

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И СРОКА СЛУЖБЫ ДЕТАЛЕЙ МА-ШИН МЕТОДАМИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ И НАПЫЛЕНИЯ

*Введение*

- 1. Основные способы напыления покрытия*
- 2. Строение и свойства напыленных покрытий*

## *Введение*

Большое значение в решении проблемы восстановления и повышения работоспособности деталей машин отводится методам термической металлизации и напыления, являющимся одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих получение покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. С помощью этих методов можно не только восстанавливать размеры деталей, но и наносить на их рабочие поверхности слои с высокой износо- или коррозионной стойкостью, жаростойкостью или высокими антифрикционными и теплоизоляционными свойствами.

Основными достоинствами процессов газотермического напыления, используемых для восстановления и упрочнения деталей, является незначительный нагрев изделия и практическое отсутствие его деформаций, возможность нанесения покрытий толщиной до 5 мм и более с любыми заданными свойствами из любых металлов и неметаллов. Покрытия можно наносить на металлические изделия, независимо от физико-механических свойств материалов, из которых они сделаны, а также на неметаллические материалы - керамику, бетон, кирпич, дерево, ткани, бумагу, стекло и пр.

К недостаткам процессов газотермического напыления металлизации следует отнести слабую адгезию покрытия с подложкой, более низкие прочностные и пластические свойства металлизационных слоев по сравнению с наплавленными, повышенные потери материала при нанесении покрытий на малогабаритные изделия. Несмотря на это, благодаря своим широким технологическим возможностям нанесения покрытий из любых материалов, малогабаритности и легкости распылительных устройств, возможности их использования как в стационарных, так и в полевых и монтажных условиях, процессы газотермического напыления находят всё более широкое применение.

# *1. Основные способы напыления покрытия*

В зависимости от вида источника тепловой энергии, используемого для расплавления напыляемого материала, различают газовый, плазменный, электродуговой, детонационный и другие способы напыления.

При газопламенном напылении источником тепловой энергии является пламя, образующееся в результате горения горючего газа в кислороде. В высокотемпературную зону пламени в виде проволоки, прутка или порошка подается распыляемый материал, который расплавляется, разбивается газовым потоком на мельчайшие частички и наносится на поверхность изделия (Рис. 1).

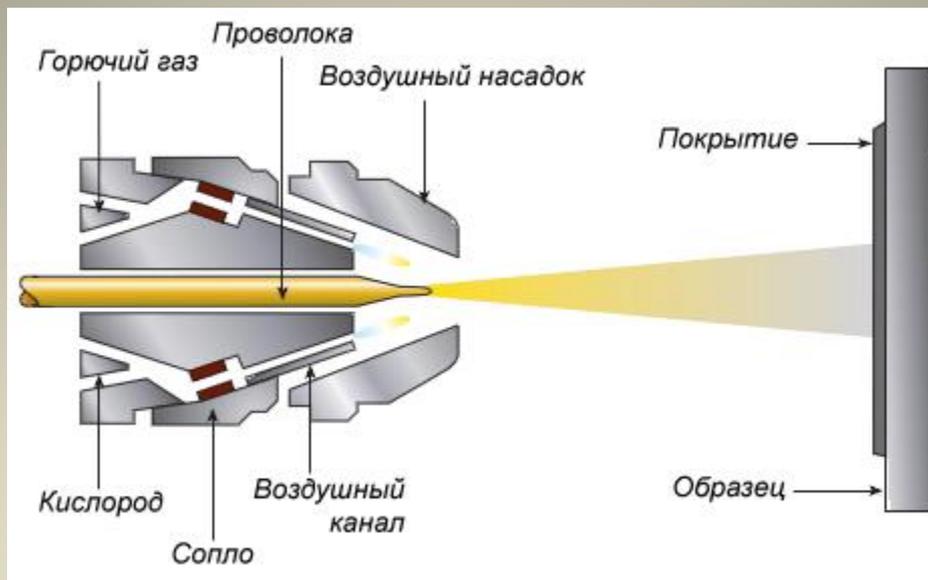


Рисунок 1 - Схема процесса газопламенного напыления покрытия



Газопламенный способ, несмотря на относительно невысокую производительность процесса, широко используется для напыления деталей с небольшим объемом восстановительных работ. Этот способ отличается высокой стабильностью процесса, простотой и низкой стоимостью используемого оборудования, хорошими санитарно-гигиеническими условиями труда, возможностью нанесения слоев значительной толщины (до 10 мм) без опасности образования трещин в покрытии и его отслоения [1].

Методом газопламенной металлизации можно наносить покрытия из всех конструкционных материалов, выпускаемых в виде проволоки или прутков. Газопламенный метод успешно используется для нанесения металлизационных покрытий из материалов, выпускаемых в виде гранулированных порошков, а также для нанесения слоев с высокой прочностью сцепления с использованием композиционных терморреагирующих порошков. [2,3].

Газопламенным методом можно наносить также покрытия из керамики, пластмасс и других неметаллических материалов с низкой температурой плавления.

При плазменном напылении (рис. 2) для плавления распыляемого материала, который подается в виде порошка или проволоки, используется энергия сжатой плазменной дуги, температура которой во много раз превышает температуру газового, пламени [4].

