

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

А. Н. Волков В. А. Дьяченко В. Ю. Клюкин

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Методы, технологические процессы и оборудование  
для нанесения покрытий

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
Издательство СПОГТУ  
1996

УДК 621.039.633

Вакуумная техника. Методы, технологические процессы и оборудование для нанесения покрытий: Учеб. пособие / А.Н.Волков, В.А.Дьяченко, В.Ю.Клюкин; СПб.:Изд-во СПбГТУ, 1996. 44 с.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины "Вакуумная техника" направления магистерской подготовки 551800 "Технологические машины и оборудование".

Рассмотрены физико-технологические основы процессов нанесения покрытий, подготовки поверхностей для нанесения покрытий, а также конструкции и работа технологического оборудования для реализации соответствующих технологий.

Предназначено для студентов пятого курса механико-машиностроительного факультета конструкторских специальностей, изучающих курсы "Вакуумная техника", "Оборудование для производства электровакуумных приборов" и "Оборудование для производства полупроводниковых приборов". Пособие может быть использовано для выполнения лабораторных работ и курсового проектирования.

Табл. 2. Ил. 19. Библиогр. 15 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного технического университета

© Санкт-Петербургский государственный  
технический университет, 1996

## ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении и приборостроении большое внимание уделяется вопросам повышения надежности, экономичности и ресурса выпускаемых машин и приборов. Очень часто их решение требует применения материалов, способных работать в различных агрессивных средах, в условиях высоких температур и давлений, повышенных вибраций при переменных контактных, ударных, статических нагрузках и т.д.

Многие требования, предъявляемые к изделию, в основном определяются свойствами поверхностного слоя материала, из которого оно изготовлено. Использование дефицитных и дорогих конструкционных материалов для производства изделия часто бывает нецелесообразно. На практике задача получения требуемых свойств изделия при изготовлении машин и приборов может быть решена за счет использования материалов со специальными покрытиями, обеспечивающими нужный комплекс свойств.

Еще одна важная область применения покрытий - медицинская техника. Традиционной задачей в этой области является создание инструментария с повышенной твердостью поверхностного слоя и легко стерилизуемого. В дополнение к этому в последнее время весьма актуальна задача создания разнообразных эндопротезов, к материалам которых предъявляются специальные требования и в особенности к поверхностям, длительное время контактирующим с живыми тканями.

В настоящее время требует разрешения проблема обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции, которая существенно зависит от внешнего вида товара. В связи с этим проблемы нанесения декоративно-отделочных покрытий приобретают особое значение.

В данном пособии представлен ряд лабораторных работ, посвященных изучению технологий и оборудования для нанесения покрытий в вакууме. В лабораторной работе 1 рассматриваются методы и технологии нанесения покрытий, их назначение, а также принципы работы оборудования для нанесения покрытий; в работе 2 - технологические основы ультразвуковой очистки поверхностей деталей, подлежащих покрытию; в работе 3 - устройство и работа ультразвуковых установок для очистки поверхностей; в работе 4 - подготовка поверхностей под напыление (специальные методы очистки и активации поверхностей); в работе 5 - вакуумная установка для напыления ВУ-1В; в работе 6 - вакуумная система установки ВУ-1В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

### МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ИХ НАЗНАЧЕНИЕ. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Цель работы - ознакомление с образцами покрытий и методами их нанесения.

Задачи работы - изучить физико-технологические основы процессов нанесения покрытий и принципы работы технологического оборудования для нанесения покрытий.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с образцами покрытий, нанесенных на детали различного функционального назначения.

2. В зависимости от функционального назначения деталей определить комплекс требований (твердость, износостойкость, жаростойкость, химическая стойкость, адгезия, декоративные свойства, стоимость и проч.), предъявляемых к соответствующим покрытиям.

3. Изучить классификационные признаки технологических процессов и оборудования для нанесения покрытий.

#### Общие сведения

Методы получения покрытий классифицируются исходя из физической сущности процессов, лежащих в их основе и определяющих физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий [2]:

1) по состоянию вещества для получения покрытий (твердое, жидкое, атомарное и ионизированное);

2) по способу получения вещества для нанесения покрытий (плазменный и термический нагрев, термическое испарение, катодное распыление, дуговое испарение, плазменная ионизация атомарной компоненты и так далее);

3) по составу транспортной, защитной или реакционной атмосферы (неконтролируемая, динамический вакуум, вакуум, инертный газ, плаз-

ма, реакционный газ);

4) по способу активации процесса формирования покрытий (термический, кинетический, плазменный, ионная бомбардировка, электронная и фотонная стимуляция);

5) по характеру процессов, протекающих в зоне формирования покрытий (кристаллизация, рекристаллизация, физическая конденсация, химические реакции, плазмохимические реакции, диффузионное насыщение, гомогенные и гетерогенные поверхностные реакции).

Такое большое число классификационных признаков для способов получения покрытий определяется разнообразием методов напыления и существенным отличием свойств покрытий, полученных разными методами.

Наибольшее распространение в промышленности получили газотермические и вакуумные методы напыления. Выбор метода определяется назначением покрытия, условиями работы изделия, материалом изделия и состоянием его поверхности.

Рассмотрим сущность газотермических и вакуумных методов получения покрытий.

Газотермическое напыление (ГТН) - метод получения покрытий нагревом и ускорением дисперсных частиц напыляемого материала высокотемпературной газовой струей и осаждением их на поверхность [1,2]. Напыляемый материал подается в высокотемпературную газовую струю в дисперсном состоянии или диспергируется в процессе напыления.

Нагрев и распыление частиц осуществляются газовыми струями. Способ генерации струи является одним из важнейших классификационных признаков.

ГТН представлено в промышленности четырьмя методами: газоплазменным, газодуговым, плазменным и детонационно-газовым.

Газоплазменное напыление - метод, при котором нагрев и перенос напыляемого материала осуществляются струей продуктов сгорания смеси газов (ацетилена, пропана, водорода) с кислородом. Для сжигания газов применяют специальные горелки (рис.1.1). Распыляемый материал подается через центральный канал горелки в центр газового пламени, где происходят нагрев и плавление.

Для распыления используют проволоку или порошок. При распылении проволоки диспергирование и ускорение частиц осуществляются

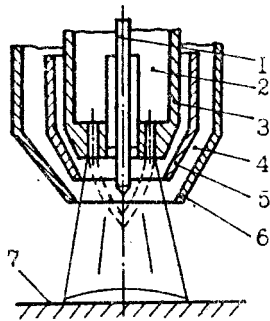


Рис.1.1. Схема газопламенного напыления: 1 - распыляемый материал; 2 - газокислородная смесь; 3 - газовый мундштук; 4 - сжатый воздух; 5 - обжимное сопло; 6 - сопло сжатого воздуха; 7 - основа

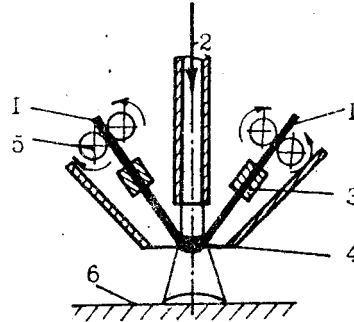


Рис.1.2. Схема дугового напыления: 1 - распыляемый материал; 2 - сжатый воздух; 3 - токоподвод; 4 - электрическая дуга; 5 - подложные ролики; 6 - основа

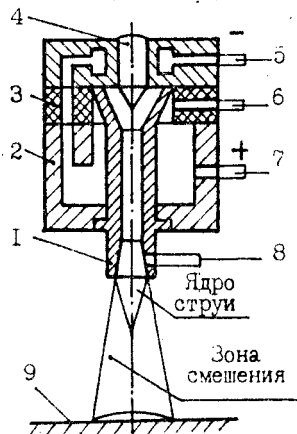


Рис.1.3. Схема плазменного напыления: 1 - водоохлаждаемое сопло; 2 - корпус; 3 - изолятор; 4 - электрод; 5,7 - подвод и отвод воды; 6 - подвод плазмообразующего газа; 8 - подвод распыляемого материала; 9 - основа

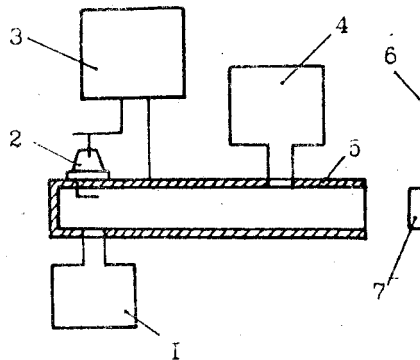


Рис.1.4. Схема детонационно-газового напыления: 1 - блок подачи газа для формирования горючей смеси и продувки ствола; 2 - воспламенитель; 3 - блок формирования инициализированного разряда; 4 - блок подачи порошка; 5 - ствол; 6 - крышке; 7 - основа

струей горячего газа и потоком сжатого воздуха. Порошковые материалы подаются в горелку потоком газа, нагреваются и переносятся струей продуктов сгорания, а также потоком сжатого воздуха.

Сравнительно невысокая температура пламени (~3500 К для смеси ацетилен-кислород) не позволяет получить покрытие из тугоплавких материалов. Обычно таким методом напыляют цинк, алюминий, медные сплавы, стали, сплавы на основе железа и никеля, полимерные материалы. ГТН получило широкое распространение в промышленности благодаря простоте и высокой надежности оборудования для реализации метода. Простота оборудования и низкая трудоемкость реализации обеспечили ему широкое распространение в промышленности. Дуговое напыление - метод, при котором нагрев и плавление материалов в виде проволоки (ленты, прутка) осуществляются электрической дугой, а диспергирование и перенос - потоком сжатого газа, как правило, воздуха (рис.1.2) [2,6.11]. Для зажигания дуги используют постоянный или переменный ток. Нагрев электрической дугой пригоден только для электропроводных материалов. Метод применяют для нанесения покрытий из цинка, алюминия, сталей, сплавов на основе железа и никеля. Оборудование для реализации метода так же, как и описанное ранее, имеет низкую стоимость, а вот себестоимость покрытия в данном случае ниже, благодаря замене энергоносителя (смесей достаточно дорогих и взрывоопасных газов на токи низких напряжений).

