

ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.В. Демчишин¹, А.А. Демчишин², В.А. Миченко¹

¹Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.

03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: ademch@ipms.kiev.ua

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Представлена модифицированная вакуумно-дуговая установка промышленного типа общей мощностью 120 кВт для нанесения функциональных покрытий на детали ответственного назначения. Особенностью установки является использование более простых в изготовлении восьми планарных катодов вместо одного трубчатого, что обеспечивает более длительный ресурс работы установки без замены испаряемых элементов, снижение уровня порогового тока дугового разряда, более высокий коэффициент использования материала катодов, а также получение в одном технологическом процессе двухслойных покрытий с различным содержанием легирующих элементов (например, Al в титановом сплаве) в каждом слое путем последовательного использования четырех катодов с одним химсоставом и затем следующих четырех катодов с другим химсоставом. В предлагаемой установке предусматривается также использование импульсно-модулированного источника питания подложкодержателя, что позволяет получать высококачественные слои металлических и неметаллических покрытий на поверхности рабочих изделий. Отработана технология катодно-дугового испарения с использованием планарных катодов из технически чистого титана и никелевых сплавов СДП-2 и СДП-6 на модифицированной вакуумно-дуговой установке Булат-3Т. Представлена структура поверхности и поперечного излома конденсата СДП-6 толщиной 60...80 мкм и распределение металлических элементов по толщине конденсата, свидетельствующее о химической однородности осажденного слоя. Для примера показана также лопатка из жаропрочного никелевого сплава ЖС6 с нанесенным таким образом функциональным покрытием из сплава СДП-6. Библиогр. 2, рис. 6.

Ключевые слова: вакуумно-дуговая установка; планарный катод; импульсный источник питания; подложкодержатель; структура поверхности; конденсат; распределение элементов; покрытие

К существующим промышленным вакуумно-дуговым установкам для нанесения покрытий из металлических сплавов, таких как NiCrAlY, CoCrAlY, на лопатки газовых турбин относятся установки МАП-1, МАП-2, разработанные в ВИАМ, г. Москва. Эти установки работают на авиамоторостроительных заводах стран СНГ. В качестве испарителя в них используется цилиндрический трубчатого типа катод, расположенный аксиально в центре вакуумной рабочей камеры. Круглый планетарного типа подложкодержатель установлен по периферии этой же вакуумной рабочей камеры.

Основные недостатки этих установок:

трудности, связанные с изготовлением (литье и последующая механическая обработка) трубчатого катода, формируемого из труднообрабатываемых многокомпонентных сплавов;

весьма низкий срок службы катода вследствие малого объема металла испарителя;

неравномерная эрозия катода вдоль его оси;

электрическое смещение подложек с использованием постоянного тока способствует образованию микродуг на их поверхности во время ионной очистки и осаждения покрытия, что ведет к ухудшению структуры покрытия;

наличие «масляного» вакуума, что является причиной загрязнения поверхности подложек парами масла диффузионного насоса и наличия углеводородных примесей в покрытии.

Поэтому авторами данной статьи разработана вакуумно-дуговая установка для нанесения покрытий, которая включает в себя:

простые по форме планарные катоды, более легкие в изготовлении;

восемь прямоугольных катодов вместо одного трубчатого, что обеспечивает более длительный ресурс работы испарительного источника и меньшую длительность нанесения покрытия, а также позволяет получать в едином технологическом процессе двухслойное связующее металлическое покрытие с различным содержанием легирующих элементов (например Al) в каждом слое путем последовательного использования 4-х катодов с одним химсоставом и затем следующих 4-х катодов с другим химсоставом;

восемь планарных катодов располагаются по периферии вакуумной рабочей камеры, что позволяет обеспечить простой доступ к ним для обслуживания;

оригинальное электрическое смещение подложки, которое позволяет предотвратить дуго-