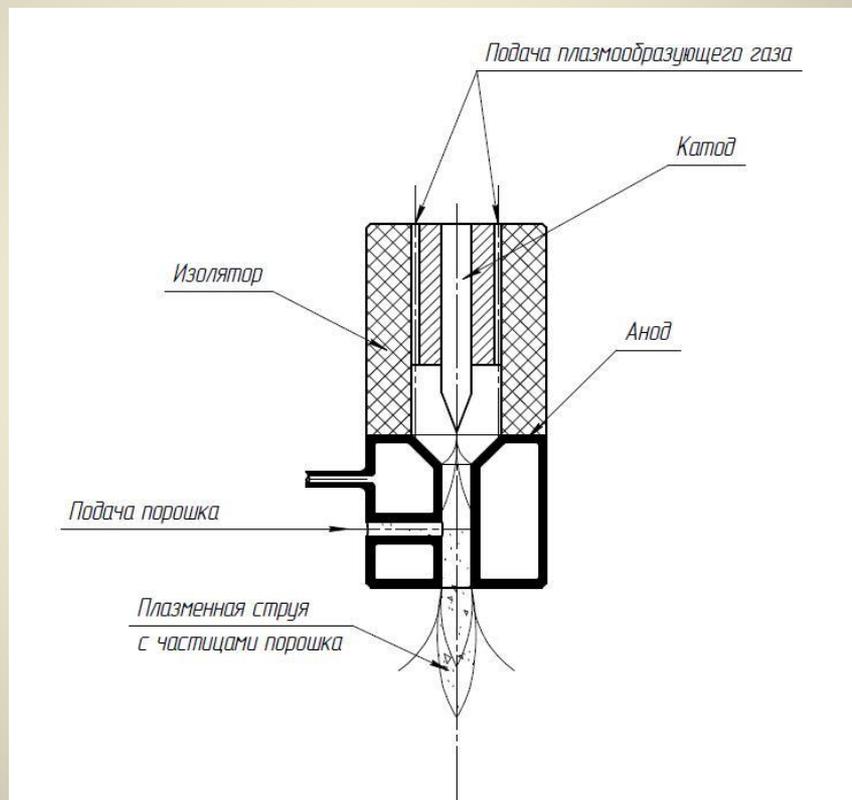
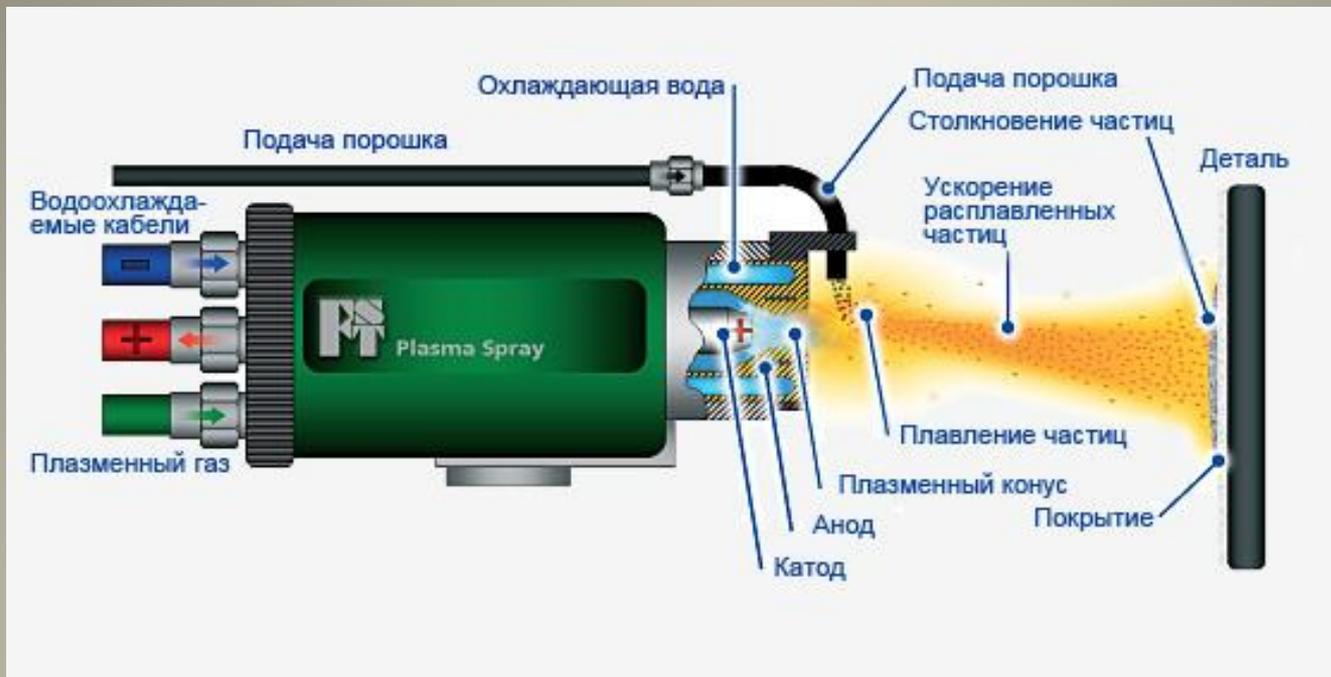


Рисунок 2 — Схема плазменного напыления



Установка ионно-плазменного напыления "Булат"



Универсальный вакуумный пост «Ника 2012» - малогабаритная вакуумная установка с большим количеством функций, предназначенная как для проведения исследовательских работ по нанесению и травлению слоев различных материалов, так и для ионно-плазменной обработки материалов и покрытий. Отличается удобством обслуживания и множеством легко перестраиваемых модификаций.

