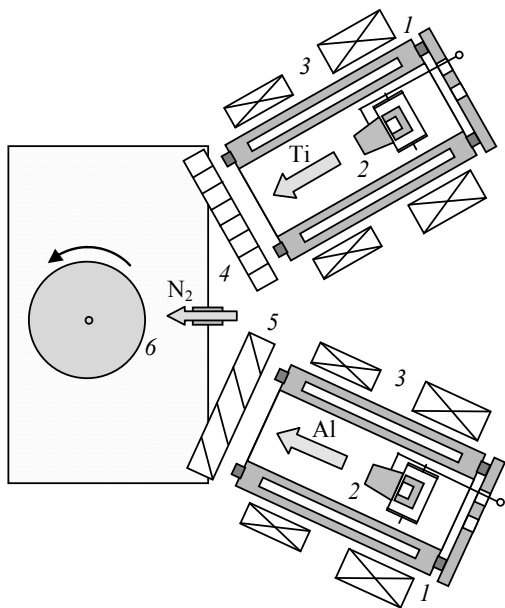
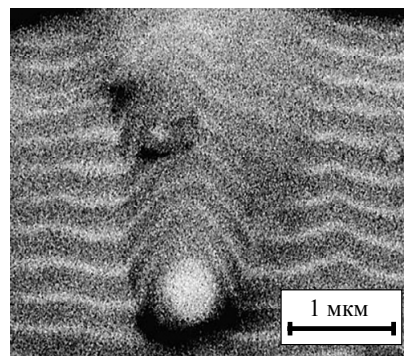


Рис. 10. Технологическая вакуумно-дуговая установка, включающая в себя два параллельно функционирующих генератора плазмы с катодами из разных материалов
Fig. 10. Technological vacuum arc installation, which includes two parallel-functioning plasma generators with cathodes made of different materials

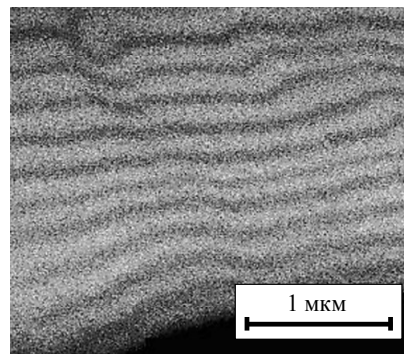
Изменяя параметры технологического процесса, можно регулировать соотношение в формируемом покрытии включения обоих металлов, а также их интерметаллического соединения. В качестве важного нюанса процесса синтеза покрытий с применением нескольких катодов можно отметить использование веществ с различными температурами плавления и атомными массами. Данный факт означает, что суммарный пароплазменный поток состоит из частиц с существенно различающейся кинетической энергией. В таком случае в процессе нанесения пленок и покрытий необходимо обеспечить не только согласование уровней ионных токов двух материалов, но и условий их конденсации.

При послойном нанесении покрытий в вакуумной камере с использованием двух вакуумно-дуговых источников плазмы, когда синтезируются нитридные соединения различного фазового состава с толщиной слоев порядка 100 нм, микрокапельное образование способно существенно нарушить последовательную структуру формируемой на поверхности системы (рис. 11). Также можно отметить, что появление микрокапельной фракции алюминия на поверхности формируемого покрытия приводит к заметному росту ее шероховатости.

Наличие поверхностных и внутренних микрокапель может негативно сказаться на свойствах и характеристиках формируемого покрытия. При этом уровень генерации микрокапельной фракции



а



б

Рис. 11. Влияние микрокапельной фракции на формирование последовательности слоев многослойного покрытия: а – без использования дополнительных устройств; б – с использованием сепарирующего устройства типа «жалюзи»

Fig. 11. The effect of the micro-droplet fraction on the formation of a sequence of layers of a multilayer coating: а – without the use of additional devices; б – with the use of a separating device of the «jalousie» type

и ее параметры тесно связаны с типом вещества, из которого сформировано тело катода, и условиями осаждения материала. Используя рассмотренный способ фильтрации микрокапельных образований, становится возможным получить упорядоченную структуру синтезируемого многослойного покрытия.