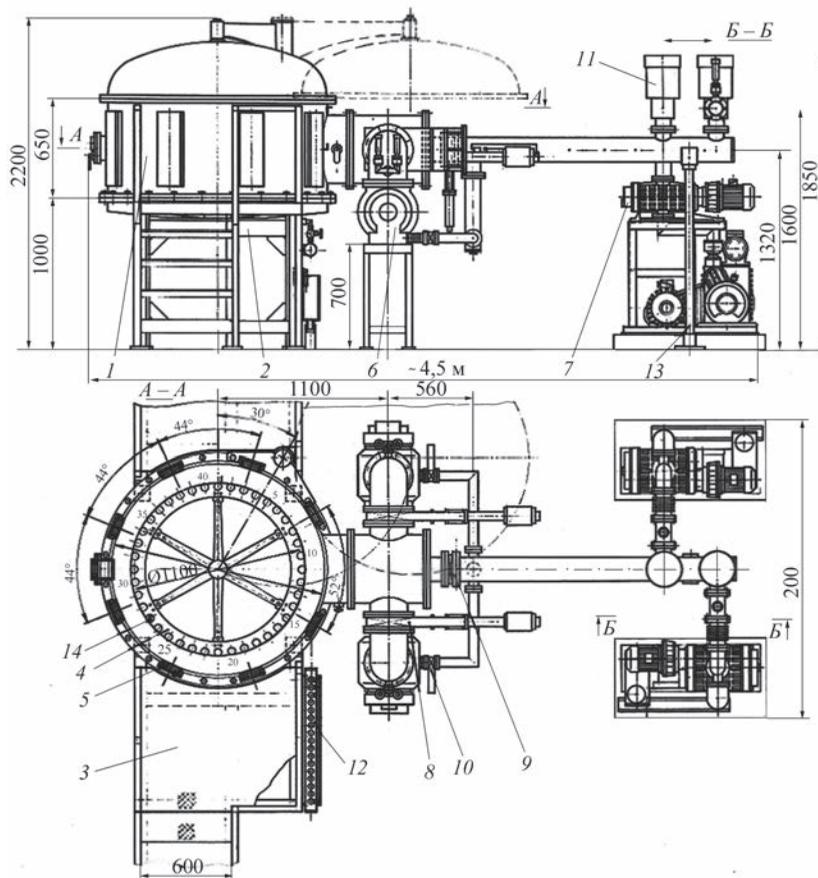


Рис. 1. Схема катодно-дуговой установки для нанесения функциональных покрытий: 1 — камера вакуумная; 2 — подставка вакуумной камеры; 3 — рабочая площадка; 4 — карусель; 5 — электродуговой планарный испаритель (8 шт.); 6 — насос турбомолекулярный (2 шт.); 7 — агрегат АВР-150 (2 шт.); 8 — затвор вакуумный Ду 250 (2 шт.); 9 — затвор вакуумный Ду 160 (1 шт.); 10 — затвор вакуумный Ду 63 (2 шт.); 11 — клапан аварийный (2 шт.); 12 — гидроблок; 13 — опора; 14 — обрабатываемое изделие (40 шт.)

образование и искрение на подложке во время ионной очистки перед нанесением покрытия и поверхности самого покрытия в период его осаждения, чтобы обеспечить более высокую адгезию покрытия с подложкой и более плотную структуру осаждаемого слоя;

«безмасляный» вакуум, благодаря применению турбомолекулярных насосов.

Оригинальное электрическое смещение подложки обеспечивается с помощью: импульсно модулированного постоянно-токового и среднечастотного переменного-токового источника питания подложкодержателя. В случае реактивного режима осаждения покрытия этот тип электрического смещения подложки позволяет активировать реакционный рабочий газ и получать высококачественный слой оксида на поверхности покрытия.

Схема обсуждаемой катодно-дуговой установки представлена на рис. 1.

