Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ Специальное машиностроение

КАФЕДРА Технологии ракетно-космического машиностроения

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:

Разработка технологии и технологической оснастки для нанесения износостойких покрытий на бурильный инструмент лунохода и марсохода

Студент СМ12-121		**А.С.Прусс**
(Группа)	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Руководитель ВКР		**О.В.Зарубина**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Консультант по технологической части		**О.В.Зарубина**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Консультант по проектно-конструкторской части		**Л.П. Мухамедов**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Консультант по экономической части		**В.Н. Ключко**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Консультант по охране труда и экологии		**О.В. Кирикова**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)
Нормоконтролер		**А.Н. Мирсков**
	(Подпись, дата)	(И.О.Фамилия)

2021г.

РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 155 с., 35 рис., 18 табл., 11 источников.

ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, УПРОЧНЕНИЕ, ШАРОШКИ, БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ, ПЛАЗМЕННАЯ СТРУЯ, ПЛАЗМАТРОН, РОТОРНЫЙ ДОЗАТОР.

Объектом разработки является технология и технологическая оснастка для нанесения износостойких покрытий.

Цель работы – разработка технологического процесса и необходимой оснастки для нанесения износостойких покрытий на бурильный инструмент лунохода и марсохода.

Поставленная цель достигается за счет применения технологии плазменного напыления; проведения контроля операции; расчета и испытаний образцов инструмента.

Содержание

РЕФЕРАТ.....2
Введение.....5
1. Выбор метода упрочнения шарошек буровых инструментов лунных и марсианских станций.....16
1.1. Строение и состав Луны.....18
1.2. Свойства марсианской поверхности.....19
1.3. Строение и состав Марса.....21
1.4. Выбор материала покрытия.....23
1.5. Выбор метода упрочнения.....27
1.6. Методы нанесения покрытий и их основные технико-экономические показатели.....32
1.6.1. Методы газотермического нанесения покрытий.....33
1.6.2. Детонационные способы нанесения покрытий.....34
2. Конструкторская часть.....36
2.1. Устройство и принцип работы плазматрона.....36
2.2. Выбор режимов напыления.....43
2.3. Структура математической модели.....43
2.4. Энергетические и тепловые характеристики плазматрона.....45
2.5. Тепловые и динамические параметры плазменной струи.....50
2.6. Термодинамические и переносные свойства плазмообразующих газов 55
2.7. Расчет параметров частиц в плазменной струе.....62
2.8. Влияние режимов плазменного напыления на свойства покрытий.....72
3. Проектная часть.....75
3.1. Назначение участка плазменного напыления.....75
3.2. Состав участка плазменного напыления.....75
3.3. Требования к оборудованию и помещениям.....75
4. Технологическая часть.....80
4.1. Операционный технологический процесс.....80
4.1.1. Подготовка порошков.....83
4.1.2. Вспомогательные материалы.....84
4.1.3. Подготовка поверхности детали, промывка и обезжиривание.....84
4.1.4. Предварительная механическая обработка.....85
4.1.5. Абразивно-струйная обработка.....88
4.1.6. Напыление.....89
4.1.7. Механическая обработка.....91
4.2. Контроль качества и дефектация.....96
5. Промышленная безопасность и экология.....106
5.1. Анализ опасных и вредных факторов, сопровождающих процесс плазменного напыления.....106
5.1.1. Пылегазообразные вещества.....108

