

УДК 621.793.14

## **СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ТЕРМИЧЕСКИМ ИСПАРЕНИЕМ ДЛЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ И УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Ярмонов А.Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, yarmonov@pm.pstu.ac.ru*

---

**В работе представлены результаты конструирования и последующей модернизации опытной установки для нанесения покрытий термическим испарением в вакууме, используемой как в научно-исследовательской, так и в образовательной деятельности. Установка спроектирована и собрана для проведения научных исследований в области нанесения вакуумных покрытий, а также используется в качестве лабораторного и исследовательского оборудования в учебном процессе. Модернизация отдельных узлов установки в процессе исследований и эксплуатации позволила решить конкретные технические задачи по нанесению термовакuumных покрытий. Отработана технология нанесения и получены токопроводящие медные покрытия на электродах из стали 30ХГСА и латуни ЛС-59, повышающие эксплуатационные характеристики электрод-инструмента при электроэрозионной обработке стали 65Г на стандартных прецизионных и чистовых режимах прошивки.**

---

Ключевые слова: установка, термическое испарение в вакууме, узел испарения, напыление, токопроводящие покрытия.

## **CREATION AND MODERNIZATION OF COATING LINES BY THERMAL EVAPORATION FOR SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATIONAL ACTIVITIES**

**Yarmonov A.N.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, yarmonov@pm.pstu.ac.ru*

---

**The results of the construction and subsequent modernization of a pilot plant for coating by thermal evaporation in a vacuum, as used in research and in educational activities. The plant is designed and assembled to conduct research in the field of application of vacuum coating, and is also used as a laboratory and research facilities in the educational process. Modernization of individual plant components in the research and exploitation possible to solve specific technical challenges for applying thermal vacuum coatings. The technology application and obtained conductive copper coating on the electrodes of steel and brass 30KhGSA PM-59, increasing the performance of the tool-electrode spark when handling steel 65G on standard precision finishing and flashing mode.**

---

Keywords: plant, thermal evaporation in a vacuum, evaporation unit, coating, conductive coating.

Установка термовакuumного нанесения покрытий на материалы методом термического испарения-конденсации [1,2,5] (рис.1 а,б) создана в рамках формирования лаборатории вакуумной техники и вакуумных покрытий на кафедре МТ и КМ ПНИПУ на базе высоковакуумной камеры из нержавеющей стали 12Х18Н10 с возможностью установки различных узлов и подключения откачных систем (устройств) через вакуумно уплотняемые фланцевые соединения типа CF (Conflat) и ISO-F (или ISO LFB).

### **Материалы и методы исследования**

Система вакуумной откачки камеры (1) первоначально собрана по схеме двухступенчатой откачки насосами НБР-5Д (2) (пластинчато-роторный форвакуумный со

скоростью откачки 5 л/с) и Н-100 (3) (высоковакуумный диффузионный со скоростью откачки 350 л/с), позволившими в системе с большим количеством вакуумных уплотнений и вводов получить остаточное давление в камере в зависимости от температуры проводимого процесса от 4 до  $8 \cdot 10^{-3}$  Па. Дальнейшее развитие системы вакуумной откачки проведено путем установки в качестве основной системы откачки паромасляного диффузионного насоса Н-160 (4) (с удвоенной в сравнении с Н-100 скоростью откачки 700 л/с) и форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ (5) с сохранением ранее существующей линии и, т.о., с общим понижением давления в камере и появлением возможности трехуровневого регулирования скорости откачки (350, 700 и 1050 л/с). Решение проблемы миграции паров рабочих жидкостей диффузионных насосов в вакуумную камеру, оказывающих негативное влияние на качество и адгезионные характеристики наносимого покрытия, проведено путем установки оптически непрозрачных водоохлаждаемых проточных вакуумных ловушек жалюзийного (6) и шевронно-кольцевого типа (7), снижающих обратный поток паров в  $10^2$ - $10^4$  раз, в магистрали высоковакуумной откачки на входных фланцах вакуумной камеры [6]. Коммутация вакуумных магистралей  $\frac{3}{4}$ " выполнена вакуумными вентилями  $D_v$  25, высоковакуумные насосы отсекаются от камеры вакуумными затворами ЗВЭ-100 (8) и К-100 (9), обеспечивая возможность напуска воздуха в камеру, демонтажа и установки узла испарения без прекращения работы высоковакуумных насосов. Предварительная откачка камеры после напуска воздуха перед подключением высоковакуумной системы осуществляется через смонтированную дополнительную магистраль форвакуумной откачки.