Плазменное напыление - метод, при котором нагрев, плавление, диспергирование и перенос напыляемого материала осуществляются плазменной струей, полученной нагревом потока газа в электрическом дуговом разряде [1,2,7]. Плазменные струи получают в плазменных генераторах (плазмотронах) (рис.1.3). Плазмотрон состоит из катода и анода, разделенных изолятором. Все элементы плазмотрона обычно охлаждаются водой. Плазмообразующий газ подается в электрическую дугу, горящую между стержневым катодом и кольцевым анодом (соплом), нагревается и в виде плазменной струи вытекает из сопла. Материал, подлежащий распылению, вводится в плазменную струю в виде порошка или проволоки; возможен его ввод в дугу с плазмообразующим газом. Сжатие электрической дуги в камере (сопле) плазмотрона позволяет достигать температуры плазменной струи до 10000...15000 К. За счет нагрева и последующего расширения газа удается получать плазменные струи со скоростями, близкими к скорости звука. Высокие температура и скорость струи позволяют создавать покрытия из любых материалов.

не диссоциирующих при нагреве, без ограничений по температуре плавления.

Плазменным напылением получают покрытия из металлов и сплавов, оксидов, карбидов, боридов, нитридов, композиционных материалов. Для создания плазмы используют аргон, азот, их смеси с водородом, гелием. Использование инертных газов не позволяет получить на воздухе нейтральную плазменную струю из-за турбулентности, обуславливающей интенсивное подмешивание воздуха. Однако указанная выше цель легко достигается применением камер с контролируемой атмосферой. Энергетические характеристики плазменной струи регулируются в широких пределах и зависят от подбора газов, параметров дугового разряда, расхода газов, геометрии сопел и катодов. Оборудование для реализации метода имеет достаточно простую конструкцию, высокую надежность и низкую стоимость. Процесс нанесения покрытий таким методом легко механизуется и автоматизируется.

Детонационно-газовое напыление - метод, при котором нагрев, ускорение и перенос распыляемого материала осуществляются струей продуктов детонационного сгорания смесей горючего газа с кислородом [2,3]. Детонационная струя образуется в стволе специальной установки - пушки (рис.1.4). Главной особенностью детонационно-газового напыления является цикличность процесса. Каждый технологический цикл состоит из наполнения ствола пушки смесью газа, подачи порции порошка, подрыва смеси, ускорения, нагрева и переноса частиц распыляемого порошка на основу, продувки ствола нейтральным газом.

Обычно при детонационно-газовом напылении применяют смесь ацетилен-кислород, что обеспечивает наиболее высокую температуру пламени (~3500 К). Для детонационной волны характерны высокие скорости распространения - (2...4) 10 м/с при относительно невысокой температуре. Скорость распыляемых частиц порошка в 8...10 раз больше, чем в рассмотренных ранее способах напыления и составляет 600...1000 м/с. За счет высокой кинетической энергии частиц распыляемого материала удается получать покрытия с хорошей прочностью сцепления (до 170 МПа) и плотностью.

Детонационно-газовое напыление обычно применяется для создания покрытий на основе карбида вольфрама, а также некоторых других материалов, например оксидов алюминия, хрома, карбида хрома. Главным недостатком детонационно-газового напыления является высокий уровень шума (до 140 дБ), требующий размещения установок в специальных



помещениях (боксах), что увеличивает себестоимость покрытий. Кроме этого, детонационно-газовое напыление имеет циклическую природу, и поэтому его автоматизация требует больших затрат, чем в предыдущих методах.

Свойства покрытий, полученных методами ГТН, в основном определяются двумя факторами: термическим (это температура напыляемой частицы) и кинетическим (это скорость и кинетическая энергия частицы). Названные факторы в общем случае характеризуют взаимодействие частиц с окружающей средой, поверхностью основы и напыленного ранее слоя, чем в целом и определяются прочностные характеристики покрытий.

В газоплазменном, газодуговом и плазменном методах главным фактором является термический, так как скорость частиц в этих случаях не превышает 150 м/с. Однако можно отметить, что вклад кинетического фактора в формирование покрытий увеличивается в ряду от газодугового к плазменному напылению. Это определяет и соответствующее повышение прочностных характеристик покрытий.

При детонационно-газовом напылении основным является кинетический фактор. Именно он обуславливает высокую прочность сцепления и плотность покрытий. Опыт применения покрытий, полученных методами ГТН, показывает, что обычно они успешно эксплуатируются при прочности сцепления 20...40 МПа. Высокая плотность покрытий во многих случаях не является необходимой, особенно в покрытиях триботехнического назначения, где оптимальная пористость равна 8...12 %.

Комплексный сравнительный анализ методов ГТН показал, что на сегодняшний день наиболее универсальным и технологичным процессом является плазменное напыление.

#### Получение покрытий в вакууме

Известны три метода получения покрытий в вакууме: термический, газозаванный и ионно-плазменный [2,8,10,12,13].

Термический метод заключается в конденсации материала из молекулярных и атомарных пучков. Пучки создаются в результате резистивного, электронно-лучевого или лазерного нагрева напыляемого материала. В литературе эти методы часто называют методами осаждения из паровой фазы и методами молекулярных пучков. Атомы, молекулы и мик-

рокапельная фаза, испаряясь изотропно, разлетается над разогретой поверхностью распяляемой мишени, и часть из них конденсируется на поверхности детали, образуя покрытие. Процесс имеет тепловую природу. Энергия конденсирующихся частиц не превышает 0,3 эВ, а ионизация частиц практически отсутствует. Основными недостатками метода являются низкая и нерегулярная энергия конденсирующихся частиц, что обычно приводит к получению покрытий с низкой прочностью сцепления конденсата с поверхностью основы. Структура и физико-механические свойства покрытия зависят от температуры основы, скорости конденсации пара (степени пересыщения) и степени вакуума.

Термическими методами получают покрытия из металлов, неметаллов, полупроводников и других соединений. Низкая адгезия, невысокая стабильность свойств покрытия и необходимость нагрева основы до температуры не ниже 0,3...0,5 от температуры плавления покрытия  $T_{пл}$  существенно ограничивают применение этих методов в машиностроении и делают их практически непригодными для получения оксидов, нитридов и других соединений. Однако термические методы широко применяются для получения технологических (неконструкционных) покрытий в оптической и электронной промышленности.

Методы газофазного осаждения (ГФО) основаны на подаче в тепловой реактор летучих соединений металлов (в основном хлоридов) в смеси с водородом и добавками азота, метана или кислорода. За рубежом этот метод называется CVD (Chemical Vapour Deposition) - химическое паровое осаждение. При протекании соответствующих химических реакций на поверхности детали формируется покрытие из чистого металла либо из его соединений с азотом, углеродом или кислородом. Главное условие получения покрытия - поддержание температуры на уровне, превышающем температуру разложения хлорида металла в атмосфере водорода. Для получения качественных покрытий из соединений (нитридов, карбидов и оксидов) необходимо поддержание температуры основы на уровне, превышающем  $0,3T_{пл}$  этих соединений, т.е. выше 900...1100 К. По этой причине метод ГФО мало пригоден для обработки большинства конструкционных машиностроительных материалов.

Наиболее перспективным для получения покрытий на конструкционных материалах и готовых деталях является вакуумный ионно-плазменный метод. Это объясняется тем, что кроме термического метод допускает использование дополнительных факторов (кинетического и ионизационного). Они оказывают существенное влияние на процесс образова-

ния покрытий и позволяют получать высококачественные покрытия из различных соединений при существенно более низких температурах. На практике существует целая гамма разновидностей такого метода.

Основной общей особенностью этих методов является то, что в них используется плазма. Плазму применяют для катодного распыления материала мишени, дополнительной ионизации парового потока или для получения осаждаемого материала в плазменном состоянии. Все разновидности ионно-плазменного метода можно разделить на три группы в зависимости от того, из какой фазы (атомарной, ионной или плазменной) происходит формирование покрытия. Каждую из этих групп можно разделить на подгруппы в соответствии с конкретной технической реализацией описываемого метода.

В зависимости от используемой для получения покрытия фазы вещества методы подразделяют на ионное распыление, ионное осаждение, плазменное напыление.

Ионное распыление может быть катодным или магнетронным. При ионном распылении мишень изготавливается из материала покрытия и распыляется при бомбардировке положительными ионами высокой энергии в плазме разряда вспомогательного газа. Распыляемые атомы вещества мишени осаждаются на поверхность основы и образуют покрытие. Системы катодного распыления могут быть диодными, триодными и с автономным источником ионов (рис.1.5). В диодной схеме (рис.1.5,а) мишень-катод изготовлена из напыляемого материала. Между мишенью-катодом (МК) и основой-анодом (ОА) поддерживается самостоятельный тлеющий разряд газа на постоянном или высокочастотном токе. Атомы мишени распыляются ионами газа, движутся к основе и, осаждаются на ней, образуют покрытие. В триодной схеме (рис.1.5,б) самостоятельный или несамостоятельный тлеющий разряд поддерживается между автономными электродами. В случае несамостоятельного разряда используется нагреваемый катод. В триодной схеме имеется возможность осуществлять конденсацию покрытия в условиях его бомбардировки ионами газа. С этой целью на основу подается отрицательный потенциал до 100 В. В системе с автономным источником (рис.1.5,в) ионы газа получают обычно в специальной камере в одном из видов разрядов. Вытягивание ионов из камеры осуществляется электростатическим методом.

КПД образования ионов (отношение энергии, затраченной на распыленные атомы, к общей энергии, потребляемой системой) в рассмотренных системах очень низок и редко превышает 1%. В основном энергия

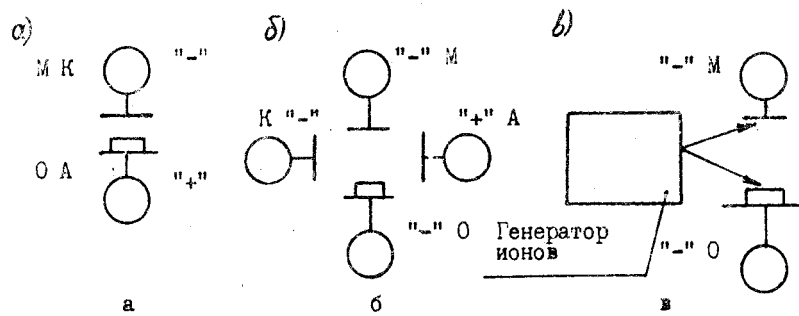


Рис. 1.5. Основные схемы катодного распыления

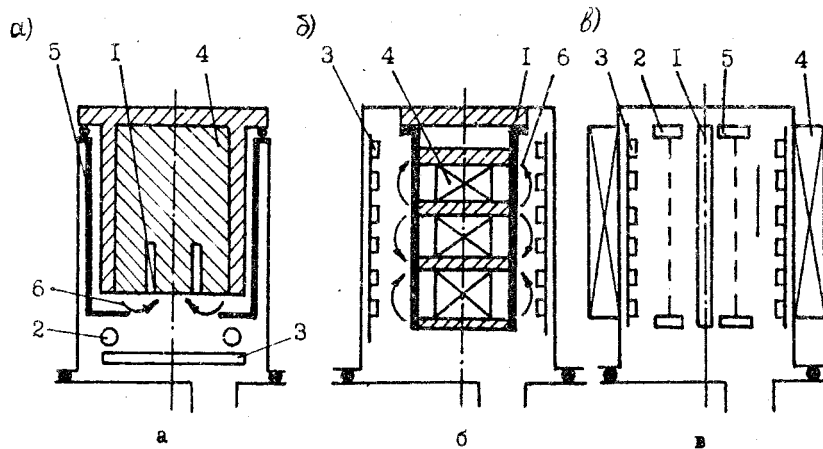


Рис. 1.6. Конструктивные схемы магнетронных систем распыления: а - планетарная; б - цилиндрическая с внутренним магнитом; в - цилиндрическая с внешним магнитом; 1 - катод-мишень; 2 - анод; 3 - устройство для крепления напыляемых деталей; 4 - магнитная система; 5 - экран; 6 - направление силовых линий магнитного поля

системы расходуется на нагрев мишени. При катодном распылении основа и мишень разделены небольшим зазором, что позволяет довести коэффициент использования материала мишени практически до 100 %. Средняя энергия осаждаемых атомов почти не зависит от режима напыления и не превышает 1...3 эВ. Степень ионизации осаждаемого атомарного потока не превышает 1 %.

На установках с катодным распылением скорости роста покрытия имеют порядок  $10^{-9}$  м/с. Предельная скорость роста покрытия определяется возможностями теплосъема с мишени, а также оптимизацией давления газа по скорости распыления мишени и отражения диффундирующих атомов. Существенными недостатками метода являются нерегулируемость и недостаточно высокие энергии распыленных атомов, низкая степень ионизации осаждаемого потока. Несмотря на указанные недостатки катодное распыление позволяет получать покрытия с прочностью сцепления гораздо более высокой, чем термические методы. Кроме того, методами катодного распыления можно получать покрытия соединений тугоплавких металлов.

Путем усовершенствования катодных распылительных систем были созданы так называемые магнетронные распылительные системы, позволившие на три порядка увеличить скорость роста покрытия. Сущность такого усовершенствования заключается в следующем. В системах диодного катодного распыления тлеющий разряд загорается при условии  $pd > L$  (где  $p$  - давление газа,  $d$  - расстояние между электродами,  $L$  - константа, зависящая от рода газа). Атомы, распыленные с поверхности мишени, долетят до основы при условии  $pd < L_1$  (где  $L_1$  - константа, зависящая от рода газа и распыленного атома). В катодных диодных системах связь между константами определяется соотношением  $pL_1 = L$  (где  $p > 10$ ).

Таким образом, при катодном распылении увеличение давления в камере приводит к росту числа распыленных атомов и в то же время ограничивает возможность их попадания на основу за счет увеличения числа столкновений с атомами газа. Поэтому даже при оптимальном давлении большая часть распыленных атомов не долетает до основы. Кроме того, электроны плазмы разгоняются под действием электрического поля и, бомбардируя поверхность основы, нагревают ее. Применение диодной системы вместо триодной или системы с автономным источником ионов позволяет частично уменьшить влияние этих отрицательных явлений (исключить электронную бомбардировку основы и на порядок повысить скорость роста покрытия).

Наложение на плазму газового разряда магнитного поля, перпендикулярного к электрическому, приводит к уменьшению давления зажигания разряда. Это связано с тем, что в пересекающихся электрическом и магнитном полях электрон движется к основе не по силовым линиям электрического поля, а по участкам циклоид. В результате существенно возрастает время жизни электрона в плазме, а следовательно, и число ионов газа, рожденных данным электроном в столкновениях с атомами газа.

В такой системе азимутальный электронный ток превышает радиальный, а также снижается значение  $L$ , что улучшает условия возникновения разряда. Выбором величины индукции магнитного поля можно создать условия, при которых все распыленные с поверхности мишени атомы достигают поверхности основы, резко увеличивая скорость роста покрытия. Кроме того, распыленные атомы практически не сталкиваются с атомами рабочего газа и поэтому не теряют свою кинетическую энергию. Кинетическая энергия конденсирующихся атомов в магнетронных распылительных системах достигает  $5 \dots 10$  эВ, что ведет к дальнейшему повышению прочности сцепления покрытия с основой, а уменьшение величины электронного тока приводит к уменьшению ее разогрева.

Системы магнетронного напыления бывают планарными и цилиндрическими (рис.1.6). Цилиндрические магнетронные системы могут быть с внешним магнитом и магнитом, расположенным внутри катода. Недостатками этого метода являются нерегулируемость и низкие значения энергии конденсирующихся атомов.

Повышение прочности сцепления покрытия с основой при увеличении энергии конденсирующихся частиц, а также возможность получения в этом случае соединений тугоплавких материалов при более низких температурах привели к созданию методов получения покрытий из ионных пучков и пламенных потоков.

Разработка методов ионного осаждения связана с попытками повышения прочности сцепления покрытий, получаемых термическими методами, а также увеличения производительности и скорости роста покрытий, получаемых методами ионного распыления. Принципы метода ионного осаждения предложены Д. Мэттоксом. Сущность метода заключается в следующем. Материал испаряется термическим методом, затем ионизируется и ускоряется по направлению к поверхности детали под действием приложенного к ней отрицательного потенциала. В диодной схеме ион-

ного осаждения между испарителем (анодом) и основой (катодом) поддерживается тлеющий разряд в парах материала анода. Материал анода испаряется под действием теплоты, выделяемой электронами на аноде, и дополнительного подогрева анода. Однако для этого требуется сравнительно высокое давление (до  $\sim 6,65$  Па), что снижает скорость осаждения и степень ионизации паровой компоненты металла. Более эффективны системы, в которых испарители совмещены с магнетронным источником или полым катодом, а для дальнейшего повышения степени ионизации используется дополнительный анод.

Одной из разновидностей метода ионного осаждения является метод активированного реактивного осаждения (АРИ). В этом случае материал испаряется электронным лучом, а дополнительная ионизация пара проводится в специально созданной плазменной области над расплавом. Для создания такой области над расплавом устанавливают дополнительный анод для вытягивания электронов с низкой энергией, испускаемых расплавом.

Типовой вариант установки ионного осаждения представлен на рис. 1.7. Испарение материала мишени 1 осуществляется лучом 2 высоковольтной электронно-лучевой пушки 3. Электроны, испускаемые накачиваемым катодом 4 и расплавом материала, ускоряются по направлению к дополнительному электроду - аноду 5 и ионизируют испаряемый материал. Нейтральные атомы и ионы пара осаждаются на поверхности основы 6, образуя покрытие. В таких системах удается ионизировать 10...40 % атомов пара. В настоящее время этот метод широко используется для получения покрытий из металлов, а также из их нитридов и карбидов. Следует отметить, что по своей сути эти методы было бы правильно называть ионно-термическим осаждением, так как конденсация материала на поверхности основы происходит из атомарной и ионной фаз [2].

Методы ионного осаждения обеспечивают высокие качества покрытий. Основным недостатком установок для ионного осаждения является использование в них достаточно громоздкого и дорогого высоковольтного оборудования для получения электронного луча, травления поверхности основы перед напылением и дополнительной ионизации парового потока.

Методы получения покрытий с помощью устройства дугового испарения материалов получили название методов плазменного напыления в вакууме (ПНВ). Они позволяют получить плазменный поток, содержащий

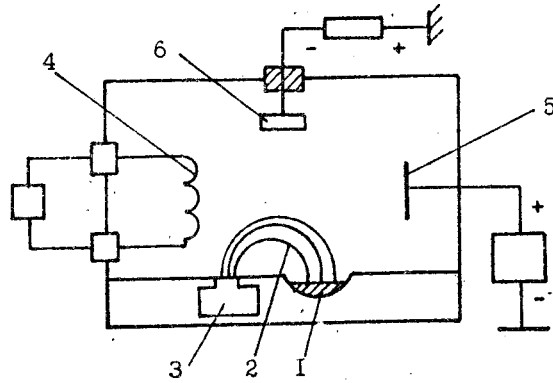


Рис. 1.7. Схема установки ионного осаждения с триодной системой и дополнительной ионизацией паровозного материала, испаряемого лучом электронно-лучевой пушки

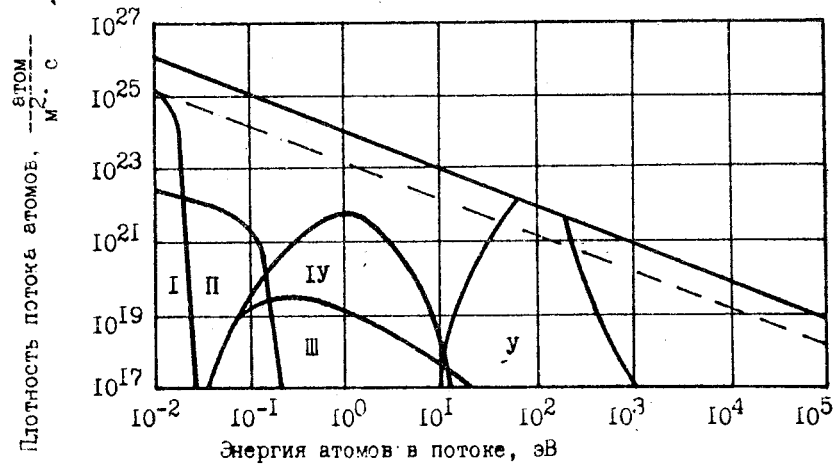


Рис. 1.8. Сравнение метода нанесения покрытий в зависимости от плотности потока частиц и энергии, приходящейся на одну частицу



до 40...60 % ионов металла. Иногда методы, базирующиеся на системах, генерирующих потоки плазмы твердых и газообразных веществ с высокой и регулируемой в широких пределах энергией частиц, называют методами плазменной технологии высоких энергий [2].

Эти методы базируются на двух процессах: создание плазмы в одном из типов электрических разрядов и последующая деионизация и ускорение продуктов плазмы к поверхности конденсации. При этом ускоряются либо только ионы плазмы, либо вся квазинейтральная плазма. В первом случае имеет место метод ионного осаждения, а во втором - метод осаждения с помощью плазменных ускорителей. При осаждении плазменными ускорителями ускорение плазмы происходит под действием силы Ампера или под действием градиента газокинетического давления. Для извлечения ионов из плазменного потока к обрабатываемому изделию прикладывают отрицательный относительно плазмы потенциал. Такой режим ускорения называют электростатическим. На практике перечисленные режимы используют как отдельно, так и совместно. В случае ускорения плазмы под действием силы Ампера принято различать следующие режимы: режим холловского ускорения плазмы, режим ускорения плазмы собственным магнитным полем, режим ускорения плазмы с замкнутым дрейфом электронов.

Плазменные ускорители бывают стационарными и импульсными. В методах ПНВ образование плазмы осуществляется в основном дугowymi разрядами в вакууме, которые подразделяются на разряды с холодным и горячим катодом. Дуговой разряд может возникать в парах материала катода, анода или принудительно подаваемого вещества. По форме катода плазменные ускорители разделяют на кольцевые и торцовые. Для получения покрытий плазменными ускорителями наиболее широкое применение получили так называемые "холодные" системы (с холодным катодом).

Главным условием существования дугowego разряда в вакууме в системе с холодным катодом является наличие эрозии материала электродов. В зависимости от того, на каком электроде эрозия преобладает, различают две формы вакуумной дуги с холодным катодом. Если эрозия протекает только на катоде (анод не эродирует), реализуется катодная форма вакуумной дуги. Если и анод начинает интенсивно эродировать, причем величина его эрозии существенно превышает величину эрозии катода, реализуется анодная форма вакуумной дуги.

Катодная форма вакуумной дуги представляет собой электрический

разряд, существующий исключительно в парах материала катода. Продукты эрозии разлетаются изотропно в пределах полусферы, содержат капельную, паровую и ионизированную фазы. Степень ионизации продуктов эрозии изменяется в пределах 15...80 %, а средняя энергия ускоренных ионов - десятки электронвольт. Так как для катодной формы дуги существует минимальный ток, выше которого она горит устойчиво, то для стационарного режима генерации необходимо использовать токи выше критического значения (10...120 А).

В заключение приведем сравнение рассмотренных методов получения покрытий по двум важнейшим технологическим параметрам: плотности потока частиц, падающих на поверхность конденсации, и средней кинетической энергии направленного движения частиц. На рис.1.8 область энергий и плотностей потока частиц ограничена сверху двумя линиями, соответствующими возможности теплосъема за счет излучения при температурах 700 и 1500 К. Область I соответствует низкотемпературным, металлургическим и газотермическим методам нанесения покрытий.

Область II можно отнести к стационарным методам термического испарения. Катодное распыление (область III) характеризуется более высокими энергиями частиц и позволяет наносить покрытия со скоростью до  $10^{-9}$  м/с. Усовершенствованием катодного распыления являются магнетронные методы (область IV), позволяющие конденсировать покрытия со скоростью до  $10^{-5}$  м/с. Область V соответствует методам ионного и плазменного осаждения. По сравнению со всеми другими методами плазменной технологии высоких энергий позволяют в широких пределах регулировать энергию конденсирующихся частиц и тем самым сочетать различные технологические процессы (газовое и ионное травление; конденсацию и внедрение) в одном производственном цикле.

#### Содержание отчета (объем 6...8 с.)

1. Титульный лист, содержание.
2. Введение, цель работы.
3. Описание классификационных признаков методов нанесения покрытий.
4. Классификационная таблица методов нанесения и свойств покрытий.

## 5. Заключение.

### Список литературы

1. Антошин Е.В. Газотермическое напыление покрытий. М.:Машиностроение, 1974. 96 с.
2. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства пламенных покрытий. М.:Машиностроение, 1990. 384 с.
3. Бартенев С.С., Фелько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.:Машиностроение, 1982. 214 с.
4. Данилин В.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.:Радио и связь, 1982. 72 с.
5. Кесаев Н.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 325 с.
6. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. М.: Машиностроение, 1966. 432 с.
7. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.:Машиностроение, 1981, 192 с.
8. Мовчан Б.А., Малошенко И.С. Даростойкие покрытия, осажденные в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 232 с.
9. Падалко В.Г., Толок В.Т. Методы пламенной технологии высоких энергий // Атомная энергетика. 1978. Т.44. С.476-478.
10. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение азотных покрытий в вакууме. М.:Машиностроение, 1976. 367 с.
11. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
12. Хирс Дж., Паунд Г.М. Испарение и конденсация. М.:Металлургия, 1966. 196 с.
13. Холланд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. М.:Госэнергоиздат, 1963. 608 с.
14. Aisenberg S., Chabot R.W. Physics of Ion Plating and Ion Beam Deposition // J. Vac. Sci. Technol. 1973. N 1. P.104-107.
15. Cutting tools as good as good // Metalworking Production. 1983.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Цель работы - ознакомление с технологическими процессами ультразвуковой очистки изделий из стекла и металла и порядком эксплуатации ультразвуковых установок.

Задачи работы - изучить физико-технологические основы ультразвуковой очистки и рекомендации по применению различных моющих растворов.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с технологическими процессами ультразвуковой очистки изделий.
2. Составить технологический процесс очистки изделия, указанного преподавателем.
3. Выполнить процесс очистки изделия на ультразвуковой установке.
4. Произвести визуальную (по сравнению с контрольным образцом) оценку качества очистки.

#### Общие сведения

Ультразвуковой метод очистки изделий позволяет осуществлять быструю и высококачественную очистку изделий сложной конфигурации, а в ряде случаев удалить загрязнения, не поддающиеся удалению другими методами, заменить токсичные и взрывоопасные органические растворители более дешевыми и менее дефицитными щелочными растворами, механизировать трудоемкие операции очистки. Он широко используется в различных отраслях промышленности.

При разработке технологических процессов очистки следует учитывать свойства и характер загрязнений. Для электронной промышленности, например, характерны такие загрязнения, как следы кислот, щелочей, остающиеся на поверхности деталей после химической обработки, остатки флюса, микрозаусеницы, выплески металла, образующиеся при пайке, остатки кислот и лаков после травления, ворс, пыль, жировые следы рук и т.п. Вследствие того, что даже малые загрязнения

приводят к ухудшению качества изделий и уменьшению срока их безотказной работы, очевидна необходимость особых требований к качеству очистки в электронной промышленности.

В оптической промышленности распространены, например, такие виды загрязнений как наклеенные смолы, канифоль, тальк, бакелитовый лак и т.п.; в часовой и приборостроительной промышленности - часовое масло, отпечатки пальцев, производственная пыль; в электротехнической промышленности приходится работать с пропиточными лаками, флюсами, эмалями.

Знание характера загрязнений является решающим фактором при выборе и разработке технологических процессов очистки и обеспечивает возможность получения высокой степени чистоты изделий.

#### Физические основы ультразвуковой очистки

Под воздействием мощного ультразвукового излучателя в жидкостной среде возникают переменные давления, изменяющиеся с частотой возбуждающего поля и создающие высокие плотности энергий. При амплитудах звукового поля, превышающих некоторое пороговое для данной жидкости значение, возникает кавитация. Это явление характеризуется ростом в жидкости пузырька в течение некоторой части полупериода положительных давлений. Пузырек вырастет до некоторого максимального размера и захлопывается. Захлопываясь, он создает ударные волны большой силы - импульсы давления, достигающие несколько десятков тысяч МПа. Такие высокие ударные давления вызывают сильные кавитационные разрушения на поверхности изделий. При этом происходит разрыв поверхностной пленки загрязнений. Под пленкой начинают образовываться пузырьки, открывающие и дробящие ее при захлопывании.

Кавитационные пузырьки, возникающие при ультразвуковом воздействии на жидкость, различны по размерам, их диаметры колеблются от 0,01 до 1,0 мм. Наиболее интенсивные импульсы давлений создают пузырьки, собственные частоты которых близки или кратны частоте возбуждающего ультразвукового поля.