Заключение. Рассмотренная технология нанесения покрытий с применением достаточно простой системы фильтрации пароплазменного потока дугового разряда типа «жалюзи» позволяет получать покрытия с высоким уровнем адгезии к подложке и структурным совершенством и может использоваться для получения различных видов функциональных покрытий.

Необходимо подчеркнуть, что существующие на сегодняшний день технологические системы очистки, несмотря на то, что позволяют произвести качественную фильтрацию пароплазменного потока вакуумной дуги от микрокапельной составляющей, также значительно ослабляют поток материала, поступающего на обрабатываемую

поверхность. Таким образом, производительность технологических вакуумно-дуговых устройств, использующих описанные системы сепарации пароплазменного потока, существенно снижается, что ставит задачу применения установок, включающих в себя несколько параллельно функционирующих генераторов плазмы с индивидуаль-

ными системами фильтрации микрокапельных образований. Существенная трудоемкость создания таких технологических систем, а также дороговизна их разработки и использования в значительной мере сдерживает дальнейшее развитие методов нанесения покрытий с применением вакуумно-дугового разряда.

Список литературы

1. Лисенков А. А., Ветров Н. З. Вакуумные дуговые источники плазмы. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 208 с.
2. Лисенков А. А., Фролов В. Я. Вакуумно-дуговые устройства. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 247 с.
3. Электроразрядное оборудование и технологии создания наноструктурных слоев и покрытий / С. В. Григорьев, В. Н. Девятков, В. В. Денисов, Н. Н. Коваль, И. В. Лопатин, В. В. Шугуров, В. В. Яковлев // Уч. зап. Петрозаводского гос. ун-та. 2010. № 2. С. 86–95.
4. Anders A. Cathodic arcs: From fractal spots to energetic condensation. New York: Springer, 2008. 544 p. doi: 10.1007/978-0-387-79108-1.
5. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Yu. Cathodic arcs: Fractal voltage and cohesive energy rule // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 211503. doi: 10.1063/1.1937994.
6. Formation of coatings from the flow of metal plasma of a vacuum-arc discharge / A. A. Rikov, M. I. Yurchenkov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. 2018. Vol. 387. P. 012066. doi: 10.1088/1757-899X/387/1/012066.
7. Kostrin D. K., Lisenkov A. A. Surface modification by vacuum arc plasma source // Materials Sci. Forum. 2016. Vol. 843. P. 278–283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.278.
8. Modification of the surface layers with plasma of a vacuum-arc discharge by controlling the energy of precipitating particles / A. A. Rikov, M. I. Yurchenkov, M. I. Pikus, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1038. P. 012129. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012129.
9. Кострин Д. К. Управление режимом работы вакуумно-дугового источника плазмы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 5–9.
10. Кузнецов В. Г., Лисенков А. А. Локальное и интегральное тепловое воздействие катодного пятна вакуумной дуги на движущийся ленточный проводник // Металлообработка. 2009. № 6. С. 14–19.
11. Kostrin D. K. Operating modes of the vacuum-arc plasma source and method of their selection // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2726. P. 020013. doi: 10.1063/5.0134247.
12. Cathode spots of vacuum arc discharges: Motion control on the working surface / Yu. A. Bystrov, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, N. Z. Vetrov // Vakuum in Forschung und Praxis. 2015. Vol. 27, № 2. P. 22–25. doi: 10.1002/vipr.201500578.
13. Hantzsche E. Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance // IEEE Transactions on Plasma Science. 2003. Vol. 31. P. 799–808. doi: 10.1109/TPS.2003.818412.
14. Anders A. The fractal nature of vacuum arc cathode spots // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33. P. 1456–1464. doi: 10.1109/TPS.2005.856488.
15. Juttner B., Kleberg I. The retrograde motion of arc cathode spots in vacuum // J. of Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 2025–2036. doi: 10.1088/0022-3727/33/16/315.
16. Barendolts S. A., Mesyats G. A., Shmelev D. L. Structure and time behavior of vacuum arc cathode spots // IEEE Transactions on Plasma Science. 2003. Vol. 31. P. 809–816. doi: 10.1109/TPS.2003.818449.
17. Mesyats G. A., Barendolts S. A. The cathode spot of a high-current vacuum arc as a multiecton phenomenon // IEEE Transactions on Plasma Science. 2001. Vol. 29. P. 704–707. doi: 10.1109/27.964458.
18. Plasma parameters of an arc cathode spot at the low-current vacuum discharge / A. Batrakov, S. Popov, N. Vogel, B. Juttner, D. Proskurovsky // IEEE Transactions on Plasma Science. 2003. Vol. 31. P. 817–826. doi: 10.1109/TPS.2003.818427.
19. Juttner B. Cathode spots of electrical arcs // J. of Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. R103. doi: 10.1088/0022-3727/34/17/202.
20. Kostrin D. K., Martsinukov S. A. Modelling of the cathode spots motion on the surface of the cathode // J. of Phys.: Conf. Series. 2019. Vol. 1313. P. 012035. doi: 10.1088/1742-6596/1313/1/012035.
21. Plasma jet characteristics in vacuum arc with diffused cathode spot / R. Kh. Amirov, N. A. Vorona, A. V. Gavrikov, G. D. Liziakin, V. P. Polistchook, I. S. Samoylov, V. P. Smirnov, R. A. Usmanov, I. M. Yartsev // J. of Phys.: Conf. Series. 2016. Vol. 755. P. 011001. doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012059.
22. Anders A. The evolution of ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas: a review // Plasma Sources Sci. and Technol. 2012. Vol. 21. P. 035014. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/035014.
23. Measurements of the total ion flux from vacuum arc cathode spots / A. Anders, E. M. Oks, G. Y. Yushkov, K. P. Savkin, I. G. Brown, A. G. Nikolaev // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. Vol. 33. P. 1532–1536. doi: 10.1109/TPS.2005.856502.
24. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Y. Production of neutrals and their effects on the ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas // J. of Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 043303. doi: 10.1063/1.2769789.

