

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ремонта тракторов, автомобилей  
и сельскохозяйственных машин

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ  
И УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА НАНЕСЕНИЕМ  
ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

Минск  
БГАТУ  
2010

УДК 631.3.004.67(07)  
ББК 40.72я7  
В 78

*Рекомендовано научно-методическим советом факультета  
«Технический сервис в АПК».  
Протокол № 5 от 10 июня 2009 г.*

Составители:  
кандидат технических наук *В. А. Лойко*,  
кандидат технических наук, профессор *В. П. Миклуш*,  
кандидат экономических наук, доцент *Г. И. Анискович*

Рецензенты:  
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» БНТУ,  
доктор технических наук, профессор *В. К. Шелег*;  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов»  
БГАТУ *А. А. Андрушевич*

В78 **Восстановление деталей сельскохозяйственной техни-  
ки и упрочнение режущего инструмента нанесением ва-  
куумно-плазменных покрытий** : методические указания к  
лабораторной работе / сост. : В. А. Лойко, В. П. Миклуш,  
Г. И. Анискович. – Минск : БГАТУ, 2010. – 40 с.  
ISBN 978-985-519-228-3.

Методические указания содержат теоретические и справочно-методические материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Технология ремонтно-обслуживающего производства». В них приводятся контрольные вопросы, формы отчетности и рекомендуемая литература.

Предназначены для студентов специальностей 1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве и 1-74 06 06 Материально-техническое обеспечение в АПК.

УДК 631.3.004.67(07)  
ББК 40.72я7

ISBN 978-985-519-228-3

© БГАТУ, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Цель и задачи работы.....	8
2. Задание на выполнение работы.....	8
3. Оснащение рабочего места.....	9
4. Характеристика оборудования для нанесения вакуумно-плазменных покрытий.....	9
5. Технологический процесс нанесения вакуумно-плазменных покрытий.....	13
5.1. Физическо-технологические основы вакуумно-плазменной технологии нанесения покрытий.....	16
5.2. Технологические особенности вакуумно-плазменного нанесения покрытий.....	19
6. Предлагаемый технологический маршрут нанесения покрытия методом плазменно-вакуумного напыления.....	24
7. Меры безопасности во время работы.....	26
8. Порядок выполнения работы.....	27
9. Отчет о выполнении работы.....	31
10. Вопросы для самоконтроля.....	32
ЛИТЕРАТУРА.....	33
Приложение 1.....	34
Приложение 2.....	35
Приложение 3.....	36
Приложение 4.....	37
Приложение 5.....	38

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов плазменной технологии высоких энергий дает дополнительные возможности получения покрытий тонких пленок, широко применяемых в настоящее время в различных областях техники, в том числе и в ремонтно-обслуживающем производстве. Впервые технология вакуумно-плазменного напыления покрытий была разработана в 60–70 годах прошлого столетия физиками-ядерщиками Харьковского физико-технического института (Украина) в процессе экспериментов по коммутации сильноточных разрядов и получила фирменное название **КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой в контролируемом вакууме)**. Ими же была разработана и изготовлена первая вакуумно-плазменная установка для нанесения покрытий на режущий инструмент, получившая название «Булат». Покрытие при вакуумно-плазменном напылении формируется из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или ионизированном состоянии. Этот поток частиц получают распылением материала посредством воздействия на него различными энергетическими источниками. Вакуумное конденсационное напыление проводят в жестких герметичных камерах при давлении  $1, 33 \cdot 10^{-3} \dots 13,3$  Па. Благодаря этому обеспечиваются необходимая длина свободного пробега напыляемых частиц (без столкновений между собой и с атомами газов остаточной атмосферы) и защита материала от взаимодействия с атмосферными газами. В общем случае движущей силой переноса частиц в направлении к поверхности напыления является разность парциальных давлений паровой фазы. Наиболее высокие давления пара, достигающие 133 Па и более, наблюдаются вблизи поверхности распыления (испарения). Это и обуславливает перемещение частиц в направлении напыляемого изделия, где парциальное давление паров минимально. Ионизированные частицы обладают большей энергией, что обеспечивает получение покрытий высокого качества. Метод вакуумно-плазменного напыления позволяет наносить покрытия не только из металлов (в том числе тугоплавких), сплавов, но и получать покрытия из высокотвердых карбидов и нитридов металлов для упрочнения деталей и режущего инструмента ремонтного производства. Синтез этих покрытий происходит при конденсации потока металлической плазмы в атмосфере соответствующего реактивного газа (азота, метана или ацетилена). Покрытия, наносимые вакуум-

но-плазменными методами, характеризуются высокой адгезией к основе; получением качественного покрытия при относительно низкой температуре, без разупрочнения и последующей термической и механической обработок. Состав и свойства покрытий можно изменять в широких пределах, наносить многослойные покрытия. Покрытия лишены крупных дефектов, вызывающих начальное разрушение в процессе износа. Их можно наносить на **окончательно обработанные поверхности** деталей и инструмента без ухудшения геометрического качества поверхности. Микротвердость вакуумно-плазменных покрытий на деталях и режущем инструменте может регулироваться параметрами технологического процесса от твердости чистых металлов до 10 – 36 ГПа, а толщина наносимых слоев – от 1 до 50 мкм. Следует также отметить безопасность вакуумно-плазменного напыления для окружающей среды, так как процесс нанесения реализуется в вакуумной камере, не используются агрессивные и токсичные для человека и окружающей среды вещества.

#### Основные области применения вакуумно-плазменных покрытий

1. Восстановление посадок и небольших износов линейных размеров охватываемых деталей.
2. Упрочнение деталей автотракторной техники и сельскохозяйственных машин.
3. Защита от износа и коррозии поверхностей ответственных деталей.
4. Упрочнение металлорежущего инструмента (как из легированных инструментальных сталей, так и из металлокерамических твердых сплавов) и технологической оснастки (штамповой, прессовой, литейной).

Размеры упрочняемых деталей ограничиваются габаритами эффективной рабочей зоны в вакуумной камере (цилиндр Ø300–500 мм и высотой 300–400 мм).

#### Термины и определения

**Вакуум** – это физическая среда с очень низкой концентрацией частиц.

Различают **низкий или предварительный вакуум** при давлении остаточных газов в объеме от  $10^2$  до  $10^1$  Па, который достигается применением механических средств откачки – пластинчато-роторных, золотниковых и др. типов вакуумных **механических** насосов.

**Высокий вакуум** при давлении в откачиваемом объеме  $P < 5 \cdot 10^{-1}$  Па достигается с использованием высоковакуумных средств откачки (диффузионные (паромасляные), геттерные, криогенные и другие высоковакуумные насосы).

Степень разрежения, достигаемая в откачиваемых объемах, определяется равновесным давлением, устанавливающимся под действием двух противоположных процессов: **откачки** газа с помощью насосов и **натекания** его через неплотности, а также в результате **технологического** газовыделения.

**Низкий вакуум** характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пути частиц во много раз меньше расстояния до поверхности детали ( $S \ll l$ ). **Низкому вакууму** соответствует область давлений от  $10^5$  до  $10^2$  Па.

**Высокий вакуум** характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пути частиц значительно превышает расстояния до поверхности детали ( $S \gg l$ ). **Высокому вакууму** обычно соответствует область давлений остаточных газов от 0,1 до  $10^{-5}$  Па.

Основными терминами, применяемыми в вакуумной технике (согласно ГОСТ 5197, ГОСТ 24054, ОСТ 11 066.001 и ОСТ 11 293.031), являются следующие.

1. **Форвакуум** — вакуум, создаваемый насосом более низкого вакуума при последовательной работе нескольких насосов.
2. **Откачка** — уменьшение молекулярной концентрации газа с помощью устройств, удаляющих или поглощающих газ.
3. **Натекание** — проникновение газа из окружающей среды в откачиваемый (откачанный) сосуд.
4. **Динамический поток газа** — поток сжимаемой среды с большим относительным изменением плотности, характеризуемый высоким числом М (например, сверхзвуковой поток в соплах пароструйного насоса).

**5. Нормальное состояние газа** — состояние газа при нормальных условиях: давлении  $10^5$  Па и температуре 273 К (0 °С).

**6. Длина свободного пути частицы** — длина пути частицы между двумя последовательными столкновениями с другими частицами.

**7. Средняя длина свободного пути частиц** — среднее арифметическое значение длин свободного пути частиц.

**8. Эффективная длина свободного пути частиц** — отношение средней длины свободного пути частиц к вероятности совершения определенного процесса (явления) в результате одного столкновения.

**9. Разреженный газ** — газ с молекулярной концентрацией ниже его концентрации при нормальных условиях.

**10. Вакуумная система** — совокупность устройств для создания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также сосудов и связывающих их трубопроводов.