Кавитация имеет первостепенное значение при разрушении и снятии твердых пленок и частиц загрязнений, а также при очистке нерастворимых в моющих растворах загрязнений.

В процессах ультразвуковой очистки существенное значение имеют акустические течения - стационарные вихревые потоки, образующиеся в

савученной жидкости. Акустические течения играют большую роль в очистке растворимых загрязнений. Они также способствуют лучшему обмену растворителей в зоне очистки, уносу загрязненного растворителя.

#### Технологические жидкости, используемые в процессах ультразвуковой очистки

Технологические жидкости, используемые в процессах ультразвуковой очистки, подразделяют на моющие среды и жидкости для дополнительной обработки (предварительного замачивания, промывки, пассивирования и консервации изделий).

В качестве моющих сред при ультразвуковой очистке используют воду, водные растворы щелочей и поверхностно-активных веществ, растворы кислот, органические растворители, эмульсионные составы.

Вода при ультразвуковой очистке применяется, как правило, дистиллированная. Однако при изготовлении полупроводниковых приборов промывка и дистиллированной водой не всегда дает удовлетворительный результат.

Широкое использование при ультразвуковой очистке получили водные растворы щелочей и поверхностно-активных веществ. К мощным растворам предъявляют следующие требования: наличие хорошей смачиваемости загрязнений и очищаемой поверхности; разрушение связи загрязнений с поверхностью и перевод загрязнений в раствор; стабилизация загрязнений в мощном растворе с целью предотвращения их ресорбции; индифферентность по отношению к материалу очищаемых изделий.

При ультразвуковой очистке применяют также водные растворы едких щелочей (например, едкий натр  $\text{NaOH}$ ), карбонаты (кальцированная сода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), фосфаты (тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , пирофосфат натрия  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , гексаметафосфат натрия  $(\text{NaPO}_3)_6$ ), силикаты (жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ). Едкие щелочи используются при очистке черных металлов и при необходимости произвести подтравление загрязнений. Для этих целей, но при меньшем загрязнении используют карбонаты. Фосфаты обладают хорошим эмульгирующим действием и способны смягчать воду. Жидкое мыло дает хорошие результаты при очистке алюминия. Щелочные растворы применяют как самостоятельно, так и с добавлением поверхностно-активных веществ, которые способны понижать поверхностное натяжение жидкости, благодаря чему моющий раст-

22

вор получает способность хорошо смачивать поверхность очищаемых изделий и свободно проникать в узкие щели. К числу поверхностно-активных веществ относятся, например, сульфанол, типол, порошок "Новость" и др. Составы наиболее распространенных водных моющих растворов, применяемых при ультразвуковой очистке, а также основные рекомендации по их использованию представлены в табл.2.1.

Очистка изделий в органических растворителях основана на растворении удаляемых продуктов. Обладая низким поверхностным натяжением

Таблица 2.1

Состав некоторых водных моющих растворов

Компоненты	Загрязнения	Материал очищаемых деталей	Температура, град. С	Содержание, г/м <sup>3</sup>
Едкий натр Сода кальцированная Жидкое стекло Нитрид натрия Неионогенное ПАВ Сульфанол	Обильные масляные и жировые загрязнения, консервационные смазки	Сталь	60...80	20...30 10...20 20 5...10 5 0,5...1,5
Тринатрийфосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	Полировочные пасты, консервационные смазки, минеральные масла и жировые пленки	Сталь, медные сплавы перед гальваническим никелированием	55...80	20...35 3 0,5...1,5
Сода кальцированная Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	То же	То же	55...80	15...20 8...10 3
Дистиллированная вода	Пыль, вода	Полимерные пленки	45...55	-

ем, органические растворители проникают в узкие щели и отверстия, растворяя находящиеся там загрязнения. Действие ультразвука так же, как и повышение температуры жидкости, сказывается на ускорении процесса растворения загрязнений. Типичным представителем растворителей является бензин. Кроме него, широко используют трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, различные фреоны. Типы органических растворителей, применяемых при ультразвуковой очистке, их назначение и рекомендации по применению представлены в табл.2.2.

Действие ультразвука приводит к нарушению пограничного слоя растворителя, транспортированию пограничного слоя растворителя к очищаемой поверхности и эвакуации отделившихся частиц загрязнений на зоны очистки. Растворитель, внедряясь в глубь загрязнений, нарушает их однородность. Это создает условия для более интенсивного растворения загрязнений благодаря увеличению площади соприкосновения растворителя с растворяемым веществом. Применение органических растворителей для удаления нерастворимых пленок и частиц, прочно связанных с материалом изделий, когда процесс очистки протекает преимущественно за счет кавитационных явлений, нецелесообразно. Очистку в органических растворителях применяют, как правило, в тех случаях, когда щелочные растворы не приемлемы по причине коррозионного или кавитационного разрушения материала, образования пассивной пленки, длительности процесса сушки и т.п.

Очистка в эмульсионных составах представляет собой попытку скомбинировать действие органического растворителя с действием водного раствора. Эмульсионные составы используют, если полная очистка изделий в органическом растворителе (например, при наличии на поверхности изделий загрязнений жирового и неорганического происхождения) не представляется возможной. В состав эмульсии вместо воды может быть введен раствор солей щелочных металлов. После эмульсионной очистки производится ультразвуковая очистка водой или растворителем.

Оксидные пленки (продукты коррозии), образующиеся на поверхности изделий, всегда препятствуют механической, химической и другой обработке и должны быть удалены с их поверхности. Удаление пленок осуществляется травлением их с помощью кислотных растворов. Ультразвуковые колебания могут быть сгенерированы непосредственно в травильной ванне или использованы для удаления шлама после травления изделий.



Таблица 2.2

Органические растворители, применяемые при ультразвуковой очистке

Растворитель	Удаляемые загрязнения	Материал очищаемых деталей	Температура, град. С	Содержание, г/м <sup>3</sup>
Трихлорэтилен	Минеральные масла, парафин, смолы, пасты, каучук	Все металлы, кроме алюминия	5...70	0,01
Четыреххлористый углерод	Минеральные масла парафин, смолы, воск, пасты	Сталь	5...70	0,02
Венвин	Минеральные масла, парафин, пасты	Все металлы, кроме цинка, пластмассы	20	0,1... 0,3
Метанол	Канифоль и канифольные флосы, смолы, жиры, масла	То же	20	0,05
Этанол	То же	То же	20	0,1
Ацетон	Канифоль, краски, наклеенные смолы, жиры, масла (животные и растительные)	Все металлы	20	0,2

Содержание отчета (объем 5...7 с.)

1. Титульный лист, содержание, цель работы.
2. Назначение и область использования ультразвукового способа очистки изделий.
3. Обоснование технологического процесса очистки изделия, указанного преподавателем.
4. Описание режимов работы ультразвуковой установки, использованных при очистке изделия.
5. Оценка качества очистки поверхности изделия на основе визуального контроля.
6. Заключение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

*ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ*

Цель работы - ознакомление с конструкциями ультразвуковых установок для очистки изделий и приобретение первоначальных навыков их эксплуатации.

Задачи работы - изучить конструкцию технологических установок для ультразвуковой очистки изделий и их основных частей.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкции ультразвуковых установок очистки изделий.
2. Ознакомиться с конструкцией ультразвуковых преобразователей.
3. Изучить техническую документацию на ультразвуковые установки.
4. Произвести включение одной из установок (по указанию преподавателя) и осуществить настройку генератора по частоте для конкретных режимов очистки.
5. Провести очистку образцов от загрязнения.

### Общие сведения

Ультразвуковые установки широко используются в промышленности для очистки поверхностей изделий от различных загрязнений в условиях крупносерийного и массового производства. Особо эффективна такая очистка поверхности перед нанесением на нее различных покрытий, поскольку адгезия покрытия практически всегда зависит от присутствия на обрабатываемой поверхности жировых и пылевых пленок. Ультразвуковая очистка осуществляется в ваннах ультразвуковых установок, состоящих из одного или нескольких ультразвуковых технологических устройств, генератора и источника ультразвука.

По назначению, характеру использования и конструктивным особенностям ультразвуковые установки могут быть разделены на четыре основные группы: универсальные малогабаритные установки, однопозиционные промышленные ванны и установки, многопозиционные промышленные установки, промышленные автоматизированные агрегаты. Универсальные малогабаритные установки имеют емкость ванн от 0,5 до 100 литров, диапазон мощностей генераторов — от 0,015 до 1,6 кВт. Однопозиционные промышленные установки имеют большую мощность (до 10 кВт) и предназначены для выполнения наиболее простых технологических процессов, состоящих из одной операции. Многопозиционные установки применяют для очистки небольших партий изделий различных конфигураций при их значительной номенклатуре. Мощность таких установок — от 0,1 до 10 кВт. В них кроме ультразвуковых волн предусмотрены технологические позиции для реализации вспомогательных операций, сопутствующих ультразвуковой очистке. Промышленные автоматизированные агрегаты имеют устройства автоматического переноса изделий с позиции на позицию. Мощность таких агрегатов может достигать 200 кВт. По назначению они делятся на специализированные (предназначенные для очистки однотипных штучных изделий, проволоки, ленты и т.д.) и универсальные (для очистки разнообразных изделий, загруженных в тару).

Все выпускаемое ультразвуковое оборудование для очистки, как правило, работает в диапазоне низких ультразвуковых частот (16...44 кГц), что обеспечивает высокую эффективность ультразвуковой очистки.

Основными конструктивными элементами технологических установок ультразвуковой очистки изделий (рис.3.1) являются ванна 1 с установленным в ней ультразвуковым преобразователем 2 и ультразвуковой генератор 3.