5.1.2. Ультрафиолетовое излучение.....108
5.1.3. Шум и ультразвук.....109
5.2. Инженерные мероприятия по уменьшению воздействия вредных и опасных производственных факторов.....111
5.2.1. Опасные факторы.....111
5.2.2. Электробезопасность.....112
5.2.3. Вентиляция.....112
5.2.4. Защита от ультрафиолетового излучения.....113
5.2.5. Методы борьбы с шумом.....113
5.3. Расчет защиты от шума.....115
5.3.1. Средства индивидуальной защиты от шума.....118
5.4. Экологическая оценка проекта.....119
6. Организационно-экономическая часть.....121
6.1. Описание разработанной технологии.....121
6.2. Характеристики базовой технологии напыления.....122
6.3. Анализ объема выпуска изделия.....123
6.4. Трудоемкость по этапам проектирования.....124
6.5. Расчет затрат на разработку технологии плазменного напыления износостойкого покрытия.....125
6.6. Расчет величин капитальных затрат, связанных с внедрением в производство проектируемого технологического процесса.....130
6.7. Расчет технологической себестоимости напыления единицы продукции по проектируемому и базовому вариантам.....131
6.8. Затраты на электроэнергию.....134
6.9. Заработанная плата оператора плазменного напыления.....136
6.10. Амортизация оборудования.....136
6.11. Себестоимость изготовления годовой продукции по базовому и проектируемому вариантам.....138
6.12. Сравнение базового и проектируемого вариантов по статьям затрат себестоимости изготовления продукции.....139
6.13. Расчет показателей сравнительной экономической эффективности.140
Заключение.....143
Список использованных источников.....144
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....145

Введение

Бурное развитие космической техники позволяет думать, что колонизация космоса — вполне достижимая и оправданная цель. Целью полетов человека в космос должно стать обеспечение и увеличение возможности выживания через колонизацию космоса. Самодостаточные колонии в космосе, способные к последующей самостоятельной колонизации, обеспечат сохранность жизни в случае любых катастроф, которые могут произойти на Земле.

Колонизация космоса - это концепция расселения человечества, гуманизации пространства и постоянных человеческих поселений за пределами Земли. В настоящее время колонизация космоса является единственной консолидирующей идеей в мире, хотя существуют другие приоритеты и программы с двухтысячелетней историей, как, например, спортивные Олимпиады. Обычно, колонизация космоса рассматривается как долгосрочная цель любых национальных космических программ.

Первая колония может появиться на Луне, позже на Марсе, далее во всем пространстве Солнечной системы, позже в Поясе Койпера и в Облаке Оорта. Последние находятся за орбитой Урана и имеют триллионы комет и астероидов. На них могут быть все необходимые для поддержания жизни ингредиенты (водяной лёд, органические соединения и материалы для строительство космических станций) и большое количество гелия-3, который считается перспективным топливом для управляемых термоядерных реакций. Существует предположение, что расселяясь по таким облакам комет, человечество сможет достигнуть других звёздных систем без помощи субсветовых космических кораблей.

NASA выпустила план покорения Марса, основанный на том, что американский бюджет космические программы финансировать не будет. Поэтому новый сценарий колонизации Красной планеты ориентирован на привлечение частных инвестиций и полон маркетинговых идей. Смета всей

кампании — $160 млрд.: этой суммы NASA хватит, чтобы основать на Марсе колонию к 2030 г. Подробно рассмотрев вопрос окупаемости предприятия, в NASA заключили, что марсианскую экспедицию вполне реально сделать прибыльным проектом. Для этого нужно превратить ее в величайшее медиасобытие в истории человечества. Для NASA Марс — это действительно будущее: околоземная орбита освоена, на Луне американцы были. Следующей задачей, способной продвинуть космическую науку и промышленность США, должна стать колонизация Марса. Но администрация Барака Обамы считает, что космические исследования можно поручить частникам и не финансировать из бюджета, по крайней мере не финансировать полностью. И NASA просчитала вариант с частным финансированием, реализуя таким образом волю американского президента.