**11. Вакуумная установка** — установка, состоящая из вакуумной системы и устройств, обеспечивающих ее действие.

**12. Вакуумный агрегат** — вакуумная установка, конструктивно выполненная как единое целое.

**13. Откачной пост** — вакуумная установка, предназначенная для откачки, наполнения и тренировки изделий.

**14. Элемент вакуумной системы** — прибор, сборочная единица или деталь, предназначенные для выполнения определенных функций в вакуумной системе. Например, насос, манометрический преобразователь, ловушка и т. п.

**15. Вакуумная камера** — сосуд, в котором создается вакуум, необходимый для различных технологических процессов.

**16. Вакуумный трубопровод** — трубопровод, по которому перемещается разреженный газ в вакуумной системе.

**17. Форвакуумный трубопровод** — вакуумный трубопровод, служащий для присоединения к форвакуумному насосу.

**18. Байпасный трубопровод** — вакуумный трубопровод, предназначенный для откачки сосуда, минуя высоковакуумный насос и арматуру больших проходных сечений.

**19. Вакуумный клапан** — устройство, позволяющее регулировать или полностью прекращать поток газа в вакуумной системе.

**20. Вакуумный затвор** — вакуумный клапан, позволяющий соединять и разобщать элементы вакуумной системы.

**21. Натекатель** — вакуумный клапан, позволяющий регулировать и устанавливать малые потоки газа.

**22. Напускной клапан** — вакуумный клапан, предназначенный для напуска воздуха или газа в вакуумную систему до атмосферного или любого заданного давления.

**23. Подложка** — деталь или образец для исследований, на поверхность которого наносится покрытие.

## 1. Цель и задачи работы

**Цель работы:** закрепить теоретические знания и получить практические навыки по разработке и выполнению технологического процесса восстановления деталей сельскохозяйственной техники и упрочнения инструмента нанесением вакуумно-плазменных покрытий.

**Студент должен знать:** основы физических процессов при горении электрической дуги, конструкцию и принцип действия механических средств откачки вакуума, конструкцию и условия работы основных узлов и механизмов автотракторной техники, характерные дефекты их деталей и методы их определения; устройство оборудования и методы измерения твердости, микротвердости, определения толщины слоя покрытия.

**Студент должен уметь:** оценить техническое состояние деталей основных узлов и механизмов; определить степень износа деталей; пользоваться мерительным инструментом; проводить измерения твердости и микротвердости деталей с покрытием; определять толщину слоя покрытия с использованием магнитного толщиномера и весовым методом.

## 2. Задание на выполнение работы

1. Изучить технику безопасности при нанесении вакуумно-плазменных покрытий.

2. Изучить физико-технологические основы и технологический процесс вакуумно-плазменного восстановления и упрочнения.

3. Ознакомиться с оснащением рабочих мест, устройством и работой оборудования, приспособлений и инструмента.

4. В соответствии с заданным преподавателем объектом восстановления или упрочнения проанализировать его конструктивные особенности и выбрать тип опытного образца для нанесения покрытий. Выбрать материал для восстановления или упрочнения и разработать технологический маршрут нанесения вакуумно-

плазменного покрытия, определить основные технологические режимы, под руководством мастера производственного обучения выполнить процесс нанесения покрытия.

5. Провести измерения толщины слоя, определить микротвердость, твердость основы, основные размеры опытного образца до нанесения и после нанесения покрытия, сравнить и занести данные в таблицу.

6. Оформить и защитить отчет.

### 3. Оснащение рабочего места

Установка вакуумно-плазменного напыления «Булат-6М».

Комплект мерительного инструмента (штангенциркуль, микрометр, индикаторные головки).

Твердомер ТК2-М «Роквелл».

Магнитный толщиномер МТ-16.

Прибор для измерения микротвердости ПМТ-3, оснащенный пирамидой Виккерса.

Весы лабораторные аналитические ВЛА-500.

Наборы гаечных ключей и слесарного инструмента.

В качестве исходных материалов для нанесения вакуумно-плазменных покрытий, в зависимости от назначения, могут использоваться технически чистые металлы или их сплавы.

### 4. Характеристика оборудования для нанесения вакуумно-плазменных покрытий

Для нанесения покрытий используют вакуумно-плазменные установки различных отечественных производителей: ВУ-1Б, ВУ-1БС, ВУ-2МБС и др. Сморгонского завода оптического станкостроения (Беларусь), ННВ6.6-И4 Саратовского завода «Электротерм» (Россия), ННВ6.6-И1 Новосибирского завода электротермического оборудования (Россия), УРМ 3.279.048 («Юнион») и УВН.ИПА-1-001, УВН.ИПА-1-004 Калининградского машиностроительного завода «Кварц» (Россия), «Булат», «Булат-3», «Булат-3Т», «Булат-6», «Булат-6М» Киевского завода ЦНИТУ (Украина), «Пуск-82» Московского завода НИИТАвтоПром (Россия).

Установка «Булат-6М» предназначена для нанесения покрытий из любых металлов и твердых химических соединений (нитридов, карбидов, оксидов) металлов IVa-VIa групп Периодической системы Менделеева (Ti, Cr, Mo, Zr, Nb, W (по методу конденсации в

вакууме с ионной бомбардировкой – метод КИБ) на детали машин, режущий инструмент, инструментальную оснастку.

Общий вид установки «Булат-6М» приведен на рисунке 1.

Установка состоит из следующих основных частей:

- вакуумного блока с паромасляным высоковакуумным насосом и вакуумным затвором 4, соединенным с вакуумной камерой 2, на которой смонтированы электродуговые испарители 1 (3 шт.);
- форвакуумного откачного агрегата 3;
- системы вакуумных трубопроводов и коммутационных устройств (вакуумных клапанов) 6;
- прибора контроля остаточного давления газов в вакуумной камере с датчиками низкого и высокого вакуума (вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-3);
- блока питания и управления, блока питания высоким напряжением, источников питания электродуговых испарителей (3 шт.).

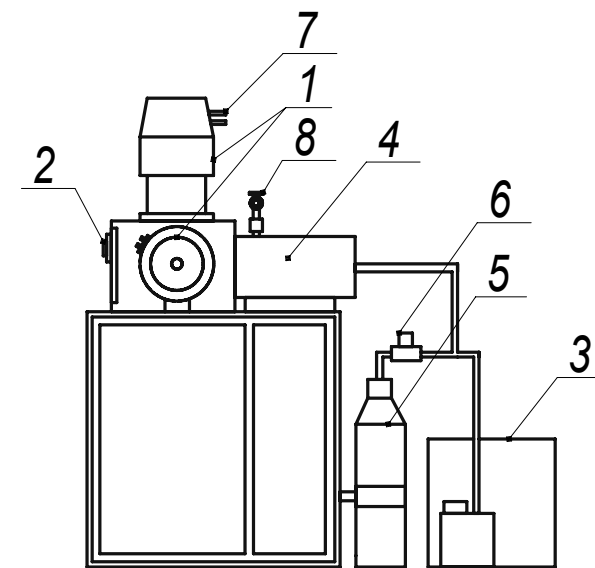


Рисунок 1. Схема установки вакуумно-плазменного напыления «Булат-6М»:  
1 – электродуговые испарители; 2 – вакуумная камера; 3 – форвакуумный агрегат;  
4 – паромасляный высоковакуумный насос с высоковакуумным затвором;  
5 – газовый баллон; 6 – вакуум-провод с байпасным клапаном; 7 – подвод воды;  
8 – патрубок подключения вытяжной вентиляции

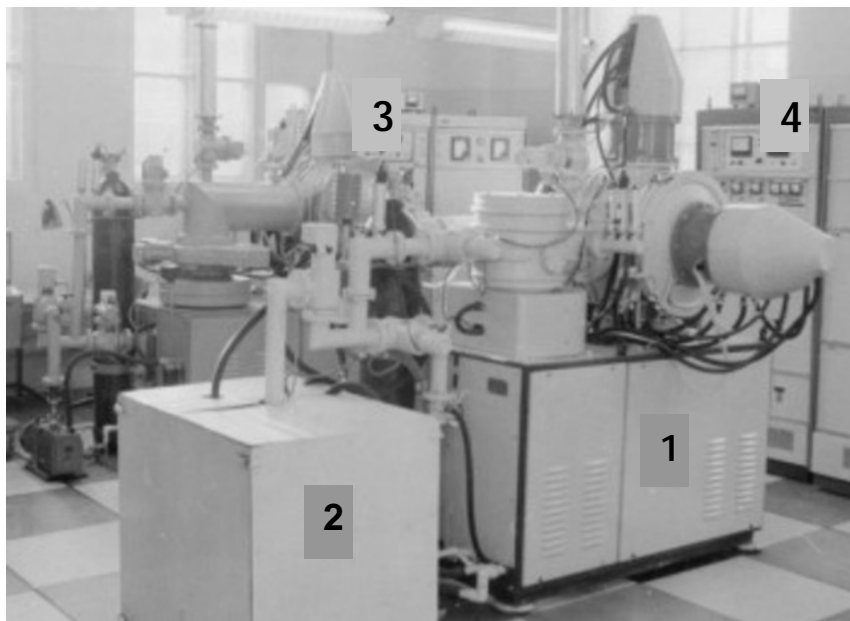


Рисунок 2. Общий вид установки «Булат-6М»:

1 – вакуумный пост с вакуумной камерой и электродуговыми испарителями (3 шт.); 2 – форвакуумный откачной агрегат; 3 – блоки питания электродуговых испарителей (3 шт.); 4 – блок питания высоким напряжением

Техническая характеристика вакуумно-плазменной установки «Булат-6М» приведена в приложении 1.