Технические параметры установки

Общая мощность установки, кВт	120
Потребляемая суммарная мощность дуговых испарителей, кВт	80
Внутренний диаметр рабочей камеры, мм	1400

Высота обечайки рабочей камеры, мм	650
Общая высота рабочей камеры по ее центральной оси, мм	1056
Количество планарных дуговых испарителей (450×200×16 мм), шт.	8
Производительность установки при одной загрузке лопаток, шт.:	
высотой до 125 мм и диаметром 50 мм	80
высотой от 125 до 250 мм и диаметром 85 мм	40
высотой от 250 до 320 мм и диаметром 100 мм	20

Для обеспечения высокой адгезии наносимого покрытия к поверхности подложек необходимо предварительно осуществить их очистку от различных загрязнений. Известно, что адсорбция газов на поверхности составляет примерно $2,5 \cdot 10^{14}$ ат/см² с энергией адсорбции 2...4 эВ/ат. При напуске воздуха в рабочую камеру установки в нее попадает влага. При откачке на внутренние стенки камеры и на подложки осаждаются также пары масла, если используются паромасляные насосы. Жировые загрязнения попадают на подложки и при загрузке их в планетарный механизм. Вода и углеводороды хорошо удерживаются на поверхностях вакуумной камеры и рабочих изделий,

что ухудшает сцепление осаждаемого покрытия с подложками. Для очистки покрываемых изделий в этих случаях используется источник отрицательного напряжения порядка 1...3 кВ, который подключается к подложкодержателю. Разряд-плазма создается с помощью распыления материала катода и ускоренные отрицательным полем ионы металлической плазмы бомбардируют подложки, обеспечивая чистку их поверхности за счет термической десорбции и травления.

Для этих целей в разрабатываемой установке предусматривается наличие высоковольтного источника ступенчатого типа, позволяющего подавать на держатель подложек 1...3 кВ. При напряжениях выше 3 кВ чистка подложек от поверхностных загрязнений уменьшается из-за возрастания глубины проникновения ионов вглубь материала подложек. Предусматривается также использование импульсно-модулированного постоянно-токового и среднечастотного переменного-токового источника питания подложкодержателя, что позволяет получать высококачественные слои диэлектрических материалов (например, оксидов) на поверхности металлических покрытий в случае реакционного режима осаждения финишного слоя. Диапазон регулирования опорного напряжения, подаваемого на подложки во время осаждения покрытия, составляет 15...250 В. Предельное давление в вакуумной камере составляет $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ торр). Вакуумирование рабочей камеры установки осуществляется с помощью двухканальной системы откачки, что позволяет реализовывать высокую скорость откачки на начальных этапах вакуумирования камеры (уменьшая таким образом время откачки) и повышать безопасность нагрева изделий и нанесения на них покрытий в случае выхода из строя в период рабо-

чих циклов одного из насосов, что обеспечивает сохранность в надлежащем состоянии дорогостоящих покрываемых изделий в рабочей камере. В качестве форвакуумного агрегата предлагается использование комбинации форвакуумного насоса ВСО Edwards GV160 Drystar производительностью 200 м³/ч и насоса Рутса ЕН 1200 производительностью 1000 м³/ч. Расход охлаждающей воды составляет 25 и 2 л/мин соответственно. Установленная мощность равна 7,5 и 3,0 кВт. Преимущества такого агрегата следующие: высокая скорость откачки, простота обслуживания, низкая стоимость эксплуатации, наличие шумоизолирующего корпуса, интегрирование с управляющей ЭВМ.

Для получения высокого «безмасляного» вакуума предлагается использование двух турбомолекулярных насосов фирмы «Pfeiffer/Balzers» ТРН-2101PS производительностью 2100 л/с каждый. Преимуществом таких насосов является то, что скорость откачки практически не зависит от давления в камере в широком диапазоне рабочих давлений независимо от типа используемых газов в камере. Насосы могут быть также снабжены охлаждающим устройством Polycold PFC 500, что дает преимущества при малых длительностях откачки или при использовании пористых подложек. В этих случаях скорость откачки паров десорбированной воды достигает 4000 л/с.