Универсальный вакуумный пост Ника 2012

## Основные параметры вакуумного поста

- Камера из нержавеющей стали диаметром 400 мм и высотой 350 мм. Безмаслянная турбомолекулярная откачка до высокого вакуума, безмасляный форвакуумный насос (можно использовать в помещениях без специальной вытяжной вентиляции).
- Интегральное безстоечное исполнение (занимает в плане площадь не более 2-х м<sup>2</sup>, включая зону обслуживания).
- Полностью автоматическую систему управления с большим дисплеем. Реализована функция дистанционного управления. Сохранение неограниченного количества технологических программ. Сохранение истории процессов в графическом виде.
- Большое количество разработанных для этой установки технологических устройств, взаимозаменяемых на 4-х позициях. (включают в себя магнетроны, ионные источники на постоянном токе, плазменные генераторы, термические испарители, нагреватель для подложек, карусель под 6 подложек диаметром 100 мм.)
- Современную автоматическую систему газонапуска под один рабочий газ (опционно – под любое разумное количество) на основе регуляторов расхода газа, с функцией стабилизации давления, или (для реактивных процессов) со стабилизацией связи ток-газ, напряжение –газ, по любой комбинации газовых каналов.

Это позволяет производить напыление любых тугоплавких порошковых материалов - оксидов, карбидов, нитридов. Распыление проволочных материалов может производиться по схеме "нейтральной" или "токоведущей" проволоки. В последнем случае на проволоку подается положительный потенциал от источника питания, а дуга горит между неплавящимся электродом и проволокой, что обеспечивает более высокую производительность ее распыления.

Технологии, реализуемые в другой конфигурации установки:

- Ионно-плазменные обработки поверхности, включая азотирование, карбонитрирование, борирование. Существенное повышение твердости и износостойкости деталей машин и механизмов.

Возможно комбинирование этого процесса с последующим нанесением сверхтвердых покрытий бескапельным магнетронным методом.

- Восстановительная обработка в водородной плазме, заменяющая высокотемпературный водородный отжиг.

- Окисление и травление органических материалов при применении кислородной плазмы.

- Нанесение металлов и их соединений методом ионно-плазменного распыления из мишеней малого размера (для драгоценных и редких материалов).

Покрyтия, полученные методом плазменного напыления, обладают высокой плотностью, хорошим сцеплением с основой, незначительным окислением напыляемого материала, так как в качестве плазмообразующего газа используются преимущественно инертные и безокислительные газы [3]. Процесс плазменной металлизации отличается большей производительностью по сравнению с газопламенной, однако для его осуществления требуется более сложное и дорогое оборудование и значительные эксплуатационные затраты.

Поэтому, данный способ целесообразно применять для напыления материалов, которые невозможно нанести газопламенным или электродуговым методом, или когда предъявляются повышенные требования к качеству напыленного слоя на очень ответственных изделиях.

Снизить затраты на процесс плазменного напыления можно путем использования вместо инертных газов в качестве плазмообразующего газа воздуха с добавками углеводородов [5,6]. Однако при этом все-таки имеет место большее окисление напыляемого материала, чем в инертных газах, что сказывается на качестве покрытия.

Дуговая металлизация основана на горении дуги между двумя плавящимися электродами, подаваемыми под углом друг к другу. Капли металла сдувают воздухом или другим газом на подложку. Диаметр проволоки 1,5-3 мм. Источник питания дуги – сварочный выпрямитель. Обычно металлизатор закрепляется на стенке или держится в руках. Метод используется главным образом для нанесения цинковых и алюминиевых покрытий

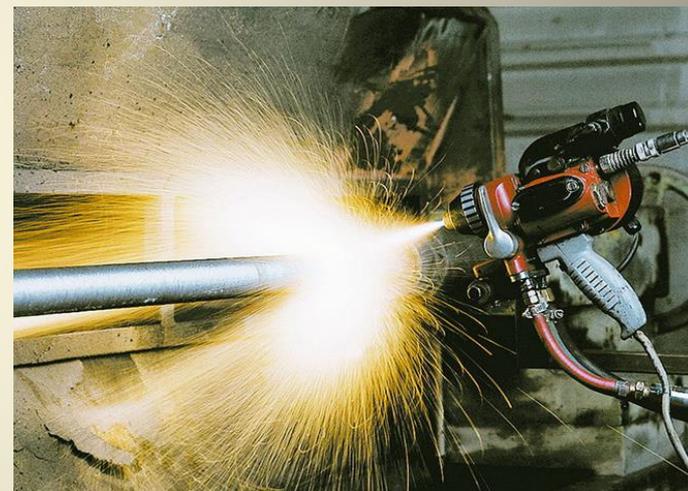
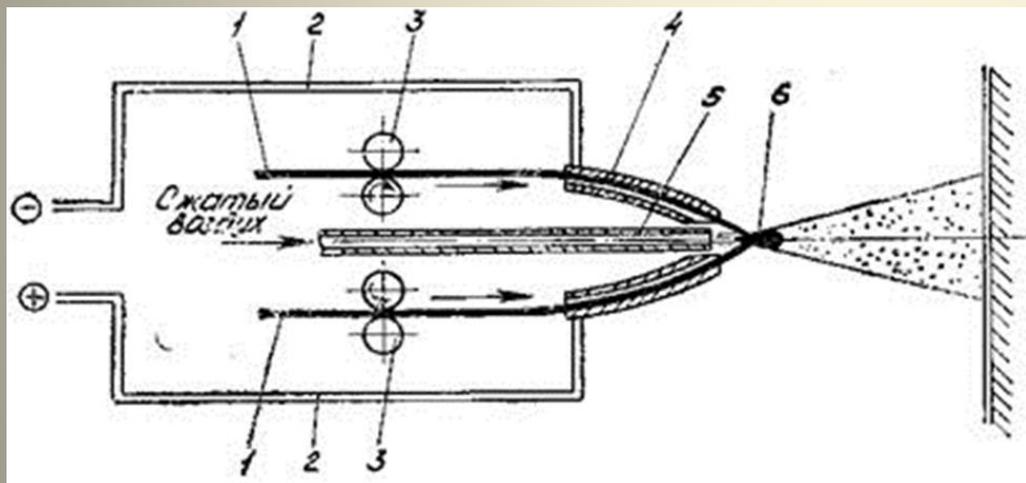


Рис. 3 - Схема электродугового металлизатора: 1 – электроды; 2 - электрические провода; 3 – подающие ролики; 4 – наконечник; 5 – воздушное сопло; 6 – электрическая дуга.



Установка «УЭМ-500-ТЛ». Принцип работы установки основан на подаче двух электропроводных проволок, оплавливающих в электрической дуге и, расплывающихся подведенным сжатым воздухом. Нанесенное покрытие образуется из-за удара расплавленных частиц и затвердеванию образовавшихся пластинок на защищаемом изделии.

Нанесение покрытий производится различными типами проволок диаметром 1,6-2,5 мм (для тугоплавких металлов - до 2 мм) на поверхность, предварительно подготовленную абразивоструйной обработкой.

Так как структура покрытия является пористой, для его долговечности в большинстве случаев требуется дополнительная пропитка лакокрасочным материалом. Установка позволяет наносить антикоррозионные, восстановительные, упрочняющие, износостойкие и другие покрытия. Покрытия наносятся при положительной температуре окружающего воздуха и имеют толщину 80-200 мкм. При необходимости толщину наносимого покрытия можно увеличить.

Производство работ может проходить как в условиях строительной площадки, так и в специально оборудованных камерах (боксах).

### Устройство установки УЭМ-500 ТЛ

Установка представляет собой модульную систему, в которую входит мобильный источник тока мощностью до 500А с жёсткой характеристикой пульт управления источником тока с размоточным устройством, электромеханическим устройством подачи проволоки и блоком подготовки воздуха

пистолет (металлизатор)

пакет кабелей и шлангов.

Отдельно вынесенный пульт управления с размоточным устройством, блоком подготовки воздуха позволяет производить работы на расстоянии более 30 м от источника тока, имея напряжение на пистолете (металлизаторе) 20-40 V. Это особенно актуально при проведении работ в резервуарах, конструкция которых и техника безопасности не позволяет разместить в них источник тока. Нанесение антикоррозионных покрытий в условиях работы на строительной площадке также более простое, экономичное и производительное, чем, например, установками газопламенного напыления.



### Технические характеристики металлаторов

Параметры		ЭМ-14М	ЭМ-01
Номинальная производительность по распыленному материалу	кг/ч	Алюминий	12,5
		Цинк	40,0
Диаметр распыляемой проволоки	мм	Алюминий	1,5-2,0
		Цинк	1,5 - 2,5
Номинальная частота	Гц	50/60	50/60
Рабочий ток дуги	А	50-400	190-250
Рабочее напряжение дуги	В	17-40	22-30
Рабочее давление сжатого воздуха	МПа	0,5-0,6	0,6-0,8
Габариты	мм	230x220x133	240x225x140
Масса	кг	2,3	2,8



ARCJET GUN-400 допускает распылять цинк, алюминий, нержавеющей сталь, молибден, бронзу, латунь, медь, а также порошковые проволоки (в т.ч. самофлюсующиеся). Образующиеся покрытия защищают основной металл детали от коррозии, различных видов изнашивания создавая эффективный барьер для данных дефектов.

С помощью установки ARCJET GUN-400 можно наносить защитные покрытия как на новые детали, так и на бывшие в эксплуатации. Высокая производительность установки допускает значительно сократить время нанесения покрытий.

Установка может поставляться как с пневмоприводом подачи проволоки - для нанесения покрытий в полевых условиях, так и с электроприводом подачи проволоки - для работы в стационарных условиях. В данном металлизаторе могут применяться проволоочные материалы диаметром от 1,6 до 2,0 миллиметров. Данное оборудование отличается высокой надежностью и качеством получаемых покрытий.

Электродуговая металлизация используется для нанесения покрытий из черных и цветных металлов и сплавов, выпускаемых в виде проволок. Этим методом можно распылять как цельнотянутые, так и композитные и порошковые проволоки. В случае одновременного использования при распылении двух проволок из разных материалов (например Fe и Al), электродуговым методом получают композиционные покрытия в виде псевдосплавов, отличающиеся высокими антифрикционными свойствами. Для обеспечения широкого диапазона составов композиционных покрытий, получаемых путем распыления разнотипных проволок, подаваемых в зону плавления с различной скоростью, разработан способ дуговой металлизации, при котором распыляющий воздух подается соосно одной из проволок [7]. Это обеспечивает разную скорость плавления проволок без нарушения процесса распыления и позволяет получать покрытия различных составов с высокими эксплуатационными свойствами.

При дуговой металлизации достигается высокая плотность и прочность сцепления покрытия с основой, однако величина внутренних напряжений в электродуговых покрытиях больше, чем в газопламенных, вследствие чего увеличивается вероятность их разрушения при напылении толстых слоев. Степень окисленности напыляемого материала при электродуговом распылении несколько выше, чем при плазменном и газопламенном.

Детонационно-газовый метод напыления является одним из видов газотермического нанесения покрытий, использующих энергию горючих газов (в основном пропан-бутана) в смеси с кислородом, а также со сжатым воздухом (азотом, аргоном). Детонационно-газовый метод, используя энергию взрыва газовых смесей, является циклическим процессом, обладает высокой удельной мощностью и значительным упрощением преобразования энергии в полезную работу.

Преимуществами детонационного метода напыления являются:

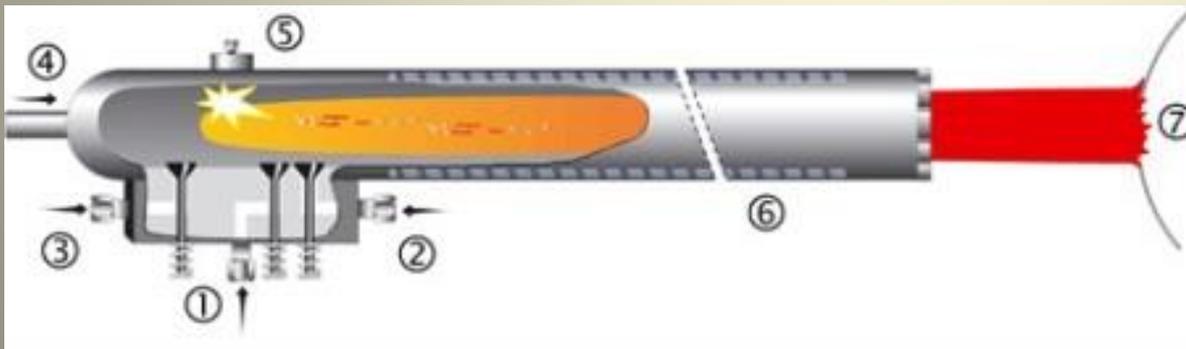
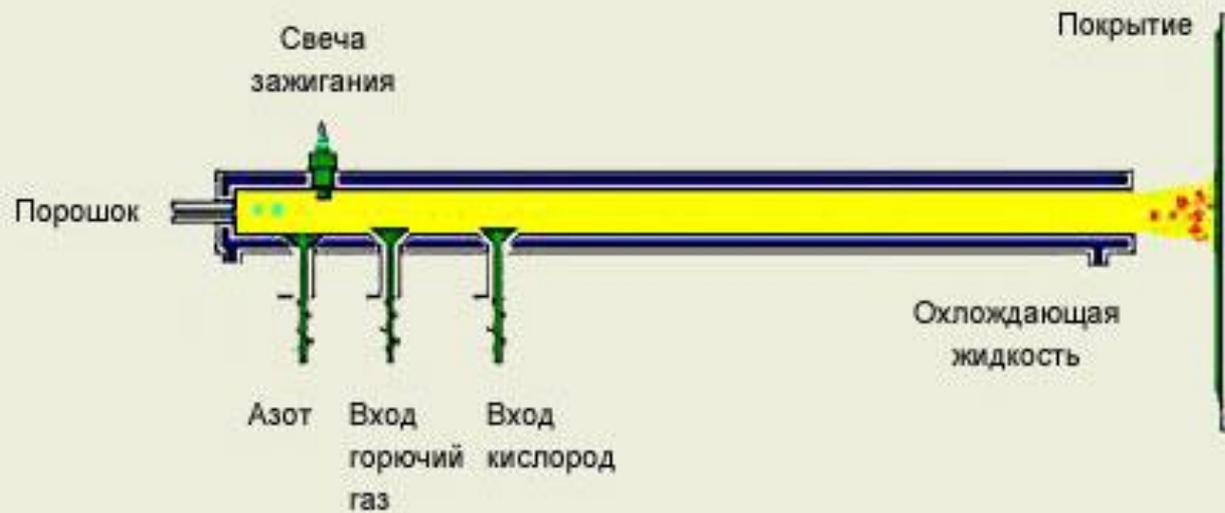
- высокая адгезия покрытия (80-250 МПа)
- низкая пористость покрытия (0,5-1%)
- отсутствие деформации напыляемой детали

К недостаткам следует отнести низкую производительность и недостаточную надежность существующего оборудования.

Технология детонационно-газового напыления позволяет не только восстановить рабочие поверхности деталей, но и существенно повысить эксплуатационный ресурс за счет применения износостойких материалов. Детонационно-газовый способ позволяет наносить покрытия из металлов, их сплавов, оксидов и карбидов металлов, композиционных порошков (плакированных и конгломерированных) а также механических смесей.

Тенденция развития газотермических износостойких покрытий заключалась в увеличении прочности и плотности покрытий. С этой целью была разработана фирмой Union Carbide (UC), США в 50-х годах высокоскоростная детонационная установка. Скорость истечения газов на срезе ствола длиной 1,4 м составляла 1300 м/с. Плотность покрытий была доведена до 98 %. Главным недостатком процесса напыления на детонационной установке была низкая производительность, связанная с дискретным режимом работы.

В зависимости от конструкции установки частота циклов может достигать 8-10 Гц, но в большинстве случаев она равна 3-4 Гц. Кроме ацетилена, в качестве горючего могут использоваться другие газы, например, метан или пропан-бутан. При этом протяжённость зоны перехода горения в детонацию увеличивается. Для снижения температуры нагрева частиц напыляемого материала взрывчатая смесь разбавляется азотом или воздухом. Нагрев частиц до пластического состояния в сочетании с приобретаемой значительной кинетической энергией позволяет получать покрытия с высокой прочностью сцепления (до 250МПа) и низкой пористостью (менее 2%).



Детонационное  
напыление: 1 - подача  
ацетилена, 2 - кислород, 3  
- азот, 4 - напыляемый  
порошок, 5 - детонатор, 6 -  
водоохлаждающая труба,  
7 - деталь



Детонационное напыление



Пушка «CCDS2000»



Блок управления



Пушка «CCDS2000» на  
специализированном  
координатном  
манипуляторе.

на  
3-х  
роботе-



Пушка «CCDS2000» на  
промышленном роботе.



Упрочнение лопаток компрессора авиационного двигателя.



Упрочнение шнека пульпонасоса.



Керамическая изоляция медных шин высоковольтного трансформатора.



Металлизация керамики.

Процесс детонационного напыления характеризуется значительным количеством технологических параметров. Основные из них :

- глубина загрузки порошка, т.е. расстояние от места ввода порошка до среза ствола
- соотношение расходов газов:
  - горючего
  - кислорода
  - азота или воздуха, т.е. состав рабочей взрывчатой смеси,
- степень заполнения ствола - отношение суммарного расхода газа за один цикл к суммарному объёму ствола и камеры смешения
- расход азота продувки ствола
- толщина напыляемого слоя за один цикл
- дистанция напыления
- химический и гранулометрический состав и способ изготовления порошка

От глубины загрузки зависит время пребывания частиц порошка внутри ствола, полнота физико-химического взаимодействия с продуктами детонации. Состав смеси существенно влияет на энергетические характеристики частиц порошка и определяет химическое взаимодействие напыляемого материала с продуктами детонации. В зависимости от состава рабочей смеси может происходить полное или неполное сгорание горючего газа. Оптимальной рабочей смесью может быть смесь, близкая к стехиометрической. Однако, максимумы скорости детонации и твёрдости покрытия из оксида алюминия (в данном случае твёрдостью определяют оптимальные условия формирования покрытия) не совпадают. В то же время при нанесении покрытия из карбидов избыток углерода в газовой смеси защищает карбид от обезуглероживания.

Толщина единичного слоя составляет 5-20 мкм. Дистанция напыления определяется из условия минимального воздействия на поток частиц отражённой от поверхности подложки волны. Практически для стволов различного диаметра эта величина составляет 150 - 200 мм.

## Строение и свойства напыленных покрытий

Формирование покрытий. В процессе напыления поток частиц имеет форму конуса, вершина которого совпадает с центром зоны плавления, а основание находится на поверхности напыляемого участка. Температура и скорость полета частиц по сечению металлизационного потока неодинаковы - по оси конуса расплыва они имеют максимальное значение, на периферии - минимальное. Конкретные значения температуры и скорости полета частиц будут зависеть от способа распыления, технических возможностей распылительной головки, ре распыления и теплофизических свойств материала. Как правило, темпе частиц близка к температуре их плавления или несколько ее превышает (рис. 4).

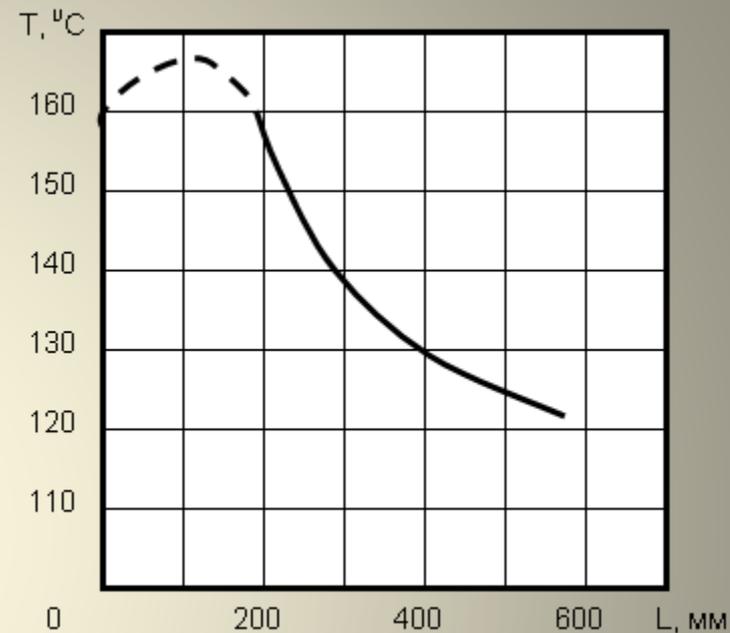
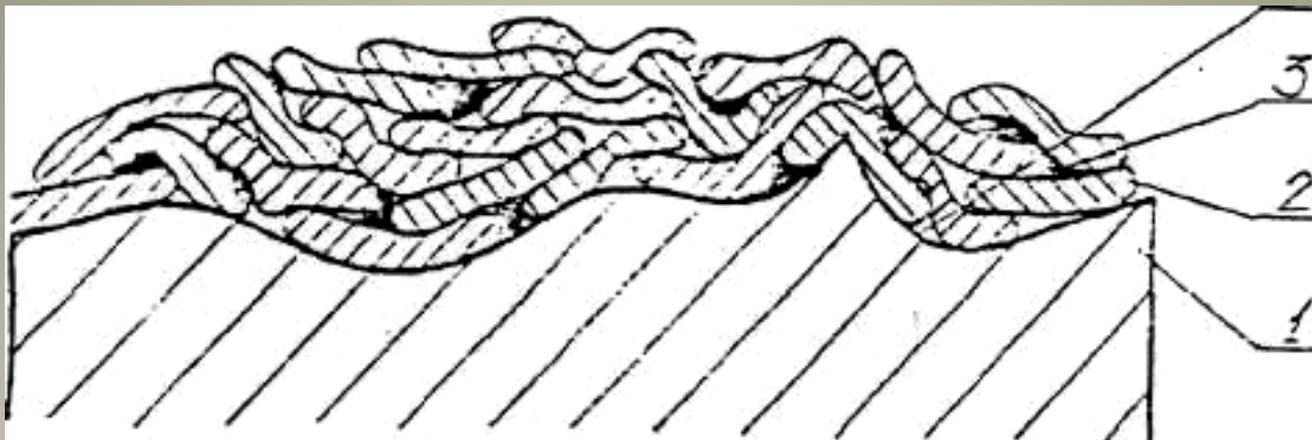


Рисунок 4 — Средняя температура частиц металлизационного потока на различном удалении от зоны плавления при распылении малоуглеродистой проволоки электродуговым методом

Скорость полета частиц в начальной части конуса распыла составляет от 100 до 1000 м/с. в зависимости от конструкции распылительной головки. По мере удаления от зоны распыла скорость частиц уменьшается.

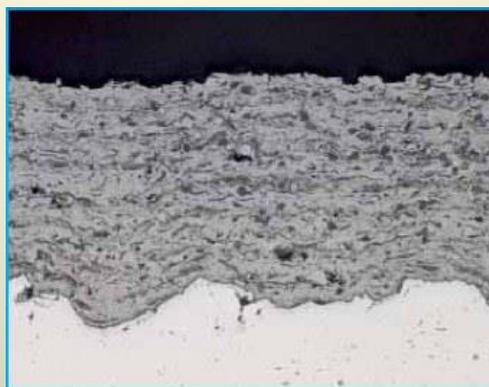
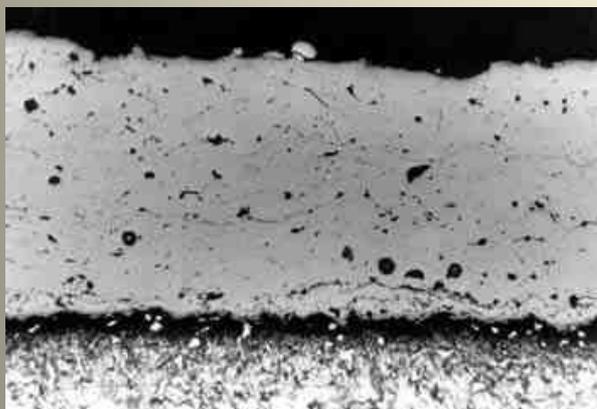
При соударении с поверхностью изделия частички сплющиваются и заклиниваются в микро неровностях поверхности. Их размер по толщине при этом уменьшается, а в поперечных направлениях - увеличивается в десятки раз. В процессе деформации частичек пленка оксидов на их поверхности разрушается и материал частички сближается с материалом поверхности изделия на расстояния, при которых возможно установление межмолекулярных связей. Чем большая температура и кинетическая энергия частиц, тем большее влияние оказывают химические связи и процессы взаимодиффузии материалов на адгезионную прочность покрытий.

В результате многократного наслоения частиц и сцепления их с поверхностью изделия и между собой образуется как бы "чешуйчатое" покрытие с микро пустотами и включениями разрушенных оксидных пленок (рис. 5). Пористость и окисленность покрытий будут зависеть от способа и режимов распыления. Чем больше дистанция напыления, тем более пористым будет покрытие с большим содержанием оксидов и меньшей адгезионной прочностью.

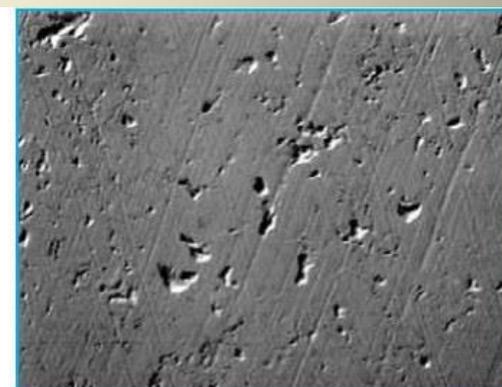


1 — подложка; 2 - «сформированная частичка»; 3 - оксидное включение; 4 -  
пора

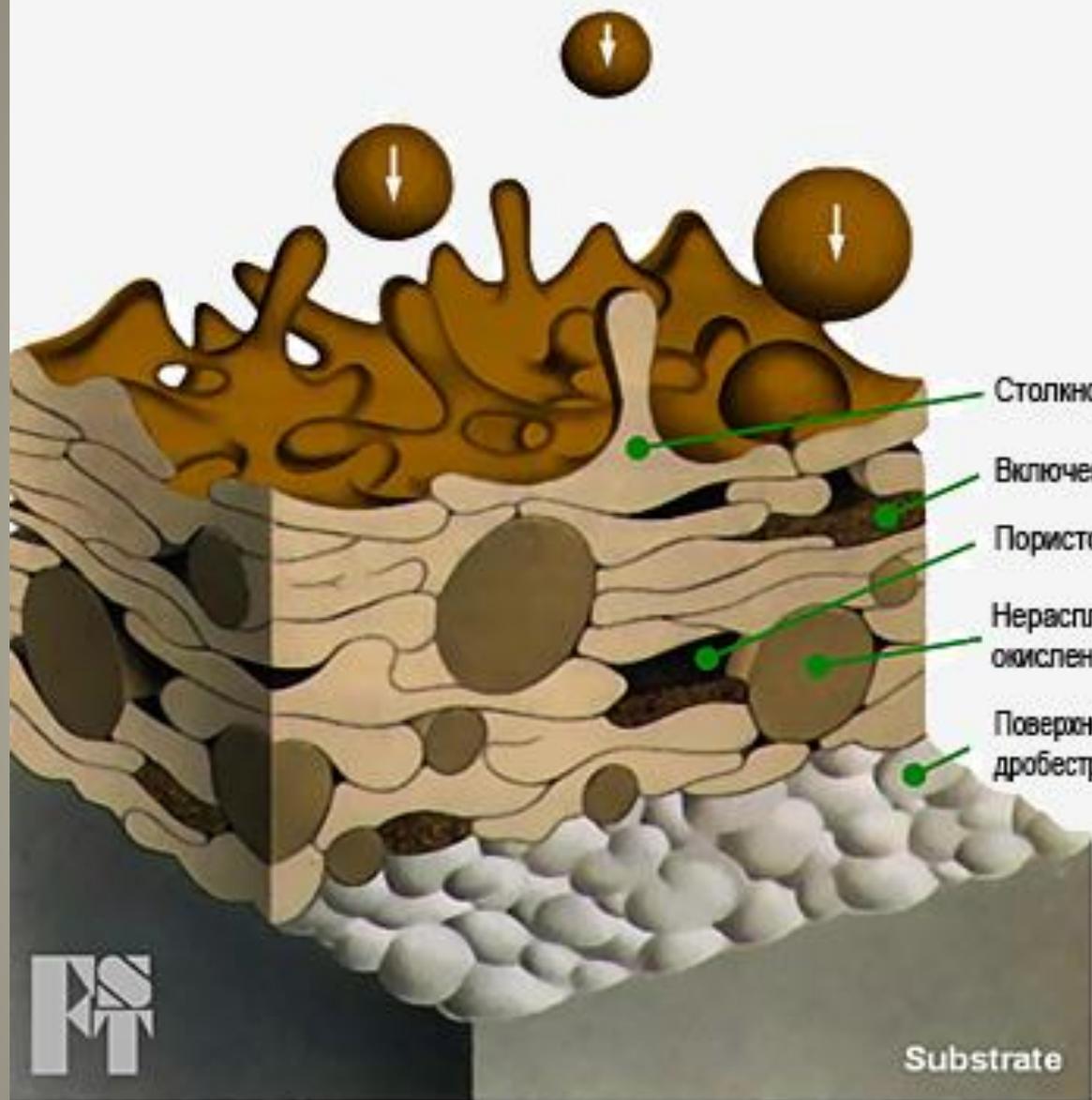
Рисунок 5 — Схема строения покрытия



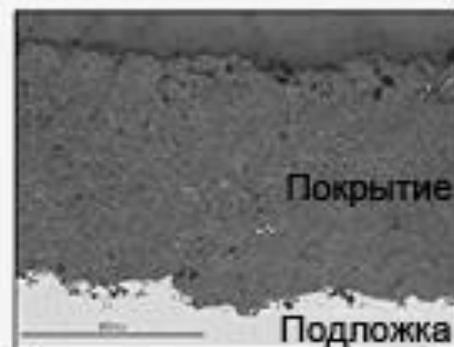
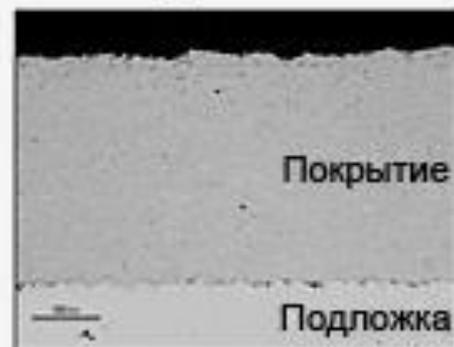
Изобр. 4



Изобр. 5



### Металлография



Схематичное изображение газотермического покрытия

Электродуговое напыление металла

Наибольшее содержание оксидов в составе покрытия при напылении металлических материалов будет при электродуговом распылении - до 10,5% [1], наименьшее - при плазменном распылении с использованием инертных плазмообразующих газов (<1,5%). Пористость покрытий при газопламенном распылении составляет 10-18%, при плазменном и электродуговом — 3-12%, при детонационном - <1%.

Окисление частичек при распылении ведет к снижению содержания легирующих элементов в покрытии по сравнению с их содержанием в исходном материале. Особенно интенсивно в металлических материалах выгорают C, Si, Mn. При электродуговом напылении сталей содержание углерода может уменьшаться наполовину, кремния и марганца - на 20-30%. При газопламенном и плазменном их угар не превышает 8-15%.

Уменьшение содержания таких элементов как хром, никель даже при дуговом напылении составляет не более 5-8% от их первоначального содержания, что позволяет использовать электродуговой способ для нанесения покрытий не только из углеродистых, но и высоколегированных сталей и цветных металлов и сплавов.