Коммерческая привлекательность Марса не исчерпывается медийными возможностями (хотя именно они на первом этапе обеспечат основное финансирование, будучи проданными заранее). Та страна, которая прибудет на Марс первой, получит во владение все открытые ею территории и ресурсы. А при желании — и всю планету. Поэтому NASA просчитывает проект, полагаясь на возможности именно американских компаний и американских технологий. В этом основное отличие американской концепции от тех идей в отношении Марса, которые высказывают представители российской космонавтики. Здесь считают, что проект по отправке человека на Марс стоит затевать только в широкой международной кооперации. В оценке стоимости самого мероприятия ученые NASA и эксперты Роскосмоса не расходятся. В ГКНПЦ имени Хруничева представил свои расчеты, по которым на реализацию марсианской программы нужно 4,8 трлн руб. Это те же $160 млрд, о которых пишут ученые NASA.

Крупнейший в России производитель космической техники ГКНПЦ имени М.В. Хруничева представил свой план колонизации Солнечной

системы. Создание орбитальных станций вокруг Луны и Марса с последующим строительством постоянно обитаемых баз на самих планетах возможно к 2040-2050 г., заверяют хруничевцы. По их оценкам, реализация этих целей потребует почти 5 трлн. руб. инвестиций. Проекты такого масштаба хруничевцы считают возможным осуществлять только силами межгосударственных консорциумов.

Доклад по «концептуальным положениям реализации планетных миссий» представил на Королевских чтениях в 2011г. заместитель гендиректора ГКНПЦ имени М.В. Хруничева Анатолий Кузин. По мнению специалистов «Хруничева», поход на другие планеты начинается с создания орбитальной сборочной платформы, куда можно запускать составные части межпланетных кораблей и поэтапно их собирать уже в условиях невесомости. Орбитальный «сборочно-экспериментальный комплекс», если будет поставлена такая задача, можно создать до 2037 г. В этой орбитальной мастерской из поэтапно прибывающих с Земли частей собирается модуль лунной орбитальной станции, который затем выводится на окололунную орбиту. С этой станции на Луне в несколько стадий строится сначала посещаемая, а со временем и постоянно обитаемая станция. Та же последовательность действий предложена и для колонизации Марса: сборка марсианского корабля на орбите Земли, создание орбитальной станции у Марса и лагерь на Красной планете.

Луна может предложить нам очень многое. Например, в состав её реголита (пылевидного слоя грунта на поверхности) входит множество химических элементов — кислород (40%), кремний (20%), железо (5—10%), алюминий (10%), кальций (10%), даже титан (3%) и магний (5%). Конечно, все эти сокровища необходимо ещё добыть. Ведь на Земле руду, содержащую меньше 25% железа, называют бедной, а меньше 16% вообще таковой не считают. В атмосфере Марса присутствуют углекислый газ (95%) и азот (3%). Основная составляющая почвы — кремнезём (20—25%), содержащий примесь гидратов оксидов железа (до 15%). В элементном

составе марсианской почвы преобладает кремний (20%), присутствуют железо (12%), алюминий и магний. И совсем недавно на Марсе был обнаружен водяной лёд.

Просчитав параметры будущих кораблей и орбитальных станций, хруничевцы определили приблизительную стоимость программы: потребуется 160 - 170 млрд. руб. ежегодных инвестиций с 2020 по 2050 г. При расчетах в ценах 2010 г. «Стоимость складывается из орбитальной составляющей – ее разработки, создания и эксплуатации – и средств выведения. В пропорции приблизительно 50:50», - говорит Анатолий Кузин. «Хруничев» разрабатывает и производит как средства выведения, так и орбитальные станции. И может рассчитать стоимость межпланетной экспансии, основываясь на реально существующих ценах. В 2010 г. она составит 4.8 трлн. руб. Для сравнения: этого объем вкладов Сбербанка РФ, или чуть меньше половины фондовых инвестиций в российскую экономику за прошлый год.

Оценивать вероятность реализации программы сейчас затруднительно, поскольку возможности и желание крупнейших стран финансировать походы в дальний космос зависят от состояния их экономик. А точно прогнозировать экономическую конъюнктуру на 10 лет вперед считается невозможным. Очевидно, что «Хруничев» предложил максимальный набор возможных действий: начать с Луны, которую обживать в несколько этапов. Многие, если не большинство стратегий космической индустