

УДК 621.785

**В.В.Одинокоев, В.М.Долгополов, Г.Я.Павлов, В.П.Ращинский,
А.Н.Шпаков, А.Н.Шубников**

*ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»,
Москва, Зеленоград, Россия (E-mail: info@niitm.ru)*

Вакуумно-плазменное и физико-термическое оборудование для инновационных технологий

В НИИТМ разработан комплекс экспериментального и опытно-промышленного вакуумно-плазменного и физико-термического оборудования. Оно предназначено для обеспечения учебных процессов; проведения научных исследований; отработки технологических процессов; мелкосерийного и экспериментального производства. Новые разработки НИИТМ — это автоматизированные технологические установки с высокой степенью унификации. Они позволяют реализовать целый ряд технологических процессов нанесения тонких пленок и покрытий. Реакторы установок обеспечивают реализацию инновационных технологических процессов и выполнены на высоком техническом уровне с использованием ряда уникальных схмотехнических и конструктивных решений. Модульный принцип организации установок позволяет гибко удовлетворять индивидуальные потребности заказчика путем оснащения установок соответствующими функциональными блоками с конструктивными минимальными изменениями.

Ключевые слова: вакуумно-плазменное оборудование, физико-термическое оборудование, тонкие пленки, газофазное осаждение, плазмохимическое травление.

Введение

В настоящее время в условиях ограниченности материальных средств в промышленном комплексе особое значение приобретают технологии, увеличивающие долговечность (ресурс) деталей и узлов машин. Приоритетным направлением современной науки и техники является создание новых материалов на основе нанотехнологий и, в частности, получение покрытий с размером зерна, не превышающего 100 нм [1–4].

Вакуумно-плазменная и физико-термическая обработка поверхности является эффективным способом повышения работоспособности деталей механизмов и машин за счёт создания модифицированных поверхностных слоёв и нанесения покрытий [5–8].

Формирование в поверхностном слое деталей из конструкционных металлических материалов заданной структуры, позволяющей обеспечить необходимый уровень эксплуатационных свойств, достигается путём воздействия на поверхность высокоэнергетических потоков частиц газовой и металлической плазмы. Результатом такого воздействия являются либо структурные изменения в исходной поверхности детали, так называемый процесс модифицирования, либо формирование покрытия, структурное состояние которого зависит от многих факторов, в том числе от исходной структуры поверхностного слоя подложки детали.

Приоритетным направлением деятельности ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (НИИТМ) является создание экспериментального и опытно-промышленного вакуумно-плазменного и физико-термического оборудования для реализации инновационных технологических процессов в микро-, нано-, радиоэлектронике, микромеханике, для синтеза наноматериалов и в других отраслях.

В настоящей статье представлен материал по последним достижениям НИИТМ в решении упомянутых выше проблем.

Физические основы магнетронного нанесения покрытий

Принцип магнетронного распыления основан на образовании над поверхностью катода кольцеобразной плазмы в результате столкновения электронов с молекулами газа (чаще всего аргона). Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде плёнки на подложке, а также частично рассеиваются на молекулах остаточных газов или осаждаются на стенках рабочей вакуумной камеры.

При столкновении ионов с поверхностью мишени происходит передача момента импульса материалу. Падающий ион вызывает каскад столкновений в материале. После многократных столкновений импульс доходит до атома, расположенного на поверхности материала, и который отрывается от мишени и высаживается на поверхности подложки. Среднее число выбитых атомов на один падающий ион аргона называют эффективностью процесса и зависит она от угла падения, энергии и массы иона, массы испаряемого материала и энергии связи атома в материале.

Магнетронное распыление позволяет получать высокую плотность ионного тока и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 0,1 Па.

Для эффективной ионизации аргона распыляемый материал (мишень) размещают на магните. В результате эмиссионные электроны, вращающиеся вокруг магнитных силовых линий, локализуются в пространстве и многократно сталкиваются с атомами аргона, превращая их в ионы.