25. Anders A., Yushkov G. Y. Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of magnetic fields // *J. of Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. P. 4824–4832. doi: 10.1063/1.1459619.
26. Effect of the microstructure of electrode materials on arc cathode spot dynamics / Y. Wang, C. Zhang, H. Zhang, B. Ding, K. Lu // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 2649–2654. doi: 10.1088/0022-3727/36/21/008.
27. Лисенков А. А. Влияние температуры катода на скорость перемещения катодных пятен вакуумно-дугового разряда // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2004. № 2. С. 24–28.
28. Лисенков А. А. Катодные пятна вакуумно-дугового разряда и динамика их развития // *Вакуумная техника и технология*. 2004. Т. 14, № 4. С. 221–226.
29. Лисенков А. А., Ветров Н. З., Гончаров В. Д. О динамике развития катодных пятен вакуумно-дугового разряда // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2004. № 1. С. 49–53.
30. Pavlov V. A. On the mechanism of reverse motion of a cathode spot // *J. of Appl. Mechanics and Technical Phys.* 2012. Vol. 53, № 3. P. 309–315. doi: 10.1134/S0021894412030017.
31. Martin P. J., Bendavid A. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition // *Thin Solid Films*. 2001. Vol. 394, № 1/2. P. 1–5. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01169-5.
32. Takikawa H., Tanoue H. Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2007. Vol. 35, № 4. P. 992–999. doi: 10.1109/TPS.2007.897907.
33. Evaporation of sintered cathodes in low-pressure arc discharges for nanocrystalline coatings synthesis: erosion and cathode spot characteristics / O. V. Krygina, I. M. Goncharenko, K. A. Koshkin, M. I. Lobach, O. B. Frants, N. V. Landl // *High Temperature Material Processes*. 2013. Vol. 17, № 1–2. P. 145–152. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2015013752.
34. Xie J., Komvopoulos K. Bilayer amorphous carbon films synthesized by filtered cathodic vacuum arc deposition // *J. of Materials Research*. 2016. Vol. 2028. P. 3161–3167. doi: 10.1557/jmr.2016.250.
35. High current vacuum arc appearance in non-homogeneous axial magnetic field / A. Chaly, A. Logachev, K. Zabello, S. Shkol'nik // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. Vol. 31, № 5. P. 884–889. doi: 10.1109/TPS.2003.818414.
36. Zhang H.-S., Komvopoulos K. Direct-current cathodic vacuum arc system with magnetic-field mechanism for plasma stabilization // *Rev. of Scientific Instruments*. 2008. Vol. 79. P. 073905. doi: 10.1063/1.2949128.
37. Control of cathodic arc spot motion under external magnetic field / L. Li, Y. Zhu, F. He, P. K. Chu, J. Li // *Vacuum*. 2013. Vol. 91. P. 20–23. doi: 10.1016/j.vacuum.2012.10.008.
38. Effect of ion mass and charge state on transport of vacuum arc plasmas through a biased magnetic filter / E. Byon, J.-K. Kim, S.-C. Kwon, A. Anders // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. Vol. 32, № 2. P. 433–439. doi: 10.1109/TPS.2004.826363.