Крышка камеры является отъемной частью, предназначенной для удобства загрузки и выгрузки камеры во время эксплуатации, а также для ее осмотра, чистки и ремонта. Для сокращения времени загрузки и выгрузки покрываемых изделий из рабочей камеры предусмотрено удаление подложкодержателя кольцевого типа с закрепленными в нем деталями из камеры и загрузка карусели с новыми

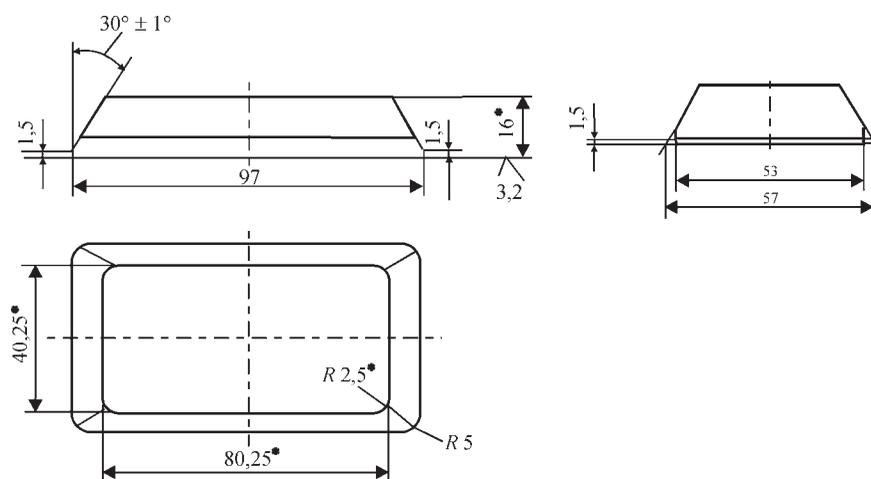


Рис. 2. Габариты планарных металлических катодов, использованных для отработки режимов испарения: * — размеры для справок (расчетные)

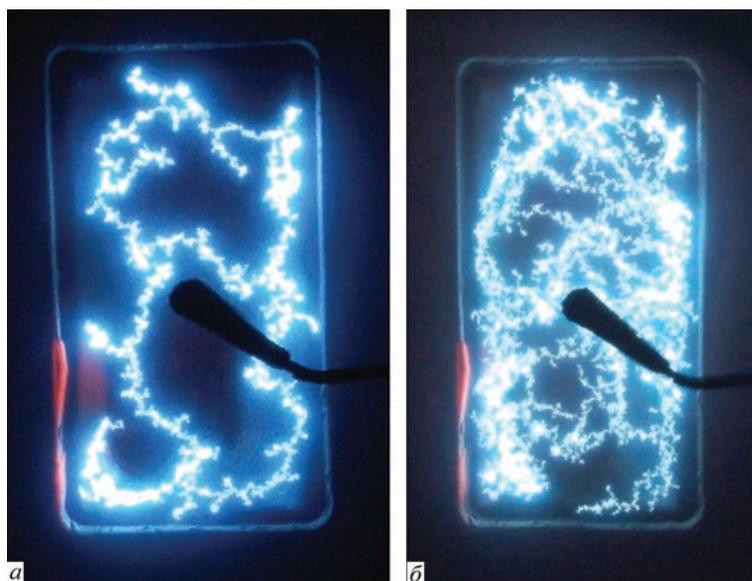


Рис. 3. Катодно-дуговые пятна на поверхности титанового планарного катода: *a* — $I_d = 100$; *б* — $I_d = 140$ А

изделиями в камеру с помощью кран-балки через верхний люк камеры при открытой крышке.

Для отработки технологии катодно-дугового испарения применительно к конструкции рассматриваемой установки были изготовлены планарные катоды из технически чистого титана и сплавов СДП-2 и СДП-6, размеры и форма которых представлены на рис. 2. Соответствующие катодные узлы с катодами прямоугольного типа устанавливали на установке Булат-3Т.