Процесс химического газофазного осаждения (CVD-процесс)

Процесс химического газофазного осаждения включает химическую реакцию в газовой фазе, происходящую над поверхностью твердой подложки, в результате которой происходит осаждение конечного продукта реакции на поверхность данной подложки. Все CVD-методы для создания алмазных пленок требуют способа активации углеродсодержащих молекул исходного продукта реакции. В число этих методов входят термический (например, с горячей проволокой) либо плазменный метод (плазма тлеющего разряда, высокочастотная плазма, СВЧ-плазма) или применение плазменного горения (оксиацетилен, либо плазменные горелки).

Поскольку каждый метод отличается в деталях, все они делятся по общим признакам. Например, рост алмазной пленки (а не осаждение других, не столь четко определенных, форм углерода) обычно требует, чтобы подложка поддерживалась при температуре в диапазоне 1000–1400 К и чтобы исходный газ был разбавлен при избытке водорода.

Методы осаждения алмазных покрытий путем сжигания углеводородов характеризуются высокими скоростями роста пленки (обычно 100–1000 мкм/ч), но пленка при этом зачастую растет только в очень малых локальных областях и при плохом контроле процесса осаждения, что приводит к получению низкокачественных алмазных пленок.

Напротив, осаждение алмазных пленок методами горячей проволоки или плазмохимическим газофазным осаждением имеет намного более медленные скорости роста (0,1–10 мкм/ч), но таким путем получают пленки высокого качества. Один из больших вопросов, стоящих перед исследователями в CVD-алмазной технологии, заключается в необходимости увеличения скоростей роста до экономически рентабельных значений (сотен микрон в час или даже единиц миллиметров в час) без ухудшения качества пленки. В этом направлении был достигнут некоторый прогресс путем применения реакторов с осаждением пленок в СВЧ-плазме, поскольку было обнаружено, что производительность процесса осаждения находится примерно в линейной зависимости от прикладываемой мощности СВЧ-генератора.

В настоящее время типичная номинальная мощность для СВЧ-плазменного реактора составляет около 5 кВт. Ожидается, что следующее поколение таких реакторов будет иметь номинальные мощности до 50–80 кВт. Это дает намного более реалистическую производительность осаждения алмазной пленки, но себестоимость процесса при этом, разумеется, возрастает.

Нанесение плёнок металлов методом термического испарения

Осаждение тонких пленок в вакууме включает три этапа: генерацию атомов или молекул, перенос их к подложке и рост пленки на поверхности подложки. Состав и структура пленки зависят от

исходных материалов, метода и режимов нанесения, обеспечивающих необходимый энергомассоперенос материала.

В соответствии с этим вакуумные установки для нанесения тонких пленок, несмотря на многообразие их назначения и конструктивного оформления, состоят из следующих основных элементов: источника генерации потока частиц осаждаемого материала; вакуумной системы, обеспечивающей требуемые условия для проведения технологического процесса; транспортно-позиционирующих устройств, обеспечивающих ввод подложек в зону нанесения пленок и ориентирование обрабатываемых поверхностей относительно потока частиц наносимого материала.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносит пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения и низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц.

Ионно-плазменные методы нанесения покрытий

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание привлекают вакуумные ионно-плазменные методы. Характерной их чертой является прямое преобразование электрической энергии в энергию технологического воздействия, основанное на структурно-фазовых превращениях в осаждаемом на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами. Кроме того, эти методы позволяют:

- обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке;
- обеспечивать равномерность покрытия по толщине на большой площади;
- варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла;
- получить высокую чистоту поверхности покрытия;
- соблюдать экологическую чистоту производственного цикла.

К основным методам ионно-плазменной обработки следует отнести:

- ионно-лучевые и вакуумно-дуговые методы осаждения покрытий;
- ионно-плазменные методы диффузионной обработки в тлеющем разряде;
- ионно-плазменные методы диффузионной обработки в несамостоятельном разряде.

