



УДК 621.793.18.06

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ ВАКУУМНО-ДУГОВАЯ УСТАНОВКА «БУЛАТ-3Т»

**А. В. Демчишин, В. А. Миченко,  
Г. А. Автономов, О. А. Токарев**

Представлены данные относительно выполненных изменений в конструкции вакуумно-дуговых испарителей металлов, электрической схеме привода вращения подложек, откачном оборудовании установки и улучшении защиты фланцев, смотровых систем от тепловых нагрузок с целью обеспечения осаждения функциональных покрытий на длинномерные изделия и формирования многослойных конденсатов с микро- и наноструктурой общей толщиной до 100 мкм и больше.

Data are presented as regards to changes made in the design of vacuum-arc evaporators of metals, electrical diagram of drive of substrates rotation, pumping equipment of the installation and improvement of protection of flanges, viewing window systems from heat loads to provide the deposition of functional coatings on long products and formation of multi-layer condensates with a micro- and nanostructure of total thickness of up to 100  $\mu\text{m}$  and higher.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга; торцевой цилиндрический катод; планарный катод; привод вращения подложек; реле времени; многослойное покрытие

Появление источников низкотемпературной плазмы на основе катодной формы вакуумной дуги, развивающейся в парах материала эродировующего электрода, открыло большие возможности для формирования функциональных покрытий с разными свойствами на поверхности подложек. Такая ситуация предопределила разработку оборудования с использованием дугового разряда в вакууме для нанесения ионно-плазменных покрытий на детали ответственного назначения. Анализ серийного вакуумно-дугового оборудования для осаждения покрытий, изготавливаемого ведущими фирмами в области вакуумного машиностроения, показал, что наиболее распространенным типом катодно-дугового источника являются испарители с цилиндрическими катодами, где дуговой разряд осуществляется на торцевой поверхности отрицательного электрода. Испарители такого типа используют в серийных установках «Булат» (Украина), ННВ-6.6, «Пуск», ИЭТ (Россия), ВУ-1БС, ВУ-2МБС (Белоруссия), MR-333, MR-383 (США), ВАИ-1200 (Лихтенштейн). В данных испарителях внешняя электромагнитная система удерживает катодные пятна на торцевой повер-

хности катода и вращает их с высокой скоростью по круговым орбитам на указанной поверхности. Такие источники генерируют неоднородный, ограниченный определенными размерами, плазменный поток, что сужает возможности их практического применения. В этом случае максимальная скорость осаждения пароплазменного потока зафиксирована вблизи оси катода в пределах небольших телесных углов.

Однако для современного машиностроения зачастую требуется обработка длинномерных и крупногабаритных изделий, для чего необходимо получение равномерного в продольном сечении плазменного потока, что не всегда возможно посредством увеличения количества отдельных точечных источников катодно-дуговой плазмы. В связи с этим одной из актуальных проблем является создание и использование планарных электродуговых испарителей.

Кроме того, целесообразнее изготавливать катоды в виде пластин, вырезаемых из листового проката, а не сплошных цилиндров, особенно при использовании катодов больших размеров. Для этого вместо точечных электродуговых испарителей разработаны, изготовлены и установлены в установке «Булат-3Т» источники металлической плазмы планарного типа с магнитным удержанием катодных пятен на рабочей поверхности катода, испытания которых



показали, что катодные пятна перемещаются по эллиптической траектории вдоль продольной оси катода. Повышение тока дугового разряда способствует увеличению катодных пятен и скорости их перемещения на рабочей поверхности катода и, в результате, возрастанию скорости эрозии катодного материала.

На рис. 1 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].

Установка «Булат-3Т» состоит из вакуумной камеры, привода вращения стола с подложкодержателями, пульта управления, блоков электропитания (выпрямителей тока) и откачного оборудования [2]. Вакуумная камера имеет форму горизонтального цилиндра с двумя загрузочно-разгрузочными торцевыми отверстиями, герметично закрываемыми круглыми крышками с фланцами, на которых установлены катодные узлы для испарения электропроводных материалов, смотровые системы и окна для дистанционного контроля температуры подложек с помощью пирометра. В нижней части камеры находится узел вращения стола, ось которого через вакуумный ввод соединена с электрическим приводом, обеспечивающим скорость вращения 8 об/мин. Указанный стол изолирован от корпуса камеры.