На участке вакуумно-плазменных покрытий должны быть организованы следующие рабочие места:

- подготовки поверхности к нанесению покрытий и технического контроля готовой продукции;
- вакуумно-плазменного напыления.

Помещение для участка вакуумно-плазменного напыления должно отвечать следующим обязательным требованиям:

- 1) по электробезопасности помещение относится к помещению с повышенной опасностью;
- 2) по взрывоопасности помещение относится к категории не взрывоопасных;
- 3) по пожарной опасности помещение относится к категории "Д";

- 4) по вакуумной гигиене помещение относится к III категории;
- 5) помещение характеризуется незначительным избытком явного тепла (20 ккал/м<sup>3</sup> ч и менее). Температура воздуха зимой 18–21 °С (влажность 50±10 %), летом – 22–25 °С (влажность 50±10 %);
- б) скорость движения воздуха в рабочей зоне зимой 0,2 м/с, летом – не более 0,3 м/с.

Помещение участка вакуумно-плазменных покрытий разделено на два изолированных стенами отделения (рисунок 3): отделение подготовки поверхностей к нанесению покрытий 1 и помещение для нанесения вакуумно-плазменных покрытий 2, в котором шумоизолирующей перегородкой выделено помещение для источников питания дугowych испарителей (3 шт.) и источника питания высоким напряжением.

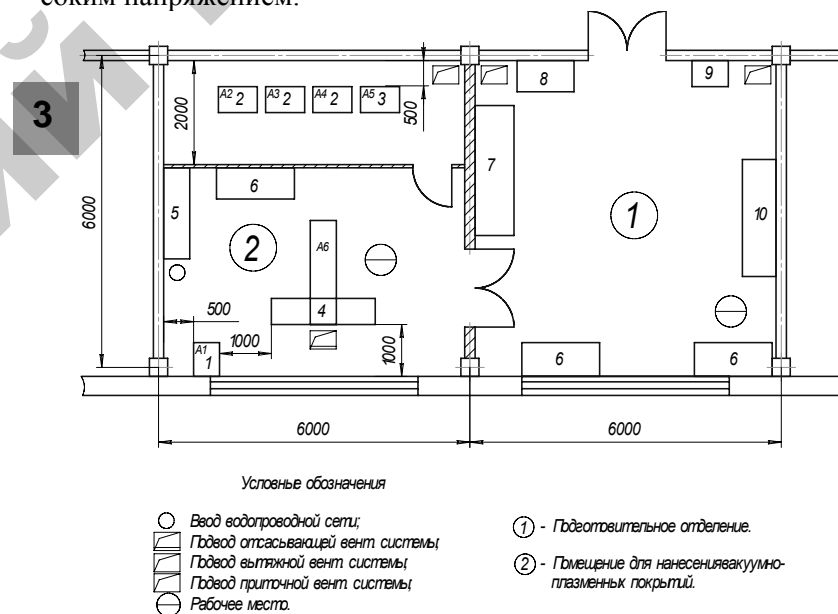


Рисунок 3. Планировка участка вакуумно-плазменного напыления:

1 – блок питания и управления; 2 – источник питания электродугового испарителя; 3 – источник питания высоким напряжением; 4 – вакуумный пост установки «Булат-6М»; 5 – шкаф-стеллаж для обработанных деталей; 6 – стол; 7 – вытяжной шкаф; 8 – шкаф для спецодежды; 9 – умывальник; 10 – шкаф-стеллаж для хранения изделий

## 5. Технологический процесс нанесения вакуумно-плазменных покрытий

Процесс вакуумно-плазменного напыления покрытий включает три стадии.

1. Перевод из твердого состояния в ионизированное паро-плазменное состояние приповерхностных слоев расходуемого электрода (катода, изготовленного из материала основы покрытия) с помощью вакуумно-дугового разряда.

2. Формирование паро-плазменного потока и перенос напыляемых частиц на поверхность детали.

3. Конденсация (осаждение) частиц паро-плазменного потока на поверхности напыления – формирование покрытия.

Первая стадия процесса обеспечивает испарение с регулируемой скоростью и ионизацию материала катода, изготовленного из материала покрытия, при этом конденсированная фаза в виде жидких или твердых частиц должна отсутствовать либо содержаться в минимальном количестве.

На второй стадии формируется направленный к поверхности конденсации детали поток с максимальной пространственной плотностью частиц и степенью ионизации паровой фазы.

Третья стадия характеризуется двумя конкурирующими процессами: конденсацией на поверхность и ее распылением вследствие бомбардировки заряженными частицами металла катода. Преобладание одного из этих процессов определяется теплофизическими характеристиками металлов основы и покрытия, углом падения частиц на поверхность конденсации и величиной потенциала, приложенного к ней, следовательно, величиной энергии конденсирующихся ионов металла.

При подаче с контролируемым расходом в вакуумную камеру активных газов (азот, метан, кислород, сероводород и др.) можно получить на поверхности детали твердые и износостойкие покрытия (нитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.), либо твердые смазочные покрытия типа дисульфидов молибдена. С помощью вакуумно-плазменного напыления создают износостойкие покрытия (приложение Б) на поверхностях трения деталей машин, режущих кромках инструмента, прессовой и штамповой оснастки и др.

Источником потока материала, образующего покрытие при вакуумно-плазменном напылении, является стационарный электроду-

говой эрозионный испаритель (рисунок 3) с расходуемым интегрально холодным водоохлаждаемым катодом. Источником энергии для испарения исходного материала покрытия является вакуумная электрическая дуга, которая (в отличие от атмосферных электрических дуг) развивается в парах исходного металла покрытия (катод), для ее реализации не требуется большая концентрация газовых носителей заряда.

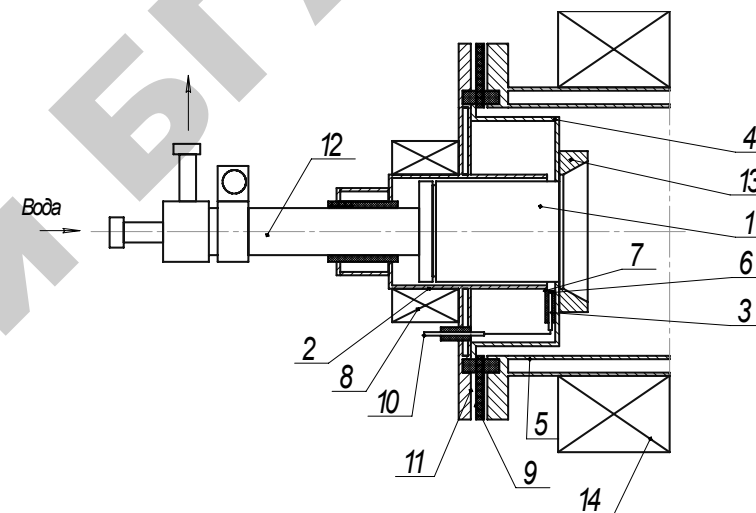


Рисунок 4. Электродуговой источник плазмы (испаритель):

- 1 – расходуемый материал (катод); 2 – экран; 3 – поджигающий электрод;
- 4 – вспомогательный анод; 5 – основной анод; 6 – диэлектрическая втулка;
- 7 – кольцевой зазор; 8 – соленоид стабилизации дуги; 9 – изоляторы; 10 – вывод поджигающего электрода; 11 – водоохлаждаемый фланец; 12 – водоохлаждаемый катододержатель; 13 – концентратор магнитного поля; 14 – фокусирующая магнитная катушка

На рисунке 4 показана конструкция электродугового испарителя для нанесения покрытий плазменно-вакуумным напылением. Испаритель состоит (рисунок 4) из системы размещенных коаксиально по отношению друг к другу в вакуумной камере электродов: охлаждаемого водой катода 1 из металла покрытия, установленного на держателе 12 в центре испарителя; охлаждаемого анода 5, расположенного вокруг катода 1; вспомогательного анода 4 с концентратором магнитного поля 13 и установленного на нем через изолятор

6 поджигающего электрода 10; соленоидов управления вакуумной дугой 8 и фокусировки плазменного потока 14.

На рисунке 5 показано подключение электродов испарителя к источнику питания. Катод 1 и анод 2 подключены соответственно к отрицательной и положительной клеммам регулируемого источника питания постоянного тока (сварочного выпрямителя), между ними приложена разность потенциалов, вспомогательный анод 4, через сопротивление  $R$  соединен с анодом 2. Электромагнитная катушка 8 играет роль стабилизатора траектории катодного пятна на рабочей поверхности распыляемого материала, а соленоид 14 предназначен для фокусировки и ускорения потока ионов, отклонения потока макрочастиц с целью сепарации потока.

Устройство работает следующим образом. При рабочем давлении в вакуумной камере  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  Па подаются импульсы высокого отрицательного потенциала с конденсатора  $C_n$  на поджигающий электрод 3. По поверхности изолятора, на которой предварительно сформирована самовосстанавливающаяся пленка металла, происходит пробой разряда высокого напряжения. В результате пленка испаряется и образуется облачко ионизированных заряженных частиц металла и электронов, которые замыкают разрядный промежуток между катодом и анодом, к которому притягиваются.

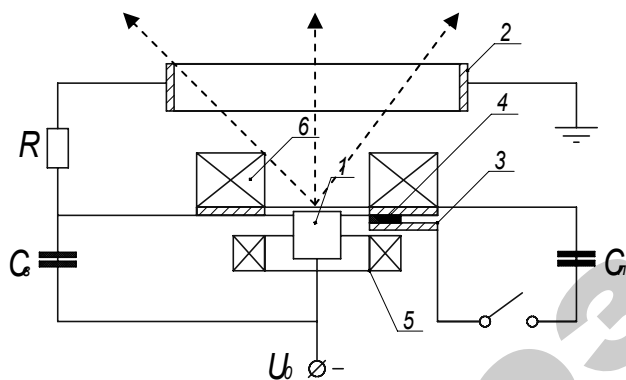


Рисунок 5. Схема подключения электродов электродугового испарителя к источнику питания (сварочный выпрямитель постоянного тока): 1 – расходуемый материал (катод); 2 – основной анод; 3 – поджигающий электрод; 4 – вспомогательный анод; 5 – электромагнитная катушка; 6 – фокусирующая электромагнитная катушка

## 5.1. Физическо-технологические основы вакуумно-плазменной технологии нанесения покрытий

На поверхности катода 1 (рисунки 4, 5) зажигается вакуумная электрическая дуга **катодной формы** в виде быстро перемещающихся **катодных микропятен** ( $\varnothing 0,01$ – $0,1$  мм), в которых концентрируется весь ток разряда (плотность тока достигает  $10^3$ – $10^5$  А/мм<sup>2</sup>) и температура достигает 5000–6000 °С. При этом рабочая поверхность катода остается твердой и интегрально холодной (температура не выше 100 °С).

Под действием высокой температуры и ударно-ионизационного воздействия в катодных пятнах металл катода испаряется, ионизируется, ускоряется до энергии  $\approx 10^2$ – $10^3$  ЭВ (электрон-вольт) и перемещается в вакууме с высокой скоростью 1–10 км/с прямолинейно от рабочей поверхности катода в пределах телесного угла с вершиной в центре катода 1 и образующими, проходящими через наружный срез анода 2 (рисунок 5).

Минимальный ток, проходящий через катодное пятно, при котором возможно горение дуги, связан с теплофизическими константами материала катода соотношением:

$$I_K = 2,5 \cdot 10^4 \cdot T_K \cdot \sqrt{\lambda_T}, \quad (1)$$

где  $T_K$  – температура кипения металла катода;  
 $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности.

Для устойчивого горения вакуумной дуги катодной формы необходимо одновременное существование как минимум 2-х катодных пятен. Из расчетных данных следует, что минимальный ток вакуумного дугового разряда равен: для титана — 80 А, хрома — 120 А, молибдена — 150 А, вольфрама — 300 А.

Скорость испарения  $V_u$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) в общем случае определяется из выражения:

$$V_u = 0,438 \cdot 10^{-2} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{M}{T_u}} = A_1 \cdot p, \quad (2)$$

где  $p$  – давление паров, Па;  
 $T_u$  – температура испарения, °К;  
 $M$  – молекулярная масса испаряемого металла.



Зависимость давления паров от температуры описывается уравнением:

$$\lg p = A \cdot T^{-1} + B \cdot \lg T + C \cdot T + D \cdot T^2 + E, \quad (3)$$

где  $A, B, C, D, E$  — константы, характерные для испаряемого металла (приложение 5).

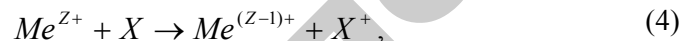
При проведении прикидочных расчетов скорости испарения обычно ограничиваются коэффициентами  $A, B$  и  $E$ , значения которых для некоторых металлов приведены в приложении С. Значения коэффициента  $B$  следует учитывать только для  $Zn$  и  $Cd$ .

В приложении 4 приведены основные термодинамические характеристики некоторых элементов, наиболее широко используемых в технологии нанесения покрытий в вакууме ( $T_{пл}$  и  $T_k$  — соответственно температуры плавления и кипения). При определении основных параметров технологического процесса нанесения покрытий оператору необходимо, определить скорость испарения вещества. Для этого он должен выполнить следующие операции: выбрать необходимый металл покрытия; задаться ориентировочной температурой испарения  $T_u$  и выбрать наиболее близкое значение  $T_k$  из значений, приведенных в приложении 4; затем, умножив коэффициент  $A_1$  (приложение 4) на соответствующее значение  $p$ , определить по формуле (1) скорость испарения  $V_u$ . Если значение температуры испарения является промежуточным (приложение 3), следует применить для расчета метод линейной интерполяции для определения соответствующих параметров.

**Пример.** Вычислить скорость испарения алюминия в вакууме при температуре  $T_u \approx 1830$  °К. Из приложения 4 определяем значения  $A_1$  и  $p$  при заданной температуре испарения:

$$V_u = (0,0749/133) \cdot 1,33 \cdot 10^2 = 0,0749 \text{ кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Наиболее вероятными процессами при столкновении пароплазменного потока с молекулами остаточного или реактивного газа (азот, кислород, углеводород или смесь газов) являются реакции нерезонансной перезарядки:



где  $X$  — атом газа, вызывающий ионизацию газовой среды,  $Me^{Z+}$  — ион металла.

Т.е. происходит ударная ионизация реакционно-способного газа, который притягивается к поверхности конденсации и вступает в реакцию прямого синтеза твердого химического соединения, например:



На третьей стадии ионной очистки к обрабатываемой подложке прикладывается отрицательный потенциал  $-25 \dots -1700$  В от автономных источников питания, что приводит к ускорению ионной компоненты плазмы металла в так называемом двойном слое (рисунков 6) до энергии:

$$E_i = e \cdot Z \cdot U_{II} + E_d, \quad (5)$$

где  $Z$  — заряд (степень ионизации) иона — определяется количеством валентных электронов на внешней оболочке атома металла и параметрами электрической дуги;  $U_{II}$  — отрицательный потенциал смещения, приложенный к подложке;  $E_d$  — исходная энергия иона, полученная при испарении в вакуумно-дуговом разряде (составляет 100–200 эВ для металлов IVa–VIa групп Периодической системы Менделеева).

Бомбардировка поверхности тяжелыми ионами металла катода, в зависимости от энергии, способствует распылению поверхностных примесей и дефектов, травлению и активации поверхностных слоев подложки, нагреву до требуемой температуры конденсации 150–800 °С.

Величина энергии, сообщаемой атомам кристаллической решетки металла подложки:

$$E = \frac{4 \cdot M_{и} \cdot M_{п}}{(M_{и} + M_{п})} \cdot E_i, \quad (6)$$

где  $M_{и}$  и  $M_{п}$  — массы иона металлов катода и подложки соответственно,  $E$  — энергия иона металла расходуемого катода. Если  $E < 25$  эВ, то энергия переходит в тепло и подложка нагревается, а при  $E \gg 125$  эВ происходит смещение в промежуточное положение или распыление атомов подложки.

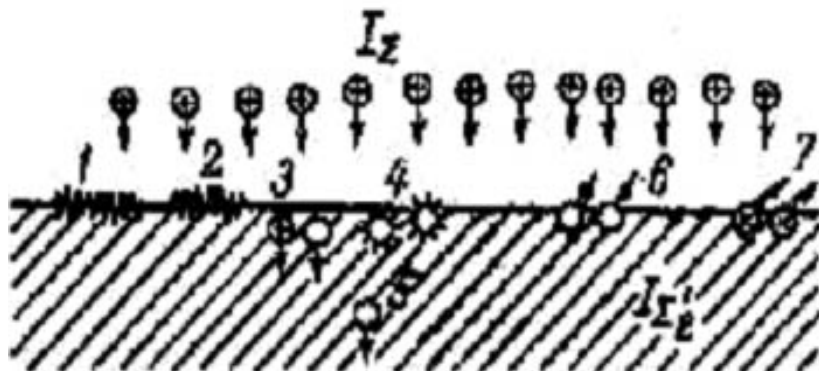


Рисунок 6. Схема физических явлений при взаимодействии потоков плазмы с подложкой:

1 – химические реакции; 2 – изменение топографии; 3 – сорбция ионов и атомов; 4 – дефектообразование; 5 – имплантация; 6 – десорбция распыления; 7 – распыление

При взаимодействии потока плазмы металла катода на поверхности детали, в зависимости от энергии ионов и физико-химических характеристик металлов основы и покрытия, могут протекать следующие процессы (рисунок 6): осаждение слоя, химические реакции, распыление, дефектообразование, изменение топографии, сорбция ионов и атомов, имплантация, десорбция адсорбированных примесей.

## 5.2. Технологические особенности вакуумно-плазменного нанесения покрытий

Методами активированного вакуумно-плазменного напыления можно получать покрытия не только из высокопрочных металлов IVa–VIa групп Периодической системы Менделеева (износостойкие покрытия из нитридов, карбидов, оксидов и других химических соединений).

Детали или инструмент, подлежащие нанесению покрытий, располагают в вакуумной камере на поворотном устройстве таким образом, чтобы покрываемые поверхности были перпендикулярны направлению плазменного потока. Рабочие поверхности должны быть тщательно подготовлены механическим способом. Качество меха-

нической подготовки поверхности нерабочих поверхностей не имеет значения, однако грубые поверхностные загрязнения (окалина, ржавчина) не допускаются. Эти дефекты должны быть устранены при подготовке поверхности изделий.

Для восстановления посадок и охватываемых размеров деталей, в том числе прецизионных, могут использоваться *Fe, Ni, Cr, Ti*, другие металлы, а в случае необходимости более высокой твердости – двухслойные покрытия из внутреннего слоя металла и внешнего слоя карбида, нитрида металла.

Для упрочнения и повышения износостойкости трущихся поверхностей целесообразно использовать покрытия из карбидов, нитридов металлов IVa–VIa групп Периодической системы Менделеева (*Ti, Cr, Zr, Mo, W* и др.) с тонкой прослойкой металла у подложки или переходного состава толщиной 0,2–0,5 мкм. Такая конструкция покрытия нужна для повышения адгезии и уменьшения остаточных термических напряжений, возникающих при охлаждении детали с покрытием из-за существенных отличий коэффициентов термического расширения металла основы с одной стороны, и слоя покрытия из нитрида, карбида металла.

В таблице 1 приведены некоторые примеры практического использования вакуумно-плазменных покрытий из нитридов и карбидов титана, молибдена и хрома. Покрытиями на основе карбидов и нитридов повышают показатели износостойкости и ресурс работы деталей из стали, стойкость режущего инструмента и оснастки. Возможность регулирования цвета и высокая твердость покрытий позволяют использовать их как декоративные (таблица 2).

Таблица 1 – Примеры применения покрытий из нитридов и карбидов (титана, хрома, молибдена)

Функциональное назначение покрытия	Объекты упрочнения	Примеры основной продукции
1	2	3
Упрочнение, повышение износостойкости	✓ Режущий инструмент	Резцы, пластинки резцов, сверла, концевые и дисковые фрезы, червячные фрезы, пилы

Окончание таблицы 1

1	2	3
	✓ Детали механизмов и машин	Валы, пальцы, цилиндры, зубчатые передачи
	✓ Прецизионные детали сельхозтехники	Детали топливной и гидроаппаратуры (упрочнение и восстановление)
	✓ Детали режущих аппаратов	Ножи, режущие сегменты, дисковые ножи
	✓ Детали штамповой и прессовой оснастки	Пуансоны, штампы
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ повышение стойкости к окислению,</li> <li>▪ коррозионной стойкости,</li> <li>▪ придание антиадгезионных свойств поверхностям</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Детали литевой оснастки</li> <li>✓ Ответственные детали системы питания и управления</li> </ul>	Пуансоны, литевые формы, формовочные шпильки литейного производства, в том числе при литье резинотехнических изделий Детали топливной (плунжеры, распылители, нагнетательные клапаны) и гидроаппаратуры (золотник распределителя, направляющая втулка, седло клапана, клапан)

Таблица 2 – Условия получения и свойства покрытий нитрида титана

Температура подложки, °С	Давление азота, Па	Толщина покрытия, мкм	Твердость, ГПа при нагрузке на индентор 0,25 Н	Цвет покрытия	Состав (формула покрытия)
1	2	3	1	2	3
800	$5-7 \times 10^{-2}$	15	20	Золотисто-желтый	$TiN$

Окончание таблицы 21

1	2	3	1	2	3
500	$5-7 \times 10^{-2}$	15	25	Золотисто-желтый	$TiN$
250	$7-9 \times 10^{-2}$	15	19	Золотисто-желтый	$TiN$
150	$8-15 \times 10^{-2}$	15	18	Желтый с серым оттенком	$TiN$

Покрытие наносится на окончательно обработанные поверхности детали (без снижения класса чистоты поверхности их поверхностей и последующей механической или термической обработки). Состав покрытия выбирается в зависимости от условий эксплуатации, материала основы и характера предварительной термической и механической обработок.

Процесс нанесения покрытия включает: ионную очистку и подогрев до температуры конденсации бомбардировкой поверхности потоком ускоренных до энергии  $\sim 500 - 2000$  эВ ионов металла покрытия; конденсацию с ионной бомбардировкой потоков плазмы металла с энергией 25–300 эВ, что обеспечивает постоянную температуру процесса, подавление роста размеров кристаллитов и получение более плотной структуры за счет умеренной ионной бомбардировки при строго контролируемом давлении реакционного газа или без подачи его. В последнем случае на поверхности формируется покрытие из чистого металла.

Плазменно-вакуумные покрытия имеют высокие механические характеристики (микротвердость, износостойкость, прочность сцепления с материалом подложки), низкий коэффициент трения и слабую склонность к свариванию с обрабатываемой деталью, обусловленную слабым сродством с металлами группы железа. Высокая термическая стабильность покрытия защищает материал основы от локальных температурных воздействий, а малая толщина слоя обеспечивает упругость («квазипластичность») при ударах и экстремальных нагрузках.

Нижеследующие параметры оказывают большое влияние на показатели эффективности процесса: дистанция напыления; угол расхождения потока напыляемых частиц; угол встречи потока с по-

верхностью напыления; давление и рабочая среда; температура и размеры напыляемого изделия и др.

**Дистанция напыления.** При испарении материала с поверхности катода область равномерного покрытия при дистанции  $L = 250$  мм распространяется на площадь напыления диаметром 200–300 мм.

**Давление в камере.** С этим параметром в первую очередь связана длина свободного пробега напыляемых частиц при нанесении покрытия из чистых металлов и стехиометрический состав, структура и прочностные характеристики упрочняющего покрытия (нитрида, карбида).

При нанесении покрытий из **чистых металлов** рекомендуется минимально достижимое давление остаточных газов в вакуумной камере, т.к. максимальная степень разрежения до вакуума  $(5 - 8) \times 10^{-3}$  Па облегчает процессы переноса частиц и формирования качественного слоя.

При нанесении **упрочняющих покрытий** (карбиды, нитриды) давление соответствующего реакционного газа (метана, ацетилена, азота, аммиака) поддерживается на уровне  $(3-15) \times 10^{-1}$  Па. Повышение давления газа способствует увеличению твердости слоя, однако снижает скорость нанесения покрытия и способствует образованию пор в покрытии.

**Температура** напыляемого изделия оказывается одним из наиболее значимых параметров процесса напыления. С температурой поверхности напыляемого изделия, в первую очередь, связаны десорбция примесей, уровень остаточных напряжений и прочность, структура покрытия. При нанесении покрытий из **чистых металлов** с увеличением температуры адгезионная прочность возрастает благодаря формированию псевдодиффузионного слоя с переходным составом от материала подложки к материалу покрытия, поэтому желательно выбирать максимально допустимое значение температуры при условии неразупрочнения (отпуска) подложки. При нанесении **упрочняющих покрытий** (карбиды, нитриды) увеличение температуры приводит к росту термических остаточных напряжений из-за большой разности коэффициентов термического расширения материалов подложки (большой) и покрытия (очень низкий, так как это керамика). Поэтому целесообразно в этом случае рекомендовать минимальную температуру 150–500 °С, при которой формирование покрытия из химического соединения термодинамически возможно.

**Толщина слоя покрытия** – одна из важнейших характеристик покрытия, в значительной мере определяющая его защитные свойства, является функцией скорости осаждения и времени обработки, с которыми она связана прямо пропорциональными зависимостями. Необходимая толщина слоя определяется требуемым объемом металла для восстановления дефектов. Слой чистого металла можно наносить плазменно-вакуумным методом до толщины 20–50 мкм, в то время как слой карбида или нитрида не следует проектировать более 10 мкм из-за накопления термических напряжений и отслаивания покрытий. Поэтому при необходимости нанесения слоя большей толщины для восстановления и упрочнения поверхностей целесообразно наносить двухслойную структуру: слой чистого металла + слой нитрида или карбида.