Методы ионно-лучевой и вакуумно-дуговой обработки позволяют получать тонкие пленки (десятки мкм), строго контролируемые по составу, беспримесные, однородные по структуре с образованием диффузионного переходного слоя. Недостатками данных методов являются малая толщина пленок, наличие высокого вакуума (10^{-4} – 10^{-2} Па), сложность и высокая стоимость оборудования, низкая производительность, возможность обработки только локальных поверхностей. Установки работают в импульсном режиме с крутопадающей внешней характеристикой источника питания, что значительно повышает их стоимость и снижает надежность.

Ионно-плазменные методы обработки в тлеющем разряде в настоящее время широко распространены. Они позволяют получать высококачественные диффузионные слои на основе азота, углерода, кремния. Разрабатываются новые технологии, например титанирование и вольфраммирование поверхности изделий. Однако существенные недостатки сдерживают их широкое применение в промышленности и других областях. К данным недостаткам относятся: низкое давление в камере (10^{-1} Па), малая производительность, работа в периодическом режиме, невозможность обработки длинномерных изделий (например, труб), значительный расход электроэнергии, высокие стоимость установок и себестоимость продукции.

Установки серии МВУ ТМ

Вид установок этой серии показан на рисунке 1.

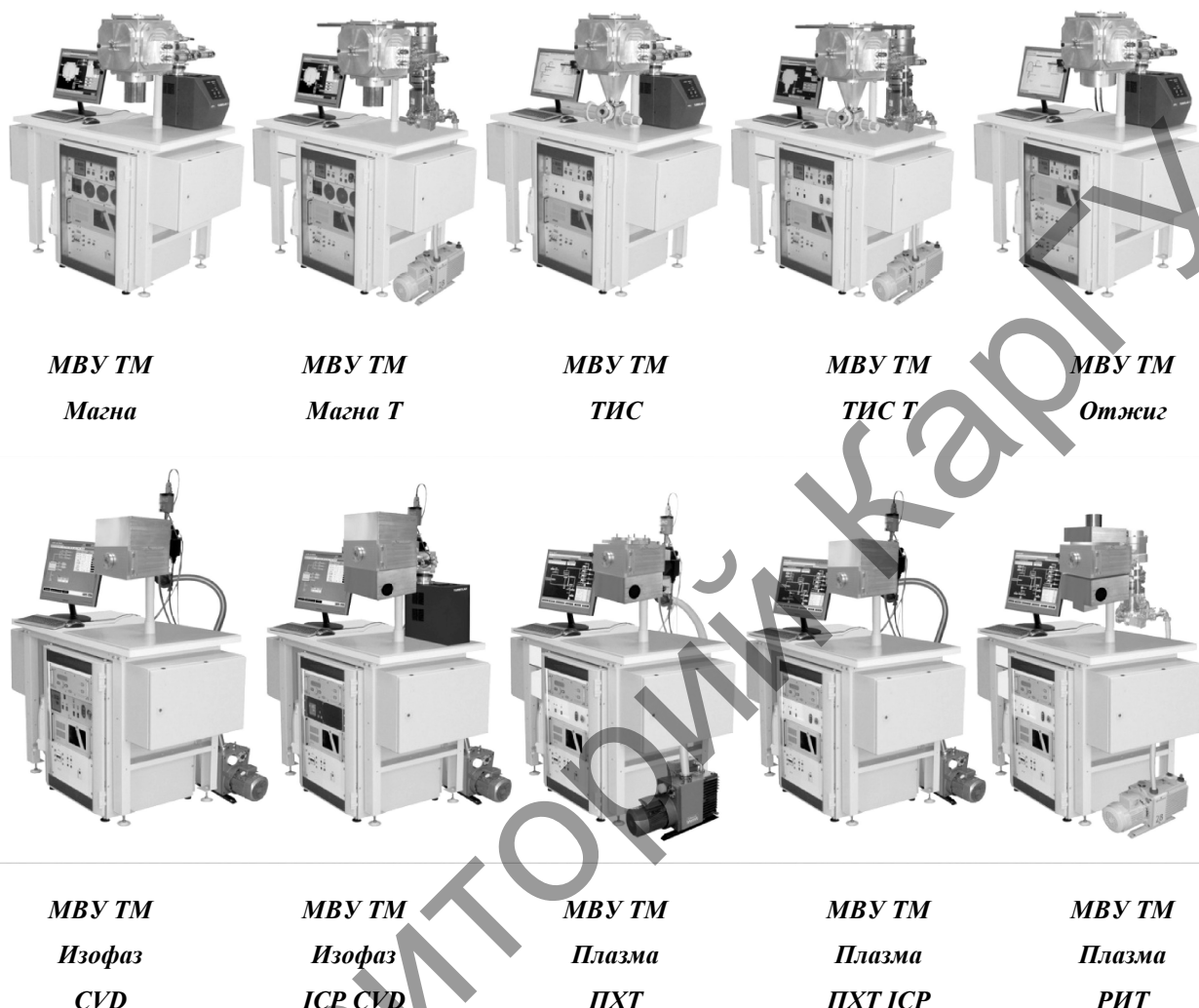


Рисунок 1. Установки серии МВУ ТМ

Назначение этой серии установок: мелкосерийное производство, технологическое обучение, научные исследования, отработка технологических процессов. Спецификация серии представлена следующим образом:

- МВУ ТМ-Магна, МВУ ТМ-Магна Т — нанесение плёнок металлов и диэлектриков методом магнетронного распыления;
- МВУ ТМ-ТИС, МВУ ТМ-ТИС Т — нанесение плёнок металлов методом термического испарения;
- МВУ ТМ-Изофаз PE CVD — плазмохимическое газофазное осаждение плёнок в диодной системе;
- МВУ ТМ-Изофаз ICP CVD — плазмохимическое газофазное осаждение плёнок в ICP системе;
- МВУ ТМ-Плазма РИТ Т — реактивно-ионное травление слоёв и материалов;
- МВУ ТМ-Плазма ПХТ Т — плазмохимическое травление слоёв и материалов в диодной системе;
- МВУ ТМ-Плазма ПХТ ICP Т — плазмохимическое травление слоёв и материалов в ICP системе;
- МВУ ТМ-Отжиг — термический отжиг и сушка слоёв и материалов в вакууме.