Контроль величины давления в вакуумной камере в процессе предварительной откачки контролируется деформационным вакуумметром ВОШ1-100 (10), а во время высоковакуумной откачки и процесса нанесения покрытия осуществлялся датчиками ПМТ-2 (термопарный) и ПМИ-2 (11) (ионизационный) и вакуумметром ионизационно-термопарным ВИТ-2 (12) (рис.1 б).

Съемный узел термического испарения [4] (рис. 2 а,б), помимо основной функции испарения наносимого материала и подогрева обрабатываемой детали (подложки) до технологически рекомендованных температур [5], спроектирован с учетом установки дополнительных устройств (термопар для замера температуры нагревателя подложки, испарителя и заготовки; несущих конструкций для монтажа испарителя, нагревателя, заготовки (подложки) и теплоотражающих экранов, устройств вращения заготовки). Фланцевое крепление узла испарения позволяет произвольно ориентировать его в пространстве, вращая вокруг оси симметрии с шагом  $30^{\circ}$ , позволяя варьировать положение испарителя и заготовки относительно других устанавливаемых в камере устройств. Конструкция применяемых испарителей и нагревателя подложки позволяет наносить

покрытия на плоские подложки размерами до 30x30 мм и объемные заготовки в виде тел вращения с максимальным диаметром до 10 мм и длиной до 70 мм.