39. Kostrin D. K. Method for calculating the magnetic system of a vacuum arc installation // *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2250. P. 020019. doi: 10.1063/5.0013180.
40. Technological capabilities of vacuum arc plasma sources: plasmochemical synthesis of nitride compounds / Yu. A. Bystrov, N. Z. Vetrov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2014. Vol. 26, № 5. P. 19–23. doi: 10.1002/vipr.201400563.
41. Хижняк В. Г., Аршук М. В., Дацюк О. Э. Диффузионные покрытия титана и алюминия с участием барьерного слоя TiN на стали 12X18H10T // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57, № 9. С. 56–62.
42. Кунченко В. В., Андреев А. А., Карتماзов Г. Н. Структура и свойства эрозионно-стойких вакуумно-дуговых покрытий на основе нитридов титана // *Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та*. 2001. № 2. С. 21–25.
43. Эрозионностойкие покрытия на основе нитридов титана, получаемые модифицированным методом вакуумно-дугового осаждения / В. Т. Толок, А. А. Романов, В. И. Фареник, В. А. Завалеев, И. М. Неклюдов, В. В. Кунченко, Ю. В. Кунченко // *Вестн. Харьковского ун-та*. 2003. Т. 585, № 1. С. 103–108.
44. Generation of low-temperature plasma by low-pressure arcs for synthesis of nitride coatings / O. V. Krygina, N. N. Koval, I. V. Lopatin, V. V. Shugurov, S. S. Kovalsky // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2016. Vol. 669. P. 012032. doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012032.
45. Cheng Y., Zheng Y. F. Characterization of TiN, TiC and TiCN coatings on Ti-50.6 at.% Ni alloy deposited by PIII and deposition technique // *Surface and Coatings Technol.* 2007. Vol. 201. P. 4909–4912. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.216.
46. Ding X. Z., Bui C. T., Zeng X. T. Abrasive wear resistance of Ti_{1-x}Al_xN hard coatings deposited by a vacuum arc system with lateral rotating cathodes // *Surface and Coatings Technol.* 2008. Vol. 203. P. 680. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.08.019.
47. Kostrin D. K. Single-layer and multi-layer wear-resistant coatings: Deposition by vacuum arc plasma source // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2019. Vol. 31, № 2. P. 32–35. doi: 10.1002/vipr.201900709.
48. PalDey S., Deevi S. Properties of single layer and gradient (Ti, Al) N coatings // *Materials Sci. and Engin.: A*. 2003. Vol. 361. P. 1. doi: 10.1016/S0921-5093(03)00473-8.
49. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review // *Materials Sci. and Engin.: A*. 2003. Vol. 342. P. 58. doi: 10.1016/S0921-5093(02)00259-9.
50. Artificially modulated hard coatings produced with a vacuum arc evaporator / P. A. Tsygankov, F. F. Parada Becerra, V. D. Dugar-Zhabon, A. Plata, E. D. V-Nino // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2016. Vol. 687. P. 012005. doi: 10.1088/1742-6596/687/1/012005.

Информация об авторе

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

References

1. Lisenkov A. A., Vetrov N. Z. *Vakuumnye dugovye istochniki plazmy*. SPb.: Jenergoatomizdat, 2000. 208 s. (In Russ.).
2. Lisenkov A. A., Frolov V. Ja. *Vakuumno-dugovye ustrojstva*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 247 s. (In Russ.).
3. *Jelektrozrazjadnoe oborudovanie i tehnologii sozdaniya nanostrukturnyh sloev i pokrytij* / S. V. Grigor'ev, V. N. Devjatkov, V. V. Denisov, N. N. Koval', I. V. Lopatin, V. V. Shugurov, V. V. Jakovlev // *Uch. zap. Petrozavodskogo gos. un-ta*. 2010. № 2. S. 86–95. (In Russ.).
4. Anders A. *Cathodic arcs: From fractal spots to energetic condensation*. New York: Springer, 2008. 544 p. doi: 10.1007/978-0-387-79108-1.
5. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Yu. *Cathodic arcs: Fractal voltage and cohesive energy rule* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 211503. doi: 10.1063/1.1937994.
6. *Formation of coatings from the flow of metal plasma of a vacuum-arc discharge* / A. A. Rikov, M. I. Yurchenkov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin.* 2018. Vol. 387. P. 012066. doi: 10.1088/1757-899X/387/1/012066.
7. Kostrin D. K., Lisenkov A. A. *Surface modification by vacuum arc plasma source* // *Materials Sci. Forum.* 2016. Vol. 843. P. 278–283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.278.
8. *Modification of the surface layers with plasma of a vacuum-arc discharge by controlling the energy of precipitating particles* / A. A. Rikov, M. I. Yurchenkov, M. I. Pikus, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov // *J. of Physics: Conf. Series.* 2018. Vol. 1038. P. 012129. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012129.
9. Kostrin D. K. *Upravlenie rezhimom raboty vakuumno-dugovogo istochnika plazmy* // *Izvestija SPbGJeTU «LJeTI»*. 2019. № 3. S. 5–9. (In Russ.).
10. Kuznecov V. G., Lisenkov A. A. *Lokal'noe i integral'noe teplovoe vozdejstvie katodnogo pjatna vakuumnoj dugi na dvizhushhij lentochnyj provodnik* // *Metalloobrabotka*. 2009. № 6. S. 14–19. (In Russ.).
11. Kostrin D. K. *Operating modes of the vacuum-arc plasma source and method of their selection* // *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2726. P. 020013. doi: 10.1063/5.0134247.
12. *Cathode spots of vacuum arc discharges: Motion control on the working surface* / Yu. A. Bystrov, D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, N. Z. Vetrov // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2015. Vol. 27, № 2. S. 22–25. doi: 10.1002/vipr.201500578.
13. Hantzsch E. *Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2003. Vol. 31. P. 799–808. doi: 10.1109/TPS.2003.818412.
14. Anders A. *The fractal nature of vacuum arc cathode spots* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2005. Vol. 33. P. 1456–1464. doi: 10.1109/TPS.2005.856488.
15. Juttner B., Kleberg I. *The retrograde motion of arc cathode spots in vacuum* // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2000. Vol. 33. P. 2025–2036. doi: 10.1088/0022-3727/33/16/315.
16. Barendolts S. A., Mesyats G. A., Shmelev D. L. *Structure and time behavior of vacuum arc cathode spots* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2003. Vol. 31. P. 809–816. doi: 10.1109/TPS.2003.818449.
17. Mesyats G. A., Barendolts S. A. *The cathode spot of a high-current vacuum arc as a multiecton phenomenon* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2001. Vol. 29. P. 704–707. doi: 10.1109/27.964458.
18. *Plasma parameters of an arc cathode spot at the low-current vacuum discharge* / A. Batrakov, S. Popov, N. Vogel, B. Juttner, D. Proskurovsky // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2003. Vol. 31. P. 817–826. doi: 10.1109/TPS.2003.818427.
19. Juttner B. *Cathode spots of electrical arcs* // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34. P. R103. doi: 10.1088/0022-3727/34/17/202.
20. Kostrin D. K., Martsinukov S. A. *Modelling of the cathode spots motion on the surface of the cathode* // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1313. P. 012035. doi: 10.1088/1742-6596/1313/1/012035.
21. *Plasma jet characteristics in vacuum arc with diffused cathode spot* / R. Kh. Amirov, N. A. Vorona, A. V. Gavrikov, G. D. Liziakin, V. P. Polistchook, I. S. Samoylov, V. P. Smirnov, R. A. Usmanov, I. M. Yartsev // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2016. Vol. 755. P. 011001. doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012059.
22. Anders A. *The evolution of ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas: a review* // *Plasma Sources Sci. and Technol.* 2012. Vol. 21. P. 035014. doi: 10.1088/0963-0252/21/3/035014.
23. *Measurements of the total ion flux from vacuum arc cathode spots* / A. Anders, E. M. Oks, G. Y. Yushkov, K. P. Savkin, I. G. Brown, A. G. Nikolaev // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2005. Vol. 33. P. 1532–1536. doi: 10.1109/TPS.2005.856502.
24. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Y. *Production of neutrals and their effects on the ion charge states in cathodic vacuum arc plasmas* // *J. of Appl. Phys.* 2007. Vol. 102. P. 043303. doi: 10.1063/1.2769789.
25. Anders A., Yushkov G. Y. *Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of mag-*