Для получения необходимого вакуума в рабочей камере использовали комбинированную откачную систему, в которой для начальной откачки воздуха из камеры задействован форвакуумный механический насос 2НВП-5Д с масляным уплотнением и высоковакуумный паромасляный насос АВП-250-630. Для повышения скорости откачки воздуха из камеры на начальной стадии с целью значительного сокращения длительности процесса и уменьшения граничного остаточного давления к откачному посту добавлен двухроторный насос ДРН-50 с прифланцованным электродвигателем. Использование дополнительного насоса ДРН-50 значительно повышает коэффициент сжатия и снижает до минимума эффект уменьшения граничного давления механического насоса с масляным уплотнением даже в случае ухудшения качества масла.

Электрическая система включает источники питания дуговых испарителей и источники высокого и опорного напряжения, подаваемого на подложки. Для получения многослойных конденсатов с микро- и нанокристаллической структурой использовали режим непрерывного испарения выбранных металлов из двух катодов в совокупности с переменным

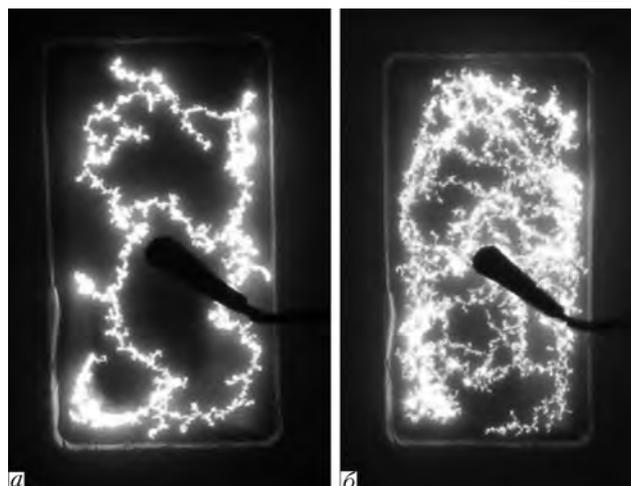


Рис. 1. Катодные пятна на поверхности титанового планарного катода при  $I_d$ , А: а – 100; б – 140

циклическим вращением подложек. Осаждение плазменных потоков на подложки с контролируемой длительностью их нахождения напротив испаряемых катодов, обеспечивали путем добавления к электрической схеме привода вращения реле времени, что позволило получать многослойные конденсаты с толщиной субслоев в пределах 10...1000 нм и общей толщиной до  $1 \cdot 10^5$  нм.

На рис. 2 приведена типичная структура многослойного TiN/ZrN покрытия с толщиной субслоев 100 нм и общей толщиной  $15 \cdot 10^3$  нм, полученного с помощью указанной техники. Формирование конденсатов нитридов титана и циркония осуществляли в азотной газовой среде в диапазоне давлений

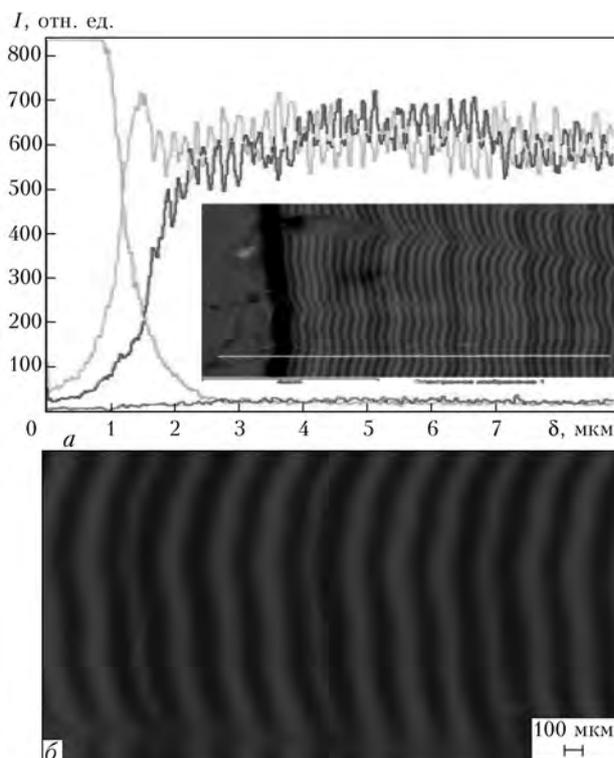


Рис. 2. Распределение элементов покрытия по толщине многослойного конденсата TiN/ZrN (а) и его структура в поперечном сечении (б); I – интенсивность