Реакторный модуль реализован на базе вакуумной камеры, выполненной в виде цельнометаллического куба, закреплённого на штанге. Такая конструкция позволяет использовать все 6 граней куба для подключения функциональных блоков и узлов. На грани камеры устанавливаются:

- функциональные блоки (магнетронный узел, ИК нагреватель, ICP индуктор, испаритель, ионный источник и др.);
- подложкодержатель для групповой или индивидуальной обработки пластин;
- узлы подключения и контроля систем: вакуумной, газовой, охлаждения, нагрева;
- загрузочная дверца.

Базовый модуль включает в себя системы: вакуумную, газовую, охлаждения, шкаф управления и электропитания.

Реакторы установок обеспечивают реализацию инновационных технологических процессов и выполнены на высоком техническом уровне с использованием ряда уникальных схемотехнических и конструктивных решений.

Модульный принцип организации установок позволяет гибко удовлетворять индивидуальные потребности заказчика путем оснащения установок соответствующими функциональными блоками с конструктивными минимальными изменениями.

Интересным конструктивным решением является планетарный подложкодержатель для групповой обработки пластин диаметром до 150 мм с тремя степенями вращения.

Настольный вариант установок существенно повышает технологические и экономические показатели. Относительно низкая стоимость установок сочетается с высокой конкурентоспособностью и применением комплекта МВУ ТМ в самых различных областях для обеспечения инновационных технологий.

В 2010–2012 годах проведена конструктивно-технологическая модернизация установок «МВУ ТМ». В результате созданы более совершенные установки 3-го поколения «МВУ ТМТ». Основная цель модернизации — повышение технологических и производственных характеристик. Прежде всего, реализована возможность двустороннего напыления плёнок на группу подложек.

Общими особенностями установок серии МВУ ТМ являются:

- автоматизированное двух-уровневое управление от промышленного компьютера;
- малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки, в том числе с использованием высоковакуумных турбомолекулярных насосов;
- автономная система охлаждения;
- потребляемая мощность одной установкой не более $3 \div 5,5$ кВт;
- площадь, занимаемая одной установкой, $\sim 1,5$ м².