### Ультразвуковые преобразователи

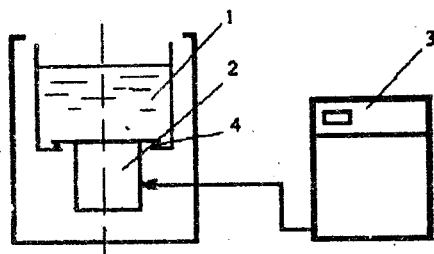


Рис.3.1. Схема ультразвуковой установки для очистки изделий

Наибольшее применение в установках для очистки нашли низкочастотные ультразвуковые преобразователи, создающие развитое кавитационное поле в жидкости. В зависимости от характера загрязнений и вида очищаемых изделий удельная акустическая мощность ультразвуковых преобразователей для очистки находится в пределах

от  $0,00005$  до  $0,001$  Вт/м<sup>2</sup>. Мощные акустические поля в ультразвуковых ваннах очистки создают при помощи магнитоэлектрических преобразователей.

Магнитоэлектрический эффект заключается в том, что ферромагнитное тело при намагничивании деформируется. В ферромагнетике возможны два вида магнитоэлектричества: линейная магнитоэлектричность, при которой происходит изменение геометрических размеров тела в направлении приложенного поля, и объемная магнитоэлектричность, при которой геометрические размеры тела изменяются во всех направлениях. В магнитоэлектрических преобразователях используется в основном линейная магнитоэлектричность. Магнитоэлектрический эффект различен у различных металлов и сплавов. Сравнительно высокой магнитоэлектричностью обладают никель и пермдюр.

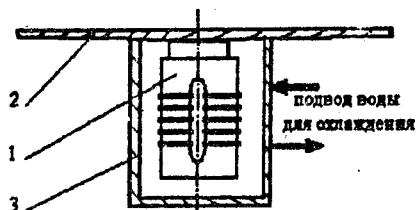


Рис.3.2. Магнитоэлектрический преобразователь

Конструкция магнитоэлектрического преобразователя показана на рис. 3.2. Пакет магнитоэлектрического преобразователя 1 представляет собой сердечник из тонких пластин, на котором размещена обмотка для возбуждения в нем переменного магнитного поля. При подаче тока возникающее внешнее маг-

нитное поле воздействует на ферромагнитный сердечник. Под действием внешнего магнитного поля домены ферромагнитного вещества ориентиру-

ются, что приводит к деформации сердечника. Высокочастотные изменения внешнего магнитного поля приводят к созданию магнитоэлектрическим преобразователем 1 ультразвуковых колебаний. Эти колебания передаются на жестко связанную с сердечником 1 пластину 2, которая устанавливается через резиновое уплотнительное кольцо (пов.4 на рис.3.1) на дне ультразвуковой ванны.

Пластина 2 контактирует с жидкостью и распространяет в ней ультразвуковые колебания. Для предотвращения перегрева сердечника 1 он помещен в специальную рубашку, через которую в процессе работы протекает охлаждающая вода.

Принцип работы пьезоэлектрических преобразователей основан на использовании обратного пьезоэлектрического эффекта, состоящего в появлении деформации пьезоэлектрических кристаллов под действием электрического поля. В кристалле, помещенном в электрическое поле, происходит деформация кристаллической решетки в направлении поля. Кривая зависимости поляризации от приложенного поля имеет вид петли диэлектрического гистерезиса.

В качестве материала пьезопреобразователей в настоящее время широко используется пьезокерамика, обладающая значительной диэлектрической проницаемостью, сравнительно большой электрической и механической прочностью. Пьезоэлектрические преобразователи могут работать как на низких (от 18 до 60 кГц), так и на высоких (от 300 до 1500 кГц) ультразвуковых частотах.

Конструкция низкочастотного ультразвукового преобразователя представлена на рис.3.3. Преобразователь состоит из двух пьезоэлектрических пластин 1, размещенных между излучающей накладкой 2 из дюралюминия Д16 и отражающей накладкой 3 из стали 45, прокладок 4 толщиной 0,2...0,3 мм из мягкой фольги и стягивающего болта 5. Передача ультразвуковых колебаний в жидкость осуществляется через излучающую накладку, акустическая прозрачность которой достигается в случаях, когда толщина пластины равна или кратна половине длины ультразвуковой волны.

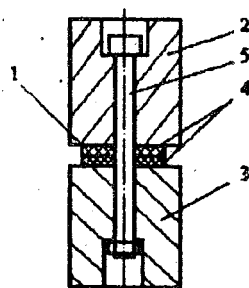


Рис.3.3. Пьезоэлектрический преобразователь.

### Ультразвуковые установки

В качестве примеров рассмотрим две ультразвуковые установки с преобразователями различных типов и с разным числом технологических ванн.

Ультразвуковая установка типа УЗУ-0,25 предназначена для очистки мелких изделий. Она позволяет получать ультразвуковую частоту колебаний около 18 кГц и имеет ванну размером 560\*290\*300 мм. Установка состоит из ультразвукового генератора и ванны, конструктивно выполненной из двух отсеков: отсека ультразвуковой очистки и промывочного отсека. В дно отсека ультразвуковой очистки вмонтированы три пакетных преобразователя. Пакет преобразователя состоит из двух пьезоэлектрических пластин из материала ЦТС-19, двух частотно понижающих накладок (излучающей накладки из дюралюминия Д16, отражающей накладки из стали 45) и центрального болта из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, головка которого является излучающим элементом преобразователя.

Соединение элементов преобразователя с ванной осуществляется посредством центрального болта из нержавеющей стали, проходящего через отверстия в дне ванны. Улучшение контакта между элементами преобразователя достигается с помощью мягких медных никелированных прокладок толщиной 0,2...0,3 мм. Ультразвуковая ванна изготовлена из нержавеющей стали толщиной 1,0 мм. На кожухе ванны расположены штуцер, ручки кранов, клемма для заземления ванны и разъем для соединения с генератором.

Ультразвуковая установка УЗВ-15М предназначена для очистки изделий средних размеров. Она состоит из ультразвукового генератора и ультразвуковой ванны и позволяет производить очистку при частоте от 18 до 24 кГц. Ванна снабжена магнитострикционным преобразователем, установленным на ее дне. Ванна выполнена из нержавеющей стали и установлена в сварной корпус. Для звукоизоляции ванна покрыта снаружи поролоном. К преобразователю подведена охлаждающая вода. Дополнительные сведения об устройстве и эксплуатации приведены в технической документации на установку УЗУ-15М.

Содержание отчета (объем 5...7 с.)

1. Титульный лист, содержание, цель работы.
2. Указание области использования ультразвуковых установок для очистки изделий. Их классификация.
3. Схема ультразвукового преобразователя с указанием размеров основных элементов.
4. Описание работы преобразователя и порядка настройки и работы одной из ультразвуковых установок (по указанию преподавателя), согласно соответствующей инструкции по эксплуатации (см. техническую документацию на установку).
5. Заключение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОД НАПЫЛЕНИЕ

Цель работы - ознакомление с процессами и оборудованием для вакуумной очистки поверхностей, подлежащих вакуумному напылению.

Задачи работы - изучить технологические процессы вакуумной очистки и получить первоначальные навыки работы с устройствами очистки вакуумной установки ВУ-1Б.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с назначением, физическими основами и технологией вакуумной очистки поверхностей.
2. Изучить конструкцию, порядок работы и правила выбора технологических режимов работы устройства очистки в тлеющем разряде вакуумной установки ВУ-1Б (см. "Техническая документация на установку ВУ-1Б").
3. Изучить конструкцию устройства ионной очистки установки ВУ-1Б. (изучать по натурному образцу под наблюдением преподавателя).
4. Произвести очистку образцов в тлеющем разряде и ионным пучком, оценить качество очистки, сравнив очищенный и контрольный образцы.

### Общие сведения

Важнейшим параметром любого покрытия является его адгезия. При величине адгезии, на один атом не превышающей 0.4 эВ, у конденсированных атомов не наблюдается разрушения электронных оболочек и коллективизации электронов, а силы, удерживающие атом на поверхности, оказываются типа сил Ван-дер-Вальса. Такие взаимодействия называются физической сорбцией. При больших энергиях происходит перераспределение электронов, обуславливающее хемосорбцию. Ещё одним видом взаимодействия между инородными атомами является взаимодействие с образованием новой фазы.

Экспериментальные исследования адгезии покрытий позволили сделать следующие выводы. Величина адгезии зависит от материалов покрытия и основы, причем высокая адгезия наблюдается у одноименных материалов и материалов, активных по отношению к кислороду. Решающим фактором для получения покрытий с воспроизводимыми свойствами и высокой адгезией является чистота (вплоть до атомарно чистой) поверхности основы. Практически все процессы, ведущие к активации поверхности перед напылением и в процессе напыления, улучшают адгезию покрытия. Достижение высокой адгезии связано с сильной хемосорбцией, возникающей при формировании промежуточного слоя, допускающего либо непрерывный переход из решетки покрытия в решетку основы, либо образование новой, непрерывно распределенной фазы вещества на их общей границе.

В настоящее время известно много методов очистки поверхности перед напылением. Опыт показал, что применение какого-либо одного метода не позволяет получить стабильные результаты при нанесении покрытий вакуумным методом.

Так, химические и механические методы, успешно применяемые для очистки больших загрязнений, не пригодны для удаления адсорбционных газов с поверхности изделий и устройств, находящихся в вакуумной камере. В процессе напыления адсорбированный газ из-за термической активации начинает интенсивно испаряться с различных поверхностей внутри камеры и изменяет процентный состав газов. На свойства же конденсированных пленок решающее влияние оказывает не абсолютное значение давления остаточных газов, а величина парциальных давлений химически активных газов таких, как кислород, вода, углеводородные радикалы.



После механической очистки, промывки, очистки химическими растворителями и сушки детали возникает необходимость в ее очистке от адсорбированных слоев и в уменьшении процентного содержания активированных газов в атмосфере камеры. Исследования показали, что для достижения этой цели наиболее эффективным из традиционных методов является очищающее действие тлеющего разряда. Кроме того, очистка основы в тлеющем разряде позволяет получать покрытия с высокими адгезионными свойствами.