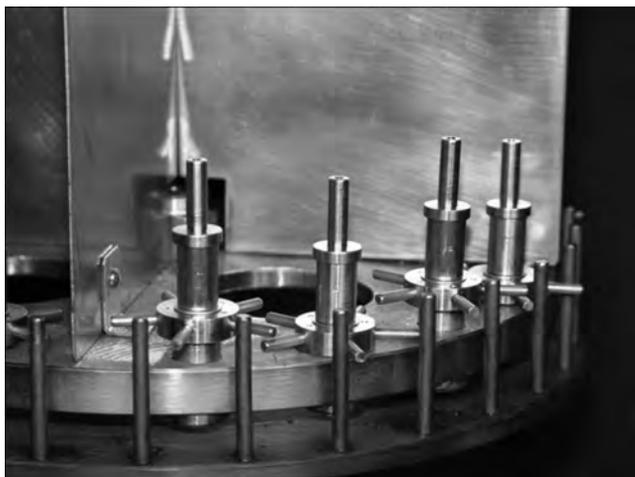


Рис. 3. Четвертая часть стола с подложкодержателями планетарного типа

$(4...6)10^{-1}$  Па. Ток разряда составлял 110 А, а отрицательный потенциал смещения на подложке достигал  $-150$  В. Расстояние между подложками и катодами равнялось 125 мм. Подложками служили твердосплавные пластинки из ВК6 и Т5К10. Установка коромысла в виде горизонтального молибденового стержня на валу механизма вращения позволила легко регулировать расстояние между подложками и рабочей поверхностью катодов.

Кроме того, разработан, изготовлен и установлен стол с подложкодержателями планетарного типа, с помощью которого можно осаждать одно- и многослойные покрытия на детали фасонного типа.

На рис. 3 показана четвертая часть держателей осесимметричных подложек, вращающихся вокруг своей оси и одновременно со столом, крутящимся вместе с вертикальными экранами. Это дает возможность проводить многократное последовательное осаждение разных покрытий на детали цилиндрического типа.

Для равномерного нагрева маломерных и тонкостенных изделий, установленных на подложкодержателях, до и в процессе нанесения на них покрытий изготовлен ленточный танталовый электрический нагреватель, крепящийся к верхнему фланцу рабочей камеры установки с помощью водоохлаждаемых медных электрических вводов.

Для дополнительного влияния на адгезию, структуру и другие свойства осаждаемых покрытий предусмотрено использование высоковольтного импульсного генератора, обеспечивающего подачу на подложки в ходе нанесения покрытий отрицательных импульсов напряжения с амплитудой до 5 кВ, длительностью импульсов 15, 35, 55 мкс и паузами между импульсами соответственно 30, 70, 110 мкс.

В связи с необходимостью осаждения функциональных покрытий толщиной до  $1 \cdot 10^5$  нм и больше, для чего требуется длительная работа установки в

условиях функционирования катодно-дуговых испарителей при максимальных режимах, значительно увеличивается тепловая нагрузка на внутрикамерные узлы и устройства. Вакуумная камера серийной установки охлаждается проточной водой в процессе нанесения покрытий, в отличие от фланцев и смотровых отверстий камеры, что вызывает перегрев последних. В связи с этим внутри камеры установили металлические экраны напротив проблемных мест. Кроме того, реконструирован нижний механизм вращения с вакуумным вводом с целью обеспечения охлаждения его вала проточной водой. Дозированный напуск и поддержка заданного расхода аргона и азота осуществляется газовой системой с использованием натекателя игольчатого типа при помощи блока управления натекателя.

Указанные усовершенствования в совокупности позволили существенно расширить технологические возможности установки и осаждать функциональные покрытия с контролируемой структурой на подложки широкого профиля.

### Выводы

1. Разработанные электродуговые испарители планетарного типа, изготовленные из титана и предназначенные для осаждения равномерных по толщине покрытий на длинномерные подложки, прошли успешные испытания в рабочей камере установки «Булат-3Т».
2. Использование реле времени в электрической схеме привода вращения подложек дало возможность получать многослойные покрытия с микро- и нанокристаллической структурой.
3. Использование поворотного стола планетарного типа с подложкодержателями позволило осаждать многослойные покрытия на фасонные изделия.
4. Наличие электрического нагревателя ленточного типа дало возможность осуществлять радиационный однородный нагрев разнотолщинных изделий.
5. Полученные результаты будут использованы для разработки новой промышленной вакуумно-дуговой установки для осаждения функциональных покрытий на длинномерные детали ответственного назначения.

1. *Электродуговой* испаритель металлов с магнитным удержанием катодного пятна / Л. П. Саблев, Ю. И. Долотов, Р. И. Ступак, В. А. Осипов // Приборы и техника экспериментов. — 1976. — № 4. — С. 247–249.
2. *Структура* и свойства покрытий из Ti, Ti36Al, Ti/Al, полученных способом вакуумно-дугового испарения / А. В. Демчишин, В. С. Голтвяница, С. К. Голтвяница и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 42–47.

Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича,  
НАН Украины, Киев  
Поступила 03.02.2009