Вакуумное оборудование для обработки пластин диаметром до 200 мм

Комплект этого оборудования представлен на рисунке 2.



Магна ТМ-200

Плазма ТМ-200

Изофаз ТМ-200

Рисунок 2. Комплект оборудования для обработки пластин диаметром до 200 мм

Назначение этого оборудования — разработка, исследование и реализация технологических процессов в микро-, nano-, радиоэлектронике. Спецификация комплекта представлена следующим образом:

- Магна ТМ-200 — нанесение многослойных или многокомпонентных металлических и диэлектрических слоёв, в том числе для формирования наноструктурированных каталитических слоёв (Fe, Ni, Co и др.);

- Плазма ТМ-200 — плазмохимическое и реактивно-ионное травление проводящих и диэлектрических материалов, в том числе для формирования наноструктур и микроэлектронных механических систем (МЭМС);
- Изофаз ТМ-200 — осаждение проводящих и диэлектрических материалов (SiO_2 , Si_3N_4 , Si, SiC) в вакуумном реакторе из газовой фазы с плазменной активацией в ВЧ, СВЧ плазме, в том числе для формирования алмазоподобных плёночных структур и углеродных нанотрубок.

Общие особенности установок:

- индивидуальная обработка подложек до \varnothing 200 мм;
- шлюзовая камера загрузки-выгрузки подложек;
- безмасляная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов;
- автономная система охлаждения;
- микропроцессорная система управления;
- возможность встраивания в «чистую комнату»;
- возможность объединения в кластерный комплекс 2- или 3-х установок с общим шлюзом;
- мощность потребления не более 8 кВт;
- площадь, занимаемая одной установкой, $\sim 2,0 \text{ м}^2$.

Комплект малогабаритного физико-термического оборудования

Комплект этого оборудования представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Комплект малогабаритного физико-термического оборудования

Назначение этого оборудования: разработка, исследование и реализация технологических процессов в микро-, нано-, радиоэлектронике. Спецификация комплекта представлена следующим образом:

С использованием вакуумной среды:

- Отжиг ТМ — термическая обработка пластин и материалов в высоком вакууме и газовой среде — процессы отжига, сушки, разгонки диффузанта, восстановления кристаллических структур;
- Изотрон ТМ — процессы осаждения слоёв из газовой среды при пониженном давлении (форвакууме);
- Изоплаз ТМ — плазмохимическое осаждение диэлектрических нелегированных и легированных слоёв оксида кремния и слоёв нитрида кремния при пониженном давлении с плазменной активацией реагентов.

Без использования вакуумной среды:

- Оксид ТМ — термическая обработка пластин и материалов при нормальном атмосферном давлении — процессы диффузии, окисления, отжига, сушки, разгонки диффузанта, восстановления кристаллических структур.

Общие особенности установок:

- диаметр обрабатываемых пластин — до 100 мм;
- количество групповой обработки пластин — 25;
- однореакторная печь резистивного нагрева горизонтального типа;

- кварцевый реактор с герметизируемой рабочей зоной;
- трехсекционный спиральный нагреватель с термопарой в каждой секции;
- газовая система (2–7 каналов);
- безмасляная вакуумная система откачки;
- микропроцессорная система управления;
- возможность подключения автономной системы водяного охлаждения.

Вакуумная установка нанесения многослойных пленок на рулонный материал

Разработана установка, предназначенная для технологической цепочки производства тонкоплёночных накопителей энергии (батарейки, аккумуляторы и т.д.), где одним из технологических процессов является осаждение полупроводниковых плёнок на рулонную металлическую ленту. Рулонная лента может быть шириной от 60 до 150 мм, толщиной 10–25 мкм и длиной 20 м. Установка обеспечивает толщину осаждаемых плёнок в пределах 0,1–3 мкм с неравномерностью по толщине + 5%.