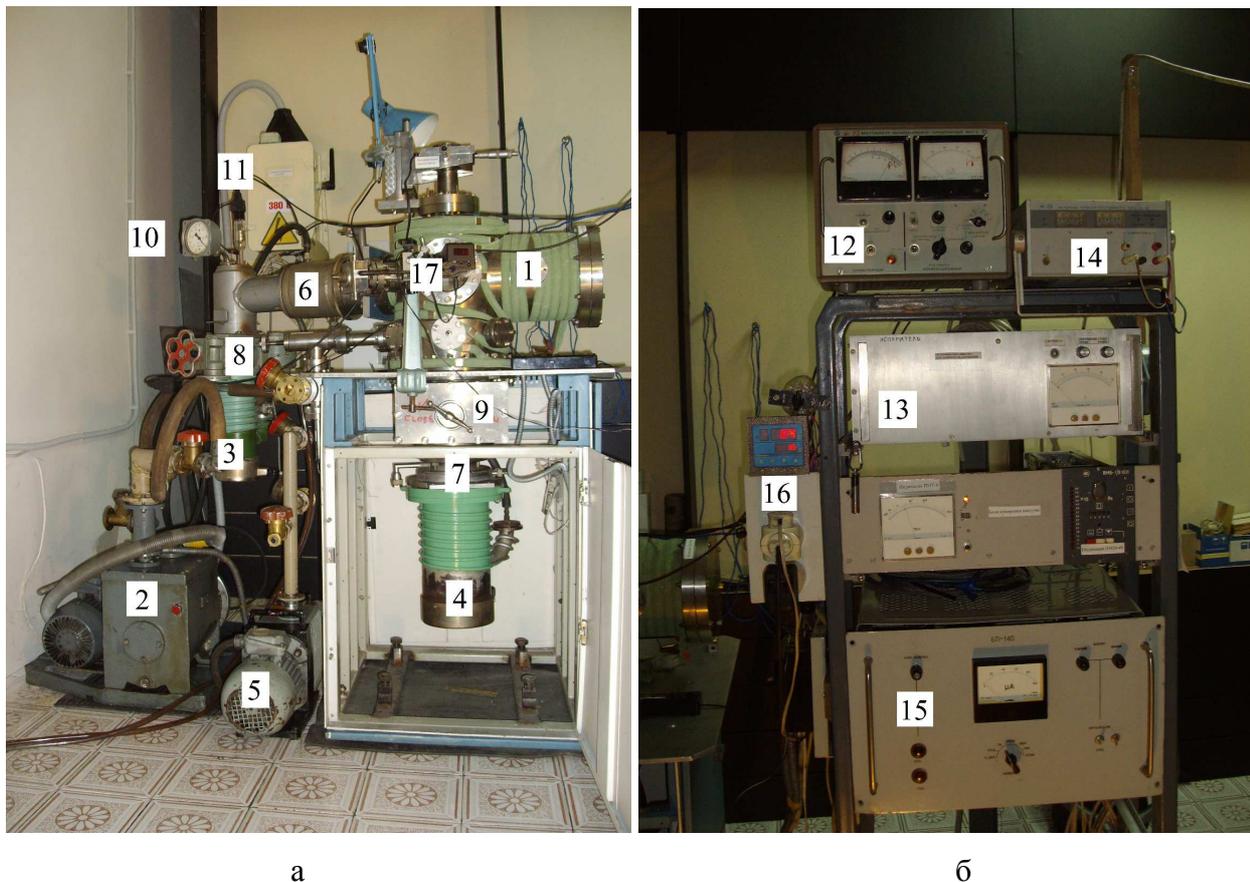


Рис.1 а - вакуумная камера установки УНПТ "Чайка" с системами высоковакуумной откачки на базе диффузионных насосов Н-160 и Н-100; б - стойка управления системой высоковакуумной откачки и узлом испарителя установки

Дальнейшая модернизация существующего узла испарения связана с установкой в узел испарения волнового вакуумного ввода вращения типа ВВВ-063-1-2 для сообщения вращательного движения заготовки в процессе нагрева (для равномерности нагрева) и нанесения покрытия (для исключения неравномерности толщины при нанесении покрытия на объемные заготовки). Ввод вращения позволяет проводить позиционирование по углу вращения с точностью до 5'.

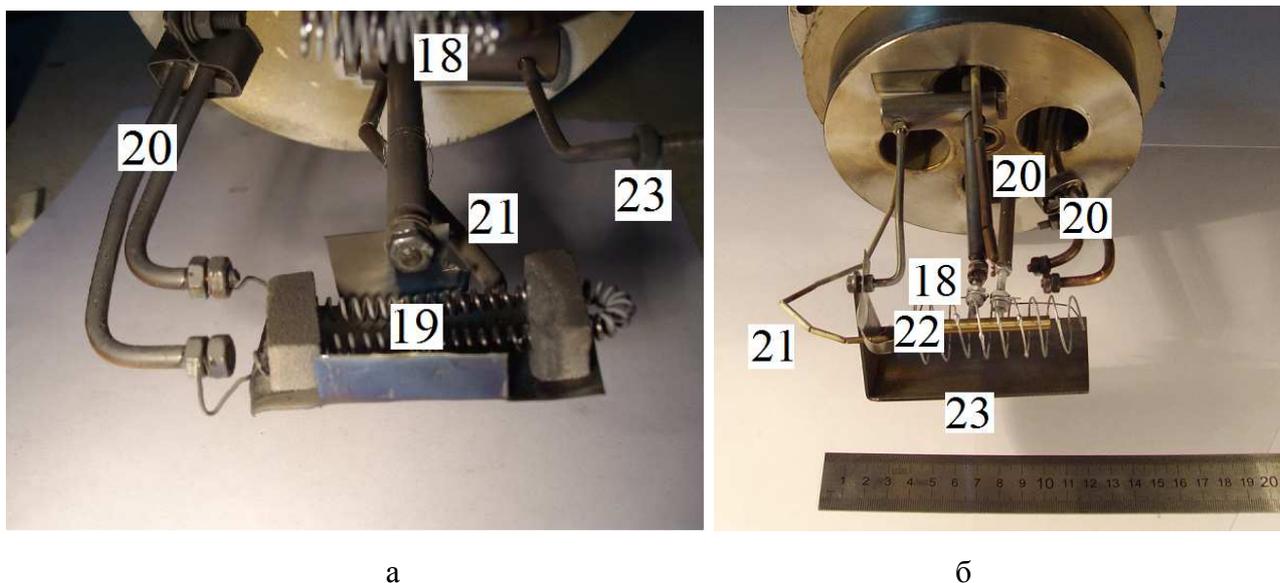


Рис. 2 Различные варианты конструкции испарительного узла установки: а - схема для напыления плоских подложек, б - для напыления на цилиндрические детали: 18 - испарители из молибдена (диаметры витков 8 и 25 мм), 19 - нихромовый нагреватель подложки со снятым столиком, 20 - самонесущие токоподводы нагревателя, 21 - термопары для замера текущей температуры заготовки, 22 - цилиндрическая латунная заготовка, 23 - держатель экрана (экран снят)

Электропитание самонесущих испарителей из молибденовой проволоки толщиной 1 мм (18) и блока нагрева подложки из сплава NiCr, (19) смонтированных на несущих токоподводах (20) (рис. 2 а,б), а также снятие сигнала термопар (21) при измерении температуры нагревателя и заготовки (22) первоначально выполнено через низковольтные вакуумные вводы от регулируемых источников питания постоянного (рис.1 б) тока (БЛ БНН-152 (13) (напряжение 6В, пределы регулирования тока 0-50А плавно), Б5-50 (14) (пределы регулирования 0-300 В, 0-0,3А ступенчато). Использование молибденовых испарителей позволяет проводить нагрев испаряемого материала до температур порядка 1600<sup>0</sup>С без потери несущей способности испарителя. Блок подогрева подложки позволяет прогревать плоские подложки и детали небольшой массы в диапазоне 200-700<sup>0</sup>С.