netic fields // *J. of Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. P. 4824–4832. doi: 10.1063/1.1459619.

26. Effect of the microstructure of electrode materials on arc cathode spot dynamics / Y. Wang, C. Zhang, H. Zhang, B. Ding, K. Lu // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 2649–2654. doi: 10.1088/0022-3727/36/21/008.

27. Lisenkov A. A. Vlijanie temperatury katoda na skorost' peremeshhenija katodnyh pjaten vakuumno-dugovogo razrjada // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2004. № 2. S. 24–28. (In Russ.).

28. Lisenkov A. A. Katodnye pjatna vakuumno-dugovogo razrjada i dinamika ih razvitija // *Vakuumnaja tehnika i tehnologija*. 2004. T. 14, № 4. S. 221–226. (In Russ.).

29. Lisenkov A. A., Vetrov N. Z., Goncharov V. D. O dinamike razvitija katodnyh pjaten vakuumno-dugovogo razrjada // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2004. № 1. S. 49–53. (In Russ.).

30. Pavlov V. A. On the mechanism of reverse motion of a cathode spot // *J. of Appl. Mechanics and Technical Phys.* 2012. Vol. 53, № 3. P. 309–315. doi: 10.1134/S0021894412030017.

31. Martin P. J., Bendavid A. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition // *Thin Solid Films*. 2001. Vol. 394, № 1/2. P. 1–5. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01169-5.

32. Takikawa H., Tanoue H. Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2007. Vol. 35, № 4. P. 992–999. doi: 10.1109/TPS.2007.897907.

33. Evaporation of sintered cathodes in low-pressure arc discharges for nanocrystalline coatings synthesis: erosion and cathode spot characteristics / O. V. Kryšina, I. M. Goncharenko, K. A. Koshkin, M. I. Lobach, O. B. Frants, N. V. Landl // *High Temperature Material Processes*. 2013. Vol. 17, № 1–2. P. 145–152. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2015013752.

34. Xie J., Komvopoulos K. Bilayer amorphous carbon films synthesized by filtered cathodic vacuum arc deposition // *J. of Materials Research*. 2016. Vol. 2028. P. 3161–3167. doi: 10.1557/jmr.2016.250.

35. High current vacuum arc appearance in non-homogeneous axial magnetic field / A. Chaly, A. Logachev, K. Zabello, S. Shkol'nik // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. Vol. 31, № 5. P. 884–889. doi: 10.1109/TPS.2003.818414.

36. Zhang H.-S., Komvopoulos K. Direct-current cathodic vacuum arc system with magnetic-field mechanism for plasma stabilization // *Rev. of Scientific Instruments*. 2008. Vol. 79. P. 073905. doi: 10.1063/1.2949128.