Установка состоит из водоохлаждаемой рабочей камеры из нержавеющей стали, лентопротяжного механизма для перемотки металлической ленты из рулона P1 в рулон P2 (рис. 4), двух магнетронов M1 и M2 с самостоятельными источниками питания, источника ионно-плазменной очистки ленты металлической ленты ИИ, узла нагрева металлической ленты, состоящего из двух нагревателей H1 и H2.

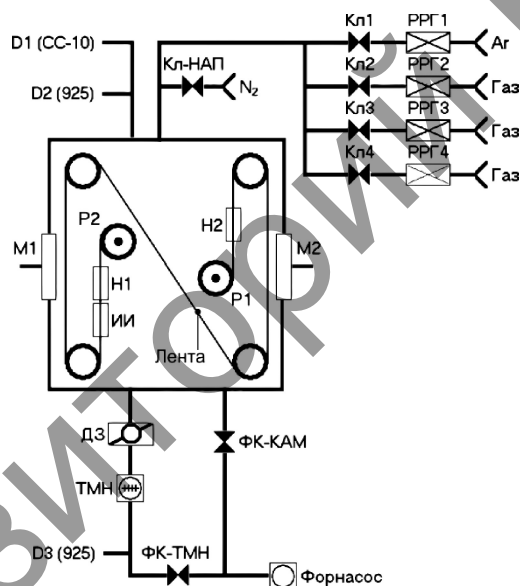


Рисунок 4. Схема установки

Вакуумная система установки выполнена полностью на основе безмасляных средств откачки, а именно с использованием турбомолекулярного ТМН и форвакуумных насосов, с регулирующей дроссельной заслонкой Д3 и вакуумметрами D1, D2, D3 для измерения предельного разряжения и рабочего вакуума.

Газовая система установки снабжена несколькими каналами подачи газов Кп1, Кп2, Кп3, Кп4 с контролем расхода каждого из них.

В составе установки имеется стойка питания и управления системами установки (рис. 5).

Осаждение плёнок происходит сразу с двух сторон при одновременной работе двух магнетронов M1 и M2 согласно схеме (рис. 4). Магнетроны имеют прямоугольную форму и косвенное водяное охлаждение мишени через мембрану. Металлическая лента во время процесса осаждения находится в движении со скоростью до 1 м/мин. Движение ленты может осуществляться как в прямом, так и в обратном направлении. Лента перематывается с одного охлаждаемого ролика на другой. Загрузка-выгрузка рулонов с лентой ручная (рис. 6).



Рисунок 5. Общий вид установки



Рисунок 6. Вид рабочей камеры

Перед процессом магнетронного осаждения металлическая лента проходит ионно-плазменную очистку с целью подготовки поверхности. Мощность питания системы ионно-плазменной очистки может достигать 1 кВт.

После очистки поверхность металлической ленты предварительно нагревается до 150 °С двумя нагревателями Н1 и Н2, для лучшей адгезии. Затем производится магнетронное осаждение при рабочем давлении 0,5 Па.

Система питания и управления состоит из промышленного контроллера, двух блоков питания магнетронов распыления и блока питания источника ионов.

Программное обеспечение реализует полуавтоматический режим управления, контроль всех технологических параметров, диагностику работы всех подсистем установки. Для визуального контроля работы установки вся информация выводится на дисплей компьютера.

Заключение

ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» специализируется на разработке вакуумно-плазменного и физико-термического оборудования для реализации различных технологических процессов. Мы готовы к сотрудничеству с казахстанскими предприятиями, НИИ и вузами.

Наш адрес: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, 10.

E-mail: info@niitm.ru

Список литературы

- 1 Gleiter H. Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure // Acta Materialia. — 2000. — Vol. 48. — No. 1. — P. 1–29.
- 2 Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. — М.: Машиностроение, 2003. — 112 с.
- 3 Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. — М.: Академия, 2005. — 117 с.
- 4 Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий // Вопросы атомной науки и техники. — 2008. — No. 2. — С. 119–130.
- 5 Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
- 6 Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Ионно-плазменные вакуумные покрытия — основа широкого повышения качества изделий машиностроения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. — Донецк: Изд. ДонНТУ, 2004. — Вып. 28. — С. 108–115.
- 7 Берлин Е.В., Двинин С., Шейдман Л.А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. — М.: Техносфера, 2007. — 472 с.
- 8 Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Шейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. — М.: Техносфера, 2012. — 640 с.