## 6. Предлагаемый технологический маршрут нанесения покрытия методом плазменно-вакуумного напыления

6.1. Подготовка поверхности под нанесение покрытия.

- Обработать опытный образец или деталь в ультразвуковой ванне (УЗУ-0,25 или иной марки) при температуре 60 °С последовательно в растворах (а) и (б) в течение 5–7 мин.

Состав раствора (а): синтанол ДС-10 — 3 %, ортофосфорная кислота — 5 %, вода — остальное;

Состав раствора (б): водный раствор синтетического моющего средства «Новость» (30 г/л) при температуре 70 °С.

- Промыть детали в проточной холодной воде. Протереть бязью, смоченной в спирте-ректификате (ГОСТ 5962).

6.2. Просушить детали в течение 30 мин при температуре 150 °С в сушильных шкафах типа СНОЛ, СНВ для удаления остаточных газов с поверхности.

6.3. Установить детали в вакуумной камере на поворотное устройство установки вакуумного напыления «Булат-6М». Откачать воздух из вакуумной камеры до давления  $(1 - 5) \times 10^{-3}$  Па (см. приложение 5).

6.4. Произвести очистку ионами инертных газов.

Режим очистки: рабочий газ – аргон; ускоряющее напряжение 0,5–1,7 кВ (ступенчато); давление в камере  $(2 - 5) \times 10^{-2}$  Па, время

обработки — 10–15 мин. Откачать камеру до предельного вакуума  $(2 - 5) \times 10^{-3}$ .

6.5. Произвести очистку ионами металла катода (*Ti, Cr, Mo*), являющегося основным металлом выбранного материала покрытия.

Режим очистки: давление в рабочей камере  $P = (2-5) \times 10^{-3}$  Па; ток дугового испарителя  $U = 80-150$  А; потенциал подложки 500–1700 В (повышать ступенчато по мере прекращения микродуговых разрядов на поверхности в циклическом режиме: 5 с – импульс, 3 с – пауза).

Выдерживать деталь в течение 5–20 с при отключенных электро-дуговых испарителях для выравнивания температуры по сечению детали и снижения уровня термических внутренних напряжений.

6.6. Нанести промежуточный слой металла (*Ti, Cr, Mo*).

Режим промежуточного слоя: давление остаточных газов в камере  $P = (2 - 5) \times 10^{-2}$  Па; ток дуговых испарителей  $U = 80-150$  А, время нанесения определяется в зависимости от требуемой толщины с учетом скорости осаждения слоя.

6.7. Нанести *в случае необходимости* твердый слой нитрида или карбида (*Ti, Cr, Mo*).

Режим нанесения покрытия: давление остаточных газов в камере  $P = (2 - 15) \times 10^{-2}$  Па; ток дугового испарителя  $U = 80-150$  А; потенциал подложки 25...120 В; время нанесения определяется в зависимости от требуемой толщины с учетом скорости осаждения слоя. Охладить опытные детали в вакуумной камере в течение 15 мин., затем наполнить камеру азотом до атмосферного давления и выдержать 5 мин.

6.8. Контролировать толщину слоя покрытия, твердость композиции по Роквеллу (снижение твердости по сравнению с исходной не допускается), микротвердость покрытия, адгезионную прочность согласно ГОСТ 9.302.

## 7. Меры безопасности во время работы

Эксплуатация установки должна проводиться в производственных помещениях, соответствующих санитарно-техническим требованиям, установленным ГОСТ 12.1.005.

При подготовке поверхности к нанесению покрытия следует руководствоваться указаниями мер безопасности, приведенными в инструкциях по эксплуатации ультразвуковой ванны и сушильного шкафа. Подготовка поверхностей образцов, инструмента и деталей машин к нанесению покрытий с применением легко воспламеняющихся жидкостей (бензин, ацетон, спирт) должна проводиться с выполнением требований по обеспечению пожарной безопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.004, а требований взрывобезопасности – в соответствии с ГОСТ 12.1.010. Ответственным лицом за эксплуатацию вакуумной установки «Булат-6М» является **мастер производственного обучения** с категорией по электробезопасности не ниже **II**.

Категорически запрещается включение установки «Булат-6М»:

- а) при неисправной системе блокировок;
- б) со снятыми защитными кожухами на источниках плазмы и поворотном устройстве;
- в) при неисправной системе электропитания;
- г) при неисправной системе водоохлаждения;
- д) без подачи воды в хотя бы одну из водоохлаждаемых систем агрегата.

Кнопка аварийного отключения находится на верхней поверхности основания с правой стороны дверки камеры.

- При работе на установке потенциальную опасность для обслуживающего персонала представляют:
  - образование твердых аэрозолей в процессе нанесения покрытия;
  - повышенные значения напряжения в электрических цепях;
  - возможность механических травм.
- К работе на установке должен допускаться обслуживающий персонал, имеющий группу электробезопасности не ниже **III**, прошедший обучение по правилам эксплуатации установки и техники безопасности и вакуумной гигиены.
  - Температура поверхности вакуумной камеры не должна превышать 60 °С.
  - Уровень звукового давления, создаваемого установкой, не должен превышать нормативных значений.

- При выгрузке изделий из камеры, очистке фильтров отсасывающей вентиляции, стенок камеры и пылесоса обслуживающий персонал должен пользоваться защитными очками и бесклапанным респиратором по ГОСТ 12.4.041.

- Дополнительные меры безопасности при работе с конкретными материалами покрытий сообщаются обучаемым преподавателем или мастером производственного обучения при инструктаже.

## 8. Порядок выполнения работы

### 8.1. Требования к образцам для нанесения покрытий.

Технологический процесс вакуумно-плазменного нанесения покрытий может обрабатываться на опытных образцах «типа цилиндр» (Ø10–30 мм и длиной 100–300 мм) или «типа диск» (Ø10–30 мм и толщиной 5–10 мм), изготовленных из материала основы детали сельхозтехники.

*Общие требования к образцам для нанесения покрытий*

Шероховатость поверхностей для нанесения покрытий должна быть не выше  $Ra\ 0,8-1,25$ .

Образцы должны пройти такую же термообработку, как и макетуемая деталь сельхозтехники.

Не допускается наличие на поверхностях опытных образцов следов стойких органических и неорганических загрязнений, ржавчины, нагара, остатков закалочных сред.

Шероховатость нерабочих поверхностей образца не должна превышать  $Ra\ 3,2$ .

8.2. Исходя из задания преподавателя, необходимо выбрать материал покрытия (приложение А) и тип образца для нанесения покрытия («Тип 1» или «Тип 2»).

8.3. Определить ток вакуумной дуги и расчетную скорость испарения в вакууме металла, выбранного в качестве покрытия (основы покрытия), руководствуясь формулами (1, 2, 3) и приложениями 2 и 3. Результаты занести в таблицу отчета.

8.4. Взвесить образцы на аналитических весах, измерить диаметр и длину (толщину) опытного образца. Результаты занести в таблицу отчета.

8.5. Провести настройку магнитного толщиномера на опытном образце.

8.6. Рассчитать ориентировочную скорость конденсации покрытия по формуле и занести в таблицу отчета:

$$V_k = \frac{V_{и} \cdot S \cdot \cos \alpha}{4 \cdot p \cdot L^2}, \quad (7)$$

где  $V_{и}$  – скорость испарения, мм/с;  $S$  – площадь испарения, мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол между направлением потока частиц и нормалью к поверхности напыления;  $L$  – расстояние от источника испарения до напыляемой поверхности, мм.

8.7. Измерить твердость и микротвердость образца, используя приборы ТК2-М и ПМТ-3, результаты занести в таблицу.

8.8. Разработать технологический маршрут восстановления или упрочнения (см. раздел 6), выбрать основные параметры процесса. Время нанесения покрытия определяется как частное от деления необходимой толщины слоя покрытия на рассчитанную скорость конденсации покрытия.

8.9. Провести подготовку поверхности опытного образца, руководствуясь рекомендациями раздела 6 настоящих методических указаний.

8.10. Под руководством мастера производственного обучения нанести покрытие на установке «Булат-6М» в соответствии с выбранными режимами, руководствуясь порядком выполнения вакуумного цикла на установке «Булат-6М» (приложение 5).

8.11. Провести замеры размеров опытного образца, взвесить на аналитических весах, определить твердость и микротвердость поверхности, результаты занести в таблицу 4 отчета о лабораторной работе.

8.12. Определить толщину слоя покрытия с помощью магнитного толщиномера и весовым методом, сравнить полученные результаты.

Толщину  $h$  (мм) покрытия на цилиндрическом образце («Тип 1») определяем из соотношения (весовой метод):

$$h = L \cdot \frac{\gamma_o}{\gamma_{п}} - \frac{4 \cdot (M - m)}{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma_{п}}, \quad (8)$$

где  $d$ ,  $m$  – соответственно диаметр в мм и масса в г образца до нанесения покрытия;  $M$  – соответственно масса в г образца после нанесения покрытия;  $L$  – длина, мм;  $\gamma_o$  – удельный вес материала покрытия, мг/мм<sup>3</sup>;  $\gamma_{п}$  – удельный вес материала покрытия, мг/мм<sup>3</sup>

Толщину  $h$  (мм) покрытия на плоском образце («Тип 2») определяем из соотношения (весовой метод):

$$h = \frac{(M - m)}{\pi \cdot d \cdot H \cdot \gamma_{\text{П}}}, \quad (9)$$

где  $d$ ,  $m$  – соответственно диаметр образца в мм и его масса в г до нанесения покрытия;  $M$  – масса в г образца после нанесения покрытия;  $H$  – толщина образца, мм;  $\gamma_{\text{П}}$  – удельный вес материала покрытия, г/см<sup>3</sup>.

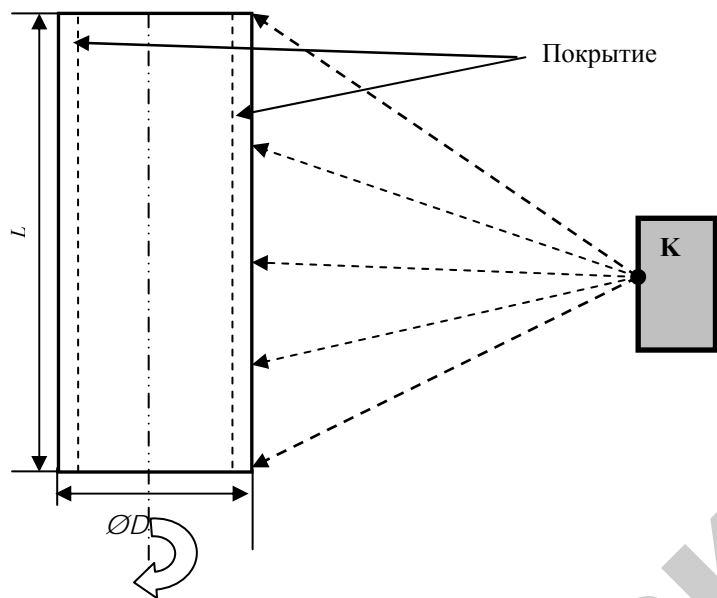


Рисунок 7. Схема расположения образца («Тип 1») по отношению к катоду (К) электродугового испарителя при нанесении покрытия на цилиндрическую поверхность (с вращением образца)

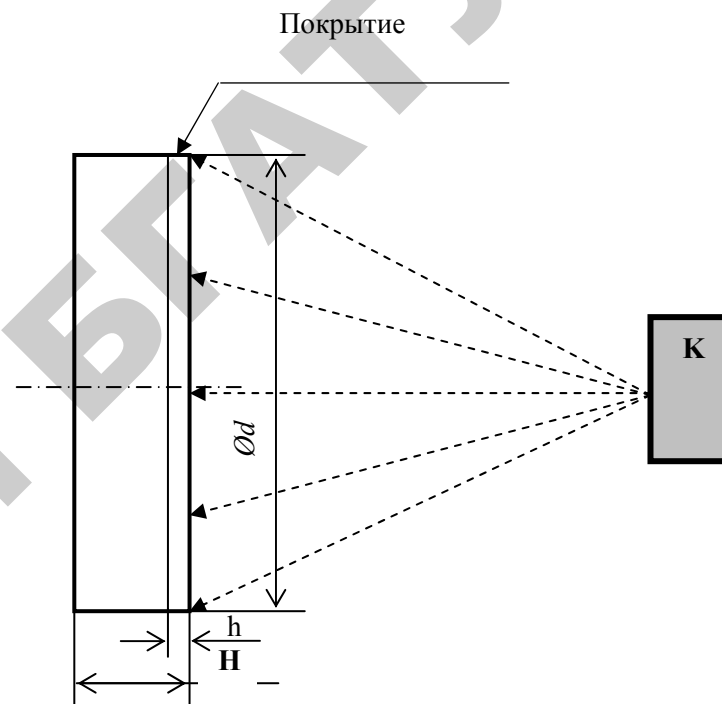


Рисунок 8. Схема расположения образца («Тип 2») по отношению к катоду (К) электродугового испарителя при нанесении покрытия на плоскую поверхность

*Примечание.* Толщину слоя нанесенного покрытия можно определить путем прямого замера увеличения диаметра  $\Delta D$  (образец «Тип 1») или увеличения толщины за счет покрытия  $h$  (образец «Тип 2»). Однако в случае неравномерности толщины слоя покрытия целесообразно применение весового метода.

8.13. Сделать выводы по результатам работы в отношении соответствия расчетных параметров скорости испарения, скорости конденсации слоя, толщины покрытия, твердости и микротвердости до и после покрытия.

## 9. Отчет о выполнении работы

Отчет о работе должен содержать следующую информацию:

- наименование и цель лабораторной работы;
- основные сведения по теории и физико-технологическим основам плазменно-вакуумного нанесения покрытий, схемы, рисунки, формулы расчета параметров;
- схему технологического маршрута восстановления (или упрочнения) с указанием основных технологических параметров процесса вакуумно-плазменного напыления;
- результаты выполнения работы (таблица 4);
- выводы по выполненной лабораторной работе.

Таблица 4 – Результаты лабораторной работы

1	2	3	4	Образец «Тип 1»		Масса образца, г		9	Образец «Тип 2»		12	13
				5	6	До покрытия ( <i>m</i> )	После покрытия ( <i>M</i> )		Толщина покрытия, мм	Толщина образца до покрытия ( <i>l</i> ), мм		
Материал покрытия	Ток дуги, А	Скорость испарения расчетная, кг/(м <sup>2</sup> с)	Скорость конденсации расчетная, мм/час	Диаметр до покрытия, d, мм	Диаметр после покрытия D, мм						Твердость, НРС – исходная/после покрытия	Микротвердость, ГПа – исходная/после покрытия

## 10. Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды дефектов возможно восстанавливать вакуумно-плазменным напылением?
2. Какой вид энергии является источником потока частиц покрытия при вакуумно-плазменном напылении и его особенности?
3. Как называется устройство для генерации потока частиц покрытия?
4. Из каких соображений выбирается материал и толщина слоя покрытия?
5. Каковы основные параметры процесса вакуумно-плазменного нанесения покрытий и как их выбирают?
6. Как определить время нанесения покрытия?
7. Как определяется толщина слоя покрытия?



## ЛИТЕРАТУРА

Приложение 1

1. Лойко, В. А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве / В. А. Лойко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2008. – 192 с.

2. Кесаев, И. Г. Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев. – Москва : Наука, 1988. – 297 с.

3. Дороднов, А. М. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств / А. М. Дороднов, В. А. Петросов // Журн. техн. физ. – 1981. – Т. 51, № 3. – С. 504–524.

4. Достанко, А. П. Плазменная металлизация в вакууме / А. П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск: Наука и техника, 1983. – 379 с.

### Основные технические характеристики и параметры установки «Булат-6М»

Параметр	Значение
Габаритные размеры, мм	2455×1736×2060
Масса установки, кг	2500
Количество электродуговых источников плазмы, шт.	3
Максимальная площадь поверхности напыления, дм <sup>2</sup>	25
Максимальная скорость осаждения покрытия одним источником плазмы, мкм/ч	90
Минимальная скорость осаждения покрытия одним источником плазмы, мкм/ч	5
Максимальные размеры напыляемых деталей, мм, диаметр	200
Число оборотов шпинделя, об/мин	8
Максимальная допустимая нагрузка на шпиндель поворотного устройства, кг	50
Рабочее давление в камере, Па.	$6,5 \times 10^{-3} \dots 6,5 \times 10^{-1}$
Длительность рабочего цикла, мин, не более,	90
Загрузка и выгрузка обрабатываемых деталей	ручная

**Физико-механические и теплофизические характеристики материалов упрочняющих износостойких покрытий**

Исходный металл покрытия Исходный металлопокрытие	Химическое соединение	Тип кристаллической решетки	Микротвердость, ГПа	Коэффициент трения по стали ст 45	Коэффициент термического расширения, $\times 10^6$ , °С	Модуль упругости E, ГПа
Ti	TiC	Кубическая	31,7	0,23	8,3	460
	Ti <sub>2</sub> N	Тетрагональная	–	0,17	–	–
	TiN	Кубическая	20,5	0,21	7,24	256
Cr	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Гексагональная	18,82	0,25	9,4	380
	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Ромбическая	12,74	0,19	11,7	380
	Cr <sub>2</sub> N	ГПУ	15,41	0,20	9,41	310
	CrN	Кубическая	10,93	0,22	2,3	330
Mo	Mo <sub>2</sub> C	ГПУ	17,64	0,18	7,8	544
	MoC	Гексагональная	15	0,15	0,6	200
	Сталь 40 X			0,35		