37. Control of cathodic arc spot motion under external magnetic field / L. Li, Y. Zhu, F. He, P. K. Chu, J. Li // *Vacuum*. 2013. Vol. 91. P. 20–23. doi: 10.1016/j.vacuum.2012.10.008.

38. Effect of ion mass and charge state on transport of vacuum arc plasmas through a biased magnetic filter / E. Byon, J.-K. Kim, S.-C. Kwon, A. Anders // *IEEE Transac-*

tions on Plasma Science. 2004. Vol. 32, № 2. P. 433–439. doi: 10.1109/TPS.2004.826363.

39. Kostrin D. K. Method for calculating the magnetic system of a vacuum arc installation // *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2250. P. 020019. doi: 10.1063/5.0013180.

40. Technological capabilities of vacuum arc plasma sources: Plasmochemical synthesis of nitride compounds / Yu. A. Bystrov, N. Z. Vetrov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2014. Vol. 26, № 5. P. 19–23. doi: 10.1002/vipr.201400563.

41. Hizhnjak V. G., Arshuk M. V., Dacjuk O. Je. Dif-fuzionnye pokrytija titana i aljuminija s uchastiem bar'erno-go sloja TiN na stali 12H18N10T // *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija*. 2014. T. 57, № 9. S. 56–62. (In Russ.).

42. Kunchenko V. V., Andreev A. A., Kartmazov G. N. Struktura i svojstva jerozionno-stojkih vakuumno-dugovyh pokrytij na osnove nitridov titana // *Nauch. vedomosti Belgorodskogo gos. un-ta*. 2001. № 2. C. 21–25. (In Russ.).

43. Jerozionnostojkie pokrytija na osnove nitridov titana, poluchaemye modifitsirovannym metodom vakuumno-dugovogo osazhdenija / V. T. Tolok, A. A. Romanov, V. I. Farenik, V. A. Zavaleev, I. M. Nekljudov, V. V. Kunchenko, Ju. V. Kunchenko // *Vestn. Har'kovskogo un-ta*. 2003. T. 585, № 1. S. 103–108. (In Russ.).

44. Generation of low-temperature plasma by low-pressure arcs for synthesis of nitride coatings / O. V. Kryšina, N. N. Koval, I. V. Lopatin, V. V. Shugurov, S. S. Kovalsky // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2016. Vol. 669. P. 012032. doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012032.

45. Cheng Y., Zheng Y. F. Characterization of TiN, TiC and TiCN coatings on Ti–50.6 at.% Ni alloy deposited by PIII and deposition technique // *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201. P. 4909–4912. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.216.

46. Ding X. Z., Bui C. T., Zeng X. T. Abrasive wear resistance of Ti_{1-x}Al_xN hard coatings deposited by a vacuum arc system with lateral rotating cathodes // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 203. P. 680. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.08.019.

47. Kostrin D. K. Single-layer and multi-layer wear-resistant coatings: Deposition by vacuum arc plasma source // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2019. Vol. 31, № 2. P. 32–35. doi: 10.1002/vipr.201900709.

48. PalDey S., Deevi S. Properties of single layer and gradient (Ti, Al) N coatings // *Materials Sci. and Engin.: A*. 2003. Vol. 361. P. 1. doi: 10.1016/S0921-5093(03)00473-8.

49. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review // *Materials Sci. and Engin.: A*. 2003. Vol. 342. P. 58. doi: 10.1016/S0921-5093(02)00259-9.

50. Artificially modulated hard coatings produced with a vacuum arc evaporator / P. A. Tsygankov, F. F. Parada Becerra, V. D. Dugar-Zhabon, A. Plata, E. D. V-Nino // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2016. Vol. 687. P. 012005. doi: 10.1088/1742-6596/687/1/012005.

Information about the author

Dmitry K. Kostrin – Dr Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; принята к публикации после рецензирования 10.08.2023; опубликована онлайн 23.11.2023.

Submitted 22.06.2023; accepted 10.08.2023; published online 23.11.2023.