На рис. 3 представлены фотографии катодных пятен на поверхности титанового планарного катода, образовавшихся при разных значениях тока

дугового разряда. Приведенные данные свидетельствуют об увеличении плотности катодных пятен в случае роста разрядного тока. После полной выработки планарный катод имеет корытоподобную форму и высокий коэффициент использования материала катода. Особенностью указанных испарителей является снижение уровня порогового тока, выше которого обеспечивается стабильная работа дугового разряда, что подтверждают и другие исследователи [1].

Конденсацию плазменных потоков при вакуумно-дуговом испарении планарных катодов, изготовленных литьем из сплавов СДП-2 и СДП-

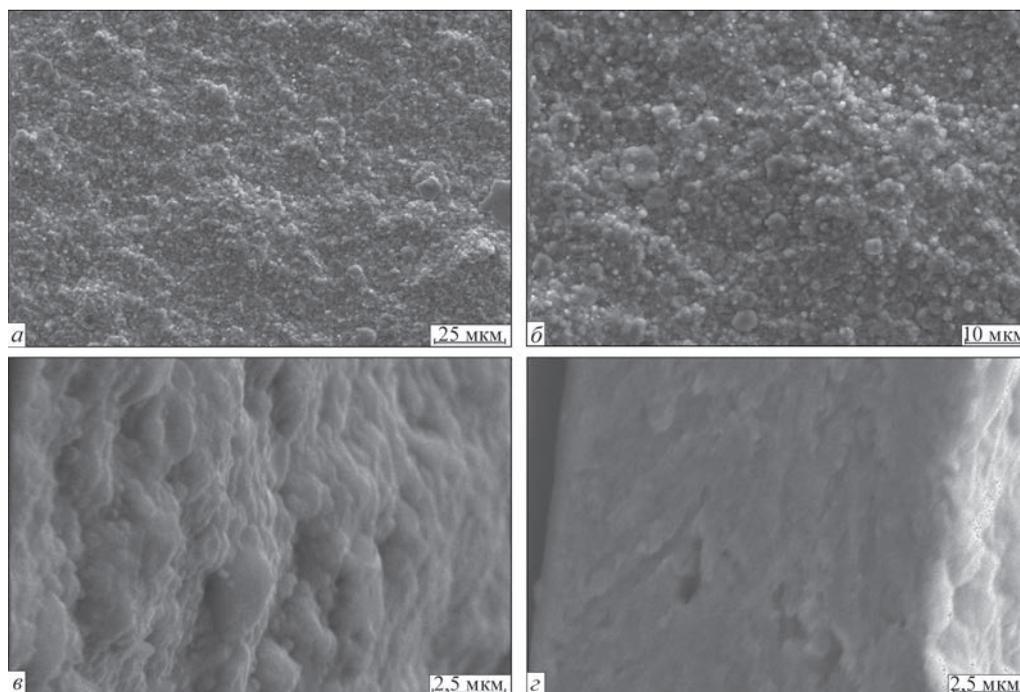


Рис. 4. Структура поверхности и поперечного излома вакуумно-дугового конденсата сплава СДП-6 (ток дуги — 125 А, потенциал подложки — 180 В); *a* — $\times 720$; *б* — $\times 1520$; *в* — $\times 7200$; *г* — $\times 7200$