**Значения констант A, B и E в формуле (2) для расчета скорости испарения**

Наименование металла	$A \cdot 10^{-3}$	B	E
Алюминий, (Al)	15,94	8,27	9,67
Кадмий, (Cd)	5,72	8,35	9,44
Кобальт, (Co)	21,11	9,35	10,58
Хром, (Cr)	20,0	9,56	10,82
Титан, (Ti)	20,12	9,31	10,63
Железо, (Fe)	19,97	9,08	10,32
Медь, (Cu)	16,98	8,63	9,74
Молибден, (Mo)	30,85	8,40	9,52
Ниобий, (Nb)	40,40	11,12	12,25
Никель, (Ni)	20,96	9,40	10,63
Свинец, (Pb)	9,71	8,56	9,66

Основные термодинамические характеристики металлов покрытий

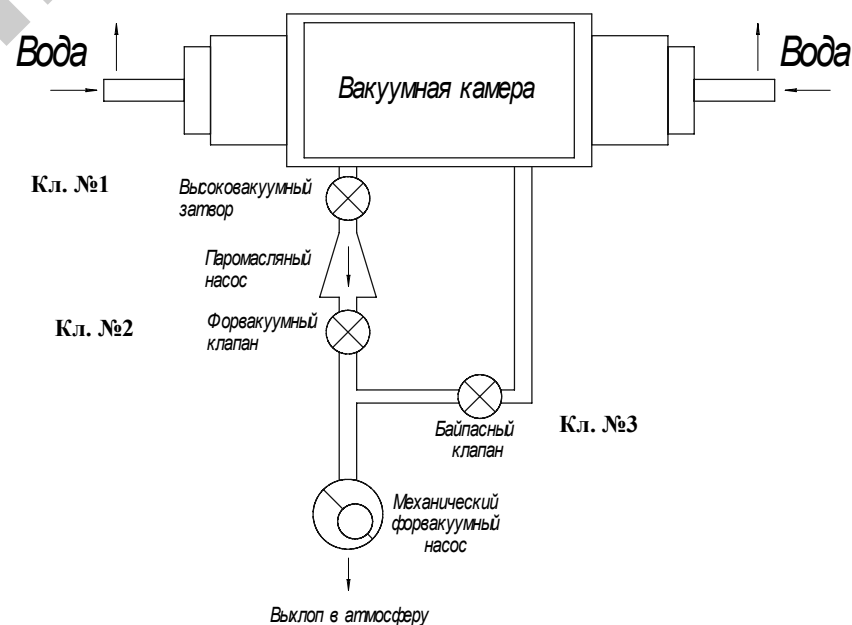
Металл	$T_{вр}, °K$	$T_{кр}, °K$	$M$	Значения $T_k, °K$ (числитель) и коэффициента $A_1 \cdot 133$ (знаменатель) при давлении $P, Па$					
				$1,33 \cdot 10^1$	1,33	$1,33 \cdot 10$	$1,33 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^4$
<i>Al</i>	932	2736	30	$\frac{1355}{0,0871}$	$\frac{1490}{0,0830}$	$\frac{1640}{0,0791}$	$\frac{1830}{0,0749}$	$\frac{2050}{0,0708}$	$\frac{2370}{0,0658}$
<i>Cd</i>	594	1852	112	$\frac{490}{0,2797}$	$\frac{538}{0,2669}$	$\frac{593}{0,2543}$	$\frac{665}{0,240}$	$\frac{762}{0,2243}$	$\frac{885}{0,2081}$
<i>Co</i>	1768	3174	59	$\frac{1655}{0,1105}$	$\frac{1790}{0,1062}$	$\frac{1960}{0,1015}$	$\frac{2180}{0,0962}$	$\frac{2440}{0,0910}$	$\frac{2790}{0,0851}$
<i>Cr</i>	2173	2938	52	$\frac{1540}{0,1075}$	$\frac{1670}{0,1032}$	$\frac{1825}{0,0987}$	$\frac{2010}{0,0941}$	$\frac{2240}{0,0891}$	$\frac{2550}{0,0835}$
<i>Ti</i>	1940	3575	48	$\frac{1850}{0,0942}$	$\frac{2010}{0,0904}$	$\frac{2210}{0,0862}$	$\frac{2450}{0,0819}$	$\frac{2760}{0,0771}$	$\frac{3130}{0,0724}$
<i>Fe</i>	1809	3148	56	$\frac{1615}{0,1089}$	$\frac{1750}{0,1046}$	$\frac{1920}{0,100}$	$\frac{2130}{0,0949}$	$\frac{2390}{0,0895}$	$\frac{2740}{0,0836}$
<i>Cu</i>	1357	2846	64	$\frac{1405}{0,1249}$	$\frac{1530}{0,1196}$	$\frac{1690}{0,1138}$	$\frac{1840}{0,1077}$	$\frac{2140}{0,1012}$	$\frac{2460}{0,0944}$
<i>Mo</i>	2890	4924	98	$\frac{2580}{9,1128}$	$\frac{2800}{0,1083}$	$\frac{3060}{0,1036}$	$\frac{3390}{0,0984}$	$\frac{3790}{0,0931}$	$\frac{4300}{0,0874}$
<i>Nb</i>	2770	4640	93	$\frac{2720}{0,1082}$	$\frac{2930}{0,1042}$	$\frac{3170}{0,1000}$	$\frac{3450}{0,0961}$	$\frac{3790}{0,0916}$	$\frac{4200}{0,0871}$
<i>Ni</i>	1725	3159	59	$\frac{1655}{0,1105}$	$\frac{1800}{0,1059}$	$\frac{1970}{0,1012}$	$\frac{2180}{0,0962}$	$\frac{2430}{0,0911}$	$\frac{2770}{0,0854}$
<i>Pb</i>	601	2016	207	$\frac{898}{0,2809}$	$\frac{988}{0,2678}$	$\frac{1105}{0,2532}$	$\frac{1250}{0,2381}$	$\frac{1435}{0,2222}$	$\frac{1700}{0,2041}$

Порядок выполнения вакуумного цикла на установке «Булат-6М»

1. Загрузить опытный образец на поворотное устройство в вакуумной камере установки «Булат-6М», расположив по оси испарителя в соответствии с рисунками 7 или 8 (в зависимости от типа образца) и закрыть загрузочную дверку камеры на все три клиновых запора.
2. Включить прогрев камеры установки «Булат-6М» и отрегулировать оптимальный проток воды через нагреватель.

**Примечание.** Вакуумная система установки должна быть выведена на режим высоковакуумной откачки ранее.

Схема вакуумной системы установки «Булат-6М»



3. Откачка камеры установки на вакуум:

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ И УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НАНЕСЕНИЕМ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Методические указания  
к лабораторной работе*

Составители:

**Лойко** Владимир Алексеевич,  
**Миклуш** Владимир Петрович,  
**Анискович** Геннадий Иосифович

Ответственный за выпуск В.А. Лойко  
Редактор Н. А. Антипович  
Компьютерная верстка А. И. Стебуля

Подписано в печать 21.04.2010. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 1,95. Уч.-изд. л. 1,89. Тираж 90 экз. Заказ 384.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330/0552841 от 14.04.2010.

ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2006.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.

- -закрывать клапан ручного напуска воздуха в камеру установки;
  - -закрывать электроклапан №2 (форвакуумный) откачки диф. насоса;
  - -открыть электроклапан №3 (байпасный) откачки камеры установки;
  - -откачать камеру установки, контролируя вакуум по термодинамическому вакууметру, до показателей 1,5...2 мА;
  - -выключить прогрев камеры;
  - -увеличить проток воды через нагреватель до максимума;
  - -продолжать откачку вакуумной камеры до показаний термодинамического вакуумметра 2,5...3,0, что соответствует вакууму 5...6 Па;
  - -при достижении указанного выше вакуума закрыть электроклапан №3 (байпасный) откачки камеры установки;
  - -открыть клапан №2 (форвакуумный) откачки диф. насоса;
  - -открыть электроклапан №1 (высоковакуумный затвор) и откачать камеру на высокий вакуум до 3...6 x 10<sup>-1</sup> Па, что соответствует показаниям 7 мА по шкале термодинамической части вакуумметра ВИТ-3;
  - -включить ионизационную часть вакуумметра ВИТ-3:
    - ток эмиссии 5 мА;
    - проверить «0»;
    - переключить в положение «Измерение»;
  - -продолжать откачку камеры установки «Булат-6М», контролируя вакуум по шкале ионизационной части вакуумметра ВИТ-3 до 1...5 x 10<sup>-3</sup> Па, что соответствует 1...2 мА на диапазоне x10<sup>-4</sup>;
  - -закрывать высоковакуумный затвор – электроклапан №1 в положение «Закрывается»;
  - -включить тумблер натекателя №2 и подать в камеру азот – до 1...2 мА по шкале термодинамической части ВИТ-3, затем отключить тумблер натекателя №2;
  - -охладить образец в азотном вакууме.
4. Открыть клапан напуска воздуха в камеру и выровнять давление до атмосферного.
5. Открыть камеру и извлечь образец.