В.В.Одинокоев, В.М.Долгополов, Г.Я.Павлов, В.П.Рашчинский,
А.Н.Шпаков, А.Н.Шубников

Иновациялық технологияларға қажетті вакуумдық-плазмалық және физика-термиялық қондырғылар

НИИТМ-де тәжірибелік-өндірістік және эксперименталдық вакуумдық-плазмалық және физика-термиялық қондырғылар мен кешендер жасалған. Олар оқу үрдісін қамтамасыз етуге, ғылыми зерттеулер жүргізуге, технологиялық үрдістерді онтайландыруға, аз санды және эксперименталды өндірісті ұйымдастыруға арналған. НИИТМ-нің жаңа зерттемелері — ол жоғары деңгейде унификацияландырылған автоматтандырылған технологиялық қондырғылар. Олар жұқа қабыршақтар мен бүркемелерді алудың әр түрлі технологиялық үрдістерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Қондырғылардың реакторлары иновациялық технологиялық үрдістерді жүзеге асыруға мүмкіндік береді және бірегей схема-техникалық және конструктивтік шешімдерді қолдана отырып жасалған. Қондырғыны жинаудың модульдік принципі тапсырыс берушінің жеке қажеттіліктерін жеке функционалды блоктарды қосу арқылы шешуге мүмкіндік береді.

V.V.Odinokov, V.M.Dolgoplov, G.Ja.Pavlov, V.P.Rashchinskiy,
A.N.Shpakov, A.N.Shubnikov

The vakuum-plasma and physics-thermal equipment for innovative technologies

In Scientific research institute of exact mechanical engineering the complex of the experimental and trial vakuum-plasma and physics-thermal equipment is developed. It is intended for: maintenance of educational processes; carrying out of scientific researches; working off of technological processes; small-scale and experimental manufacture. New workings out of institute are the automated technological installations with high degree of unification. They allow to realize variety of technological processes of drawing of thin films and coverings. Reactors of installations provide realization of innovative technological processes and are executed on a high technological level with use of some unique схемотехнических and constructive decisions. The modular principle of the organization of installations allows to satisfy flexibly individual requirements of the customer by equipment of installations by corresponding functional blocks with constructive minimum changes.

References

- 1 Gleiter H. *Nanostructured Materials: Basic Concepts and Microstructure* // Acta Materialia, 2000, vol. 48, No. 1, p. 1–29.
- 2 Barvinok V.A. *Management of an intense condition and properties of plasma coverings*, Moscow: Mechanical engineering, 1990, 384 p.
- 3 Mihajlov A.N., Mihajlov V.A., Mihajlova E.A. *A ionic vacuum coverings — a basis of wide improvement of quality of products of mechanical engineering* // Progressive technologies and mechanical engineering systems: International of Proceedings, Donetsk: DNTU, 2004, vol. 28, p. 108–115.
- 4 Reshetnjak E.N., Strelnitsky V.E. *Synthesis of strengthening nanostructural coverings* // Questions of a nuclear science and technics, 2008, No. 2, p. 119–130.
- 5 Barvinok V.A. *Management of an intense condition and properties of plasma coverings*, Moscow: Mechanical engineering, 1990, 384 p.
- 6 Mihajlov A.N., Mihajlov V.A., Mihajlova E.A. *A ionic vacuum coverings - a basis of wide improvement of quality of products of mechanical engineering* // Progressive technologies and mechanical engineering systems: International of Proceedings, Donetsk: DNTU, 2004, vol. 28, p. 108–115.
- 7 Berlin E., Dvinin S., Scheidman L.A. *Vacuum technology and the equipment for drawing and etching of thin films*, Moscow: Technosphere, 2007, 472 p.
- 8 Berlin E.V., Koval N.N., Scheidman L.A. *Plasma chemical-thermal processing of a surface of steel details*, Moscow: Technosphere, 2012, 640 p.