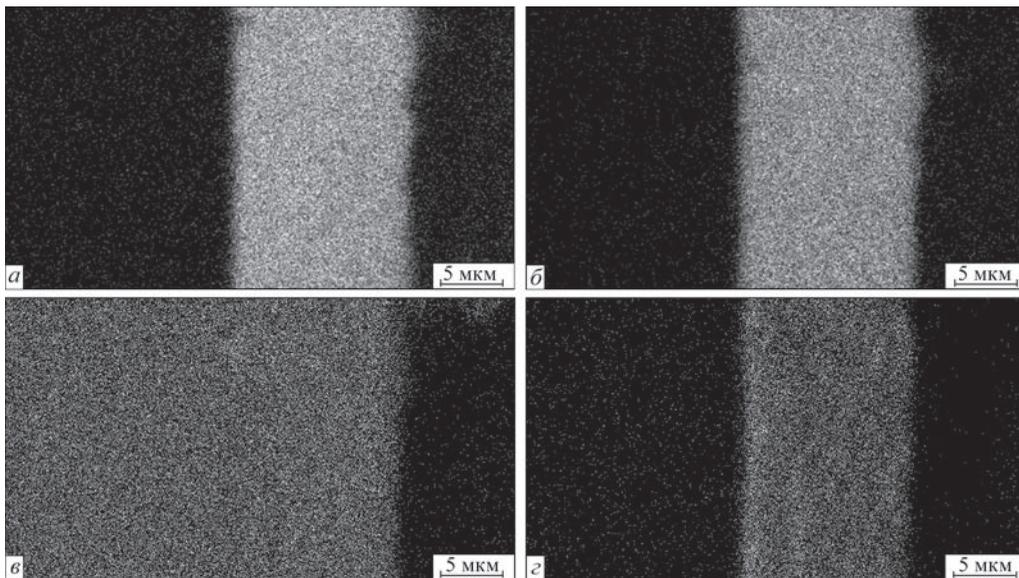


Рис. 5. Распределение компонентов покрытия СДП-6 по толщине конденсированного слоя: а — Ni; б — Co; в — Cr; з — Al

б, осуществляли на никелевые пластины-подложки, на которые подавался импульсный потенциал величиной 500, 700 или 2000 В. Продолжительность импульсов и скважность составляли 30...35 и 3 мкс соответственно. Структура поверхности и поперечного излома конденсата СДП-6 показаны на рис. 4. Толщина конденсатов составляла 60...80 мкм.

Распределение металлических элементов (Ni, Co, Cr, Al) по толщине конденсата (рис. 5) свидетельствует об однородности осажденных слоев по химическому составу. В случае хрома следует учитывать тот факт, что в качестве подложки использовалась сталь марки 12Х17, также содержащая хром.

На основе проведенных технологических испытаний подготовлен, подан и получен патент Украины на вакуумно-дуговой планарный испаритель применительно к описываемой установке [2].

Конденсация плазменных потоков при вакуумно-дуговом испарении планарных катодов из сплава СДП-6 осуществлялась также на лопатку из жаропрочного никелевого сплава ЖС6, на которую подавался импульсный потенциал величиной 500 В. Продолжительность импульсов и скважность составляли 30...35 мкс и 3 соответственно. Внешний вид изделия с нанесенным покрытием на перо лопатки показан на рис. 6.

Представленные конструктивные и экспериментальные данные показывают, что предлагаемая вакуумно-дуговая установка для нанесения функциональных покрытий на детали ответственного назначения позволяет получать однородные по структуре и химическому составу покрытия, а также повысить производительность по сравне-



Рис. 6. Внешний вид лопатки из сплава ЖС6 с вакуумно-дуговым покрытием СДП-6, нанесенным на перо данной детали

нию с существующими промышленными вакуумно-дуговыми установками.

Список литературы

1. Саблев Л.П., Долотов Ю.И., Ступак Р.И., Осипов В.А. (1976) Электродуговой испаритель металлов с магнитным удержанием катодного пятна. *Приборы и техника экспериментов*, **4**, 247–249.
2. Демчишин А.В., Міченко В.А., Костриця В.В. (2009) *Вакуумний електродуговий випарник*. Україна, Пат. 86841.

References

1. Sablev, L.P., Dolotov, Yu.I., Stupak, R.I., Osipov, V.A. (1976) Electric arc evaporator of metals with magnetic confinement of cathode spot. *Pribory i Tekhnika Eksperimentrov*, **4**, 247–249 [in Russian].
2. Demchyshyn, A.V., Michenko, V.A., Kostrytsya, V.V. (2009) *Vacuum electric arc evaporator*. Ukraine, Pat. 86841 [in Ukrainian].