Перед загрузкой деталей в вакуумную камеру полезно их обезжиривать нагревом, особенно при загрузке больших партий деталей. Несмотря на эффективность очистки основы тлеющим разрядом этот процесс в вакуумной технологии носит предварительный характер, так как высокая адгезия покрытия при плазменном напылении в вакууме достигается в основном процессом ионного травления (ионной очистки) ионами того материала, который будет использован для нанесения покрытия.

Операция ионного травления заключается в бомбардировке очищаемой поверхности ионами с энергией до 1...2 кэВ и в создании атомарно чистой поверхности основы, в легировании ее атомами того материала, который будет использован для нанесения покрытия, в создании дефектного поверхностного слоя с большим количеством активных центров сорбции и предварительном нагреве поверхности перед напылением. Рассмотрим условия, обеспечивающие наибольшую эффективность процесса ионного травления.

Известно, что на поверхности материала существуют насыщенные газом поверхностные слои толщиной  $h_{загр}$ . В частности эти слои могут быть окисными пленками, имеющими толщину  $h_{загр} = (0,03...0,50)$  мкм. Следовательно, на первом этапе ионного травления осуществляется удаление этого поверхностного слоя.

Ионное травление происходит при одновременном протекании процессов распыления атомов с поверхности, попадания молекул остаточного газа с плотностью  $j_k$  на поверхность основы из объема вакуумной камеры и поступления атомов загрязнений с плотностью  $j_d$  из объема материала детали за счет стравливания поверхности и диффузии. Режим эффективной динамической очистки с движением границы в глубь материала достигается при выполнении условия:

$$j_{расп} > j_{загр} = j_d + j_k .$$

где  $J_{расп}$  - плотность распыления частиц с поверхности.

Многочисленные исследования показали, что среди различных факторов, влияющих на процесс образования покрытия, существенным является температура основы. При некоторых характерных температурах происходят качественные изменения механизма и кинетики образования покрытий, что приводит к резким изменениям структурных и физических свойств получаемых конденсатов.

При недостаточной очистке поверхности основы в тлеющем разряде в процессе ионного травления на поверхности напыления возникают микроаряды, которые перегружают высоковольтный выпрямитель и за счет схемы гашения разрядов происходит его отключение. Это приводит к тому, что ионы попадают на неочищенную поверхность с малой энергией и вместо ее распыления осаждаются на ней, образуя покрытие. Таким образом происходит замуровывание загрязнений на поверхности основы, а это ведет к существенному ухудшению адгезии покрытий. С целью устранения подобного явления увеличивают время травления поверхности основы.

#### Содержание отчета (объем 5...6 с.)

1. Титульный лист, содержание, цель работы.
2. Краткое изложение назначения и физической сущности процессов вакуумной очистки.
3. Составление принципиальной схемы устройства очистки в тлеющем разряде и описание его работы.
4. Составление принципиальной схемы устройства ионной очистки.
5. Описание алгоритма работы установки в режимах вакуумной очистки.
6. Заключение.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

#### ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ВУ-1В

Цель работы - ознакомление с принципами построения и конструкцией вакуумной установки ВУ-1В и изучение технологического процесса напыления.

Задачи работы - изучить устройство основных подсистем вакуумной установки ВУ-1Б, получить навыки работы на вакуумной установке.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию вакуумной установки ВУ-1Б и рациональные области ее использования.

2. Провести один цикл работы установки, согласно алгоритму, изложенному далее и в инструкции по эксплуатации установки ВУ-1Б. Отметить режимы напыления.

3. Изучить кинематическую схему технологического приспособления, использованного в установке.

Общие сведения

Вакуумная установка ВУ-1Б предназначена для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий толщиной от 4 до 20 мкм способом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой электропроводного тугоплавкого материала - титана, а также его соединений с газами (нитриды, карбиды). Установка применяется в промышленности, в основном для упрочнения режущего инструмента, но может быть использована и для нанесения декоративных и технологических покрытий. Общий вид установки показан на рис. 5.1. Установка

состоит из станины 1, и установленной на ней вакуумной камеры 2. На крышке камеры смонтирован испаритель 3. На станине 1 также смонтирован высоковакуумный паромасляный насос 4. Для создания низкого вакуума используется форвакуумный агрегат 5. Сварочный выпрямитель 6 служит для получения дуги на испарителе. Управление установкой осу-

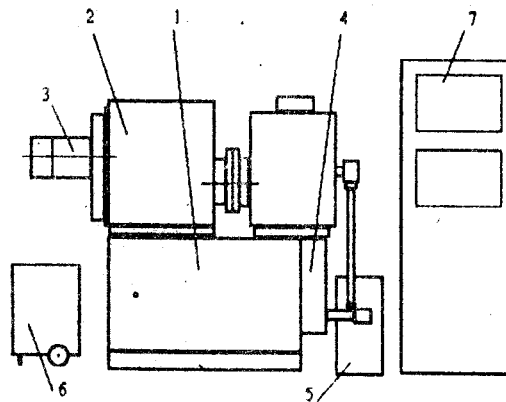


Рис. 5.1. Вакуумная установка ВУ-1Б

ществляется от стойки управления 7.

Основание установки представляет собой сварную станину, внутри которой располагаются высоковольтный трансформатор, блок выпрямителей, электродвигатель и редуктор. Станина с трех сторон закрывается дверками. На станине расположена вакуумная камера, которая соединяется с высоковакуумным затвором. Вакуумная камера имеет герметично закрывающуюся дверь со специальным замком.

На вакуумной камере установлен микропереключатель, исключающий возможность подачи высокого напряжения в камеру при открытой двери. По камере и двери циркулирует вода для охлаждения или нагрева. На двери имеются смотровое окно и испаритель. Расположение испарителя было изменено в процессе модернизации установки.

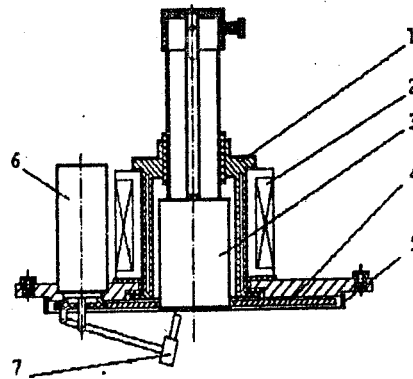


Рис. 5.2. Конструкция испарителя

Испаритель (рис.5.2) состоит из сварного корпуса 1, в котором находится полость для охлаждения водой магнитной катушки 2, обеспечивающей равномерное выгорание катода 3; дополнительного анода 4; электростатического экрана 5, изолированного как от катода, так и от дополнительного анода. 5 Оптимальный зазор между катодом и дополнительным анодом 0,8... 1,0 мм.

По мере выгорания лунки на катоде он снимается и подрезается. Катод охлаждается водой. Для получения плазменного облачка

испаритель оснащен поджигающим устройством 6, представляющим собой электромагнитное реле, якорь которого в виде штока, двигаясь возвратно-поступательно, перемещает молибденовый пруток 7, закорачивающий промежуток анод-катод.

Высоковакуумный затвор (рис.5.3), использованный в установке, представляет собой устройство, позволяющее изолировать вакуумную камеру от диффузионного насоса перед разгерметизацией камеры. Корпус затвора изготовлен из нержавеющей стали и соединен с вакуумной камерой. К нижнему фланцу затвора 1 крепится водяная ловушка и диффузионный насос. Резиновая вакуумная прокладка затвора закрепляется

в тарелке 2 с помощью кольца. Тарелка 2 монтируется на фланце сифонного узла 3, представляющего собой сварное соединение фланца 4, трех сифонов и направляющей шлицевой втулки 5. По шлицам втулки 5 перемещается шток 6, который получает возвратно-поступательное движение при вращении гайки 7.

Сифонный узел крепится к крышке корпуса затвора болтами через вакуумную уплотнительную прокладку. Электромеханический привод допускает дистанционное или ручное открытие-закрытие затвора.

Дистанционное управление (привод затвора от электродвигателя) предназначено для откачки вакуумной системы в ручном или полуавтоматическом режимах работы установки.

Ручное управление затвором применяется при аварийных ситуациях в случае обесточивания вакуумной установки.

Для обеспечения нормальной работы установки в этих режимах в конструкции использована фрикционная муфта, исключающая повреждение элементов затвора при закрытии его электродвигателем.

#### Режимы работы установки

Установка может работать в автоматическом или ручном режимах работы. Для работы в автоматическом режиме откачки дверка камеры должна быть закрыта. Также должен быть закрыт вакуумный затвор. Откачка начинается с выдержкой времени после нажатия кнопки "Автоматическая откачка" на пульте управления. При этом срабатывает электромагнит форвакуумного клапана и запускается двигатель М1-1 форвакуумного агрегата АВР. Начинается откачка камеры. При достижении давления в насосе  $1 \cdot 10^3$  Па (7,5 мм рт. ст.) включается двигатель М1-2 агрегата АВР.

После достижения давления в насосе  $8 \cdot 10^{-3}$  Па ( $6 \cdot 10^{-5}$  мм

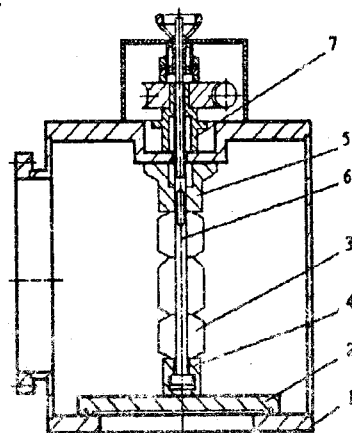


Рис. 5.3. Высоковакуумный затвор

рт.ст.) форвакуумный клапан закрывается и через некоторое время включается байпасный клапан и отключается двигатель М1-2. После этого начинается подъем затвора, и камера откачивается высоковакуумным насосом до давления, установленного на задатчике-потенциометре. При работе установки в ручном режиме включение и выключение клапанов осуществляется от кнопок с пульта управления вручную. Порядок откачки аналогичен. Охлаждение уалов и агрегатов установки начинается при закрытии дверцы вакуумной камеры.