### Результаты и обсуждение

Схема испарительного узла, представленная на рис. 2 а, удовлетворительно работала в условиях нанесения покрытий на плоскую поверхность, но не позволяла получить равномерное покрытие на трехмерной заготовке (в частности на цилиндре). Отсутствие на тот момент в действующей установке механизма вращения заготовки не позволяло провести равномерный прогрев объемной заготовки и нанесение покрытия имеющимися нагревателем

и испарителем. Таким образом, задача нанесения покрытия на трехмерную симметричную деталь (цилиндр) потребовала иного конструктивного решения, в качестве которого был выбран вариант самонесущего коаксиального нагревателя (рис. 2 б), совмещающего в себе обе функции – испарителя и нагревателя подложки.

Заготовка для нанесения покрытия помещалась внутри испарителя по оси его симметрии. Данное конструктивное решение значительно сложнее первоначального (рис. 2 а), с независимой регулировкой напряжения питания испарителя и нагревателя заготовки, т.к. температуры испарения и подогрева иногда значительно различаются (например, для медного покрытия – 1100 и 400<sup>0</sup>С соответственно). Кроме того, в зависимости от массы заготовки (подложки), мощность, подводимая к нагревателю для получения рекомендуемой температуры поверхности заготовки, может быть различной. Так как в случае с коаксиальным нагревателем-испарителем возможна регулировка мощности только по испарителю, в случае достаточно массивных деталей может быть существенный недогрев поверхности заготовки. Еще одной трудностью при решении задачи с применением коаксиального нагревателя малого диаметра (12 мм) явилось недостаточное расстояние между заготовкой и испарителем, ограниченное количество витков испарителя и трудность равномерного распределения испаряемого материала по поверхности самого испарителя, что на первичных опытных режимах приводило к заметной неравномерности по толщине («полосчатости») полученного покрытия на заготовке.

Разрешение возникающих в процессе разработки проблем, о которых сказано выше, привело к следующим инженерным решениям:

- равномерность нанесения материала на заготовку повышена за счет увеличения диаметра и количества (плотности навивки на единицу длины) витков испарителя, в этом случае, при увеличении расстояния между испарителем и заготовкой, покрытие наносится более равномерно;

- проблема недогрева заготовки при достижении испарителем необходимой температуры может быть решена двумя способами: либо увеличением мощности испарителя с учетом потерь на прогрев заготовки (22), либо установкой на держателе (23) (рис. 2 а,б) кольцевого цилиндрического экрана коаксиально испарителю. Был выбран второй способ. Таким образом, тепловая энергия испарителя, рассеиваемая во всех направлениях, отражается в сторону заготовки, прогревая ее до необходимой температуры. Параметры режима в обоих случаях определяются опытным путем. Варьируя длину испарителя, количество и диаметр витков можно в широких пределах регулировать мощность и температуру испарителя;

- проблема равномерного распределения испаряемого материала по поверхности испарителя решена путем навивки испаряемого материала в виде тонкой проволоки (0,1 мм, медь) или фольги (0,005 мм, алюминий) на витки испарителя с определенным шагом с последующим расплавлением материала;

Определенные опытным путем режимы нанесения позволили получить качественные покрытия из алюминия и меди толщиной  $\delta = 5$  мкм на цилиндрических заготовках электродов для электроэрозионной обработки диаметром 6 мм и длиной 60 мм из стали 30ХГСА и латуни ЛС-59 [7].

Конструкция используемой вакуумной камеры предусматривает возможность монтажа высоковольтных вакуумных вводов с проходными изоляторами до 35 кВ, что, при наличии высоковольтного источника питания БН-140 (15) (до 7 кВ) (рис. 1 б) дает возможность впоследствии реализовать на установке систему для получения и исследования процессов в тлеющем разряде. Выполнение из немагнитного материала корпуса камеры и наличие достаточного количества незадействованных присоединительных фланцев позволяет в будущем производить дальнейшую модернизацию (универсализацию) установки путем установки различных узлов (в т.ч. узла магнетронного распыления) и устройств (узла вращения, масок, натекаателей реакционных газов и т.п.).

Наблюдение за монтажом узла испарения и процессами обезгаживания и испарения, а также замер температуры инфракрасным термометром осуществляется через смонтированное оппозитно фланцу узла испарения смотровое окно диаметром 100 мм, оснащенное для наблюдения высокотемпературных процессов съемным светофильтром.

Контроль температуры испарителя и заготовки в процессе обезгаживания, испарения и охлаждения осуществляется измерительным комплексом в составе 2х термопар ХА(К) и измерительного блока «Термодат 12К3» (16) (рис.1 б) с пределами измерений 20-1200<sup>0</sup>С (заготовка, нагреватель подложки, контактный метод) и инфракрасного термометра «Термикс-1500» (17) с пределами измерений 0-1500<sup>0</sup>С (испаритель, заготовка, бесконтактный метод) (рис.1 а).

Для удобства эксплуатации и управления режимами источники питания, блок измерения вакуума ВИТ-2, индикатор температуры «Термодат 12К3», пульт управления вакуумной откачкой, приборы индикации тока и напряжения в цепи нагревателя и коммутирующие устройства собраны в единую стойку управления установкой (рис.1 б).

На установке проводятся исследования по тематике повышения износостойкости и эксплуатационных характеристик электрод-инструмента (ЭИ) из различных материалов (сталь 30 ХГСА, латунь ЛС-59, алюминий, вольфрам) для электроэрозионной обработки (ЭЭО). Разработана технология нанесения покрытий из меди и алюминия на цилиндрические

электроды. Полученные на установке электропроводные покрытия толщиной 5 мкм на стальных и латунных ЭИ позволили повысить износостойкость инструмента в среднем на 30 и 15% соответственно на стандартных прецизионных и чистовых режимах прошивки стали 65Г методом ЭЭО.

Кроме проведения исследований установка используется в учебном процессе для проведения лабораторных работ и практических занятий по курсам «Основы вакуумной техники, технологии» (измерение вакуума, устройство и работа вакуумных насосов) и «Физико-химические основы тонких пленок и гетероструктур» (процессы испарения и конденсации в вакууме, рост эпитаксиальных пленок на кремниевых подложках). С использованием материалов исследований, проведенных на установке, успешно защищены 1 магистерская и 3 бакалаврских [7] выпускных квалификационных работы (ВКР), в настоящее время выполняются исследования в рамках выполнения диссертационной работы на соискание ученой степени к.т.н. [3] и 3 магистерских ВКР.

### **Заключение**

Предложенная установка позволяет осуществить получение высокого вакуума и проведение режимов термического испарения различных материалов и осаждения покрытий при различных технологических параметрах в вакууме. Показана возможность гибкого использования установки, как в научно-исследовательской, так и в образовательной деятельности, удовлетворяющая требуемым критериям качества проведения исследований и учебных занятий. Показана возможность дальнейшего развития и модернизации установки с точки зрения проводимых на ней технологических процессов напыления в вакууме.

### **Список литературы**

1. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.: ил.
2. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): Учеб. Пособие для студентов вузов/ Г.В. Бобров, А.А. Ильин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 624с.: ил.
3. Оглезнев Н.Д., Ярмонов А.Н. Исследование влияния электропроводящего покрытия на износостойкость электродов-инструментов при электроэрозионной прошивке. Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сб. науч. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Юго-Зап. гос. ун-та, г. Курск 4-5 июня 2014 г.: в 3-х т., Т. 2., Юго-Зап. гос. ун-т.-Курск 2014. 310 с. с.300-304.

4. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. Л., "Машиностроение" (Ленингр. отд-ние), 1975. – 336 с.: ил.
5. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме/А.И. Кострицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 176 с.: ил.
6. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ.-М.: Мир, 1988. – 366с., ил.
7. Ярмонов А.Н., Ларионов Д.Д. Разработка технологии нанесения электропроводных покрытий на цилиндрические электроды для электроэрозионной обработки и модернизация конструкции узла термического испарения установки «Чайка». Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сб. науч. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Юго-Зап. гос. ун-та, г.Курск 4-5 июня 2014 г.: в 3-х т., Т. 2., Юго-Зап. гос. ун-т.-Курск 2014. 310 с. с. 305-309

**Рецензенты:**

Порозова С.Е., д.т.н., профессор кафедры МТ и КМ ПНИПУ, г. Пермь;

Оглезнева С.А., д.т.н., профессор кафедры МТ и КМ ПНИПУ, г. Пермь