ВАКУУМНО-ДУГОВА УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

А.В. Демчишин¹, А.А. Демчишин², В.А. Міченко¹

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: ademch@ipms.kiev.ua

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Приведено модифіковану вакуумно-дугову установку промислового типу загальною потужністю 120 кВт для нанесення функціональних покриттів на деталі відповідального призначення. Особливістю установки є використання більш простих у виготовленні вісьми планарних катодів замість одного трубчастого, що забезпечує більш тривалий ресурс роботи установки без заміни випаровуваних елементів, зниження рівня порогового струму дугового розряду, більш високий коефіцієнт використання матеріалу катодів, а також отримання в одному технологічному процесі двошарових покриттів з різним вмістом легуючих елементів (наприклад, Al в титановому сплаві) у кожному шарі шляхом послідовного використання чотирьох катодів з одним хімічним складом, а потім наступних чотирьох катодів з другим хімічним складом. Пропонується установка передбачає також використання імпульсно-модульованого джерела живлення підкладкотримача, що дозволяє одержувати високоякісні шари металевих і неметалевих покриттів на поверхні робочих виробів. Опрацьована технологія катодно-дугового випаровування з використанням планарних катодів з технічно чистого титану та нікелевих сплавів СДП-2 і СДП-6 на модифікованій вакуумно-дуговій установці Булат-3Т. Приведено структуру поверхні і поперечного злому конденсату СДП-6 товщиною 60...80 мкм та розподіл металевих елементів по товщині конденсату, яке свідчить про хімічну однорідність осажденного шару. Як приклад показано лопатку із жароміцного нікелевого сплаву ЖС6 з нанесеним таким чином функціональним покриттям із сплава СДП-6. Бібліогр. 2, рис. 6.

Ключові слова: вакуумно-дугова установка; планарний катод; імпульсне джерело живлення; підкладкотримач; структура поверхні; конденсат; розподіл елементів; покриття

VACUUM-ARC INSTALLATION FOR DEPOSITION OF FUNCTIONAL COATINGS

A.V. Demchishin¹, A.A. Demchishin², V.A. Michenko¹

¹Frantsevich Institute for Problems of Material Science of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanovskogo Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: ademch@ipms.kiev.ua

²NTUU «Igor Sikorskii KPI». 37 Pobedi Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine

The 120 kW modified vacuum-arc installation of industrial type for deposition of functional coatings on critical parts is presented. A feature of the plant consists in the use of more simple in fabrication 8 planar-type cathodes instead of the single tubular cathode. This provides a longer working life of the installation without replacement of evaporated elements, a decrease of the threshold current level of the arc discharge, a higher coefficient of the cathode material utilization and also deposition in one technological process of two-layered coatings with different content of alloying elements (for example, Al in titanium alloy) in each layer by means of successive application of 4 cathodes of one chemical composition and then next 4 cathodes of other chemical composition. A pulse-modulated power supply is also specified for substrates holder in this installation that allows producing the high-quality layers of metallic or non-metallic coatings on a surface of working parts. Optimization of the technology of cathode-arc evaporation with application of planar-type cathodes made of commercially pure titanium and SDP-2, SDP-6 nickel alloys was fulfilled in the modified vacuum-arc Bulat-3T installation. Surface structure and cross-section fracture of 60...80 μm SDP-6 condensate are presented in the paper. Distribution of metallic elements along the deposit thickness is also given and shows a chemical homogeneity of deposited layer. A blade made from ZhS6 high-temperature strengthened nickel alloy with SDP-6 alloy functional coating is also shown as an example. Ref. 2, Fig. 6.

Key words: vacuum-arc installation; planar-type cathode; pulsed power supply; substrate holder; surface structure of deposit; condensate; element distribution in deposit; coatings

Поступила в редакцію 11.06.2019



НОВАЯ КНИГА

Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0

В открытом доступе по ссылке

https://patonpublishinghouse.com/compilations/Krivtsun_Sbornik_2018_small.pdf