При напылении на электромагнит поджигающего устройства подаются импульсы частотой 50 Гц с амплитудой 36 В. Якорь перемещает поджигающий электрод, соединенный с анодом, до момента касания его с катодом. Значение тока поджига находится в пределах 12...20 А. По окончании импульса электрод отходит от катода, образуя плазменный ступок, который возбуждает дугу. Она распространяется в вакууме по объему рабочей камеры. После зажигания дуги в камере падение напряжения на дуге составляет около 20...27 В. Значение тока дуги контролируется по амперметру, установленному в стойке управления. При ионной бомбардировке на подложку подается высокое напряжение до 600 В. В режиме осаждения покрытия на подложку подается опорное напряжение 20...150 В.

Электродуговой испаритель снабжен блоком стабилизации дуги. Для обеспечения равномерного выгорания катода использована катушка подмагничивания, установленная в испарителе.

#### Содержание отчета (объем 4...5 с.)

1. Титульный лист, содержание, цель работы.
2. Указать назначение и основные технические характеристики вакуумной установки ВУ-1В.
3. Представить структурную схему установки и ее описание.
4. Описать основные режимы работы установки и алгоритм управления ею.
5. Описать назначение технологического приспособления и изобразить его кинематическую схему.
6. Заключение.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ВУ-1Б

Цель работы - ознакомление с конструкцией вакуумной системы и ее элементами.

Задача работы - изучить схемные и конструктивные решения вакуумной системы установки ВУ-1Б.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с вакуумной схемой установки.
  2. Изучить конструкции основных агрегатов, входящих в схему.
  3. Измерить время работы отдельных агрегатов вакуумной системы.
- Составить циклограмму работы.

#### Общие сведения

Вакуумная система установки предназначена для создания и поддержки вакуума, необходимого для выполнения технологического процесса напыления в рабочей камере установки.

Вакуумная схема установки ВУ-1Б представлена на рис.6.1. Для откачки вакуумной камеры используются диффузионный паромасляный насос ND типа Н 400/700 и форвакуумный агрегат АВР-50, объединяющий два насоса: ротационный пластинчатый насос .NL и двухроторный вакуумный насос с обкатываемыми профилями NZ. Для подключения форвакуумного агрегата к вакуумной камере и к паромасленому насосу использованы вакуумные клапана с электрическим управлением VP1 и VP2. Подключение паромасленого насоса к вакуумной камере осуществляется

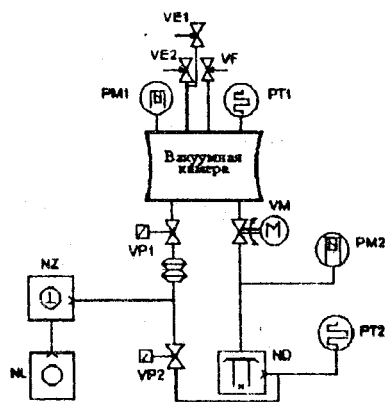


Рис.6.1. Схема вакуумная

через высоковакуумный затвор VM. Для подачи в вакуумную камеру технологических газов использованы два нагнетателя VE1 и VE2. Подача воздуха в камеру происходит через нагнетатель VF. Для измерения низкого вакуума использованы датчики 8790, а высокого вакуума - датчики-преобразователи ПММ32-1.

Ротационный пластинчатый насос (рис.6.2), входящий в состав форвакуумного агрегата АВР-50, содержит цилиндрический корпус 7 с впускным 4 и выпускным 3 патрубками и эксцентрично расположенный ротор 6, в пазах которого установлены пластины 5.

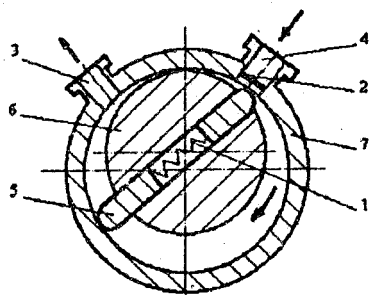


Рис.6.2. Схема пластинчато-роторного насоса

Под действием центробежной силы пластины прижимаются к корпусу, обеспечивая изменение объема рабочей камеры насоса. Насос работает в масляной ванне, обеспечивающей герметизацию соединений насоса и снижение потерь на трение. Для предотвращения заполнения маслом рабочей камеры служит клапан 2. Начальное прижатие пластин к поверхности корпуса осуществляется пружиной 1.

Второй насос, входящий в состав форвакуумного агрегата, является ротационным с обкатываемыми профилями. Насос (рис.6.3) имеет два ротора с лемнискатными профилями.

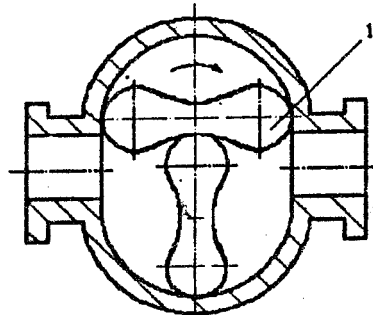


Рис.6.3. Схема двухроторного насоса с лемнискатными профилями

За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает объем газа из области высокого вакуума в область предварительного разрежения.

Для создания высокого разрежения в вакуумной камере установки использован пароструйный диффузионный насос. Принцип действия насоса основан на захвате молекул откачиваемого газа струей пара и их последующей откачки при конденсации пара.

Рассмотрим конструкцию пароструйного

диффузионного насоса (рис.6.4). Простейший диффузионный насос состоит из кипятильника 1, диффузионного сопла 2, закрепленного на



паропроводе 6, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков 3 и 5. Пары рабочей жидкости (в данной конструкции масла) из кипятильника проходят по паропроводу через зонтичное сопло и конденсируются на стенках насоса, охлаждаемых холодильником. За время движения пара от конца сопла до стенок насоса в струю пара диффундирует откачиваемый газ. После конденсации образовавшейся парогазовой смеси выделившийся газ откачивается через выпускной патрубок насосом предварительного разрежения, а сконденсированный пар стекает по стенкам

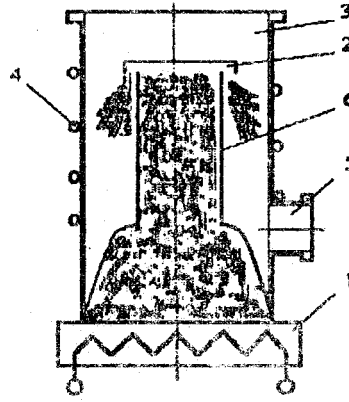


Рис. 6.4. Схема пароструйного диффузионного насоса

насоса в кипятильник через зазор между паропроводом и корпусом насоса. Влияние зазора и угла наклона сопла существенно сказывается на производительности насоса. При превышении зазором своего оптимального значения уменьшается скорость струи у стенок насоса, что приводит к увеличению обратного потока. К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются следующие требования:

- минимальная упругость паров при комнатной температуре и максимальной при рабочей температуре в кипятильнике;
- стойкость к разложению при нагревании;
- минимальная способность растворять газы;
- химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и по отношению к материалам насоса;
- малая теплота парообразования.

В рассматриваемой установке в качестве рабочей жидкости использовано минеральное масло ВМ-5. Для создания дозированного потока газа и поддержания рабочего режима в конструкции использован дистанционно управляемый игольчатый натекатель (рис. 6.5). Натекание газа регулируется перемещением тонкой стальной конической иглы относительно отверстия бронзового седла 1. Перемещение иглы в отверстие в осевом направлении осуществляется вращением маховичка 2 и связанного с ним ходового винта 3. Для вакуумного уплотнения между корпусом и штоком применена втулка, изготовленная из фторопласта 4,

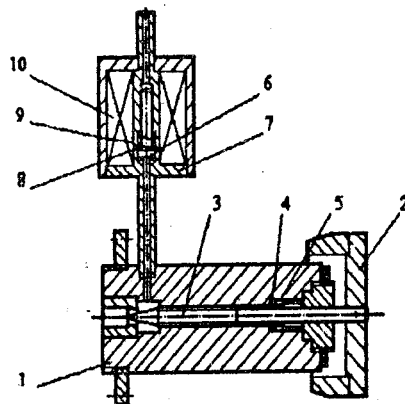


Рис. 6.5. Нагреватель газа

которая прижимается к штоку 3 резиновыми кольцами 5.

Плавное регулирование газового потока достигается изменением зазора между иглой и седлом.

Дистанционный клапан 6 предназначен для напуска и отсекания потока газа в зависимости от технологического процесса. Фланец клапана 7 имеет отверстие диаметром 3 мм, которое уплотняется вакуумной резиной 8, установленной на штоке. На корпусе клапана 9 установлена катушка 10. При подаче сигнала срабатывает электромагнит и клапан открывается. Происходит напуск газа в камеру.

Содержание отчета (объем 5...7 с.)

1. Титульный лист, содержание, цель работы.
2. Вакуумная схема установки ВУ-1В, ее описание.
3. Циклограмма работы вакуумной системы с указанием времени включения агрегатов.
4. Конструктивная схема одного из элементов вакуумной системы установки (по указанию преподавателя) и ее описание.
5. Заключение.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Методы и технология нанесения покрытий, их назначение. Принципы работы оборудования для нанесения покрытий.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Технологические основы ультразвуковой очистки.....	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Технологические установки для ультразвуковой очистки.....	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. Подготовка поверхности деталей под напыление.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. Вакуумная установка ВУ-1В.....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Вакуумная система установки для нанесения покрытий ВУ-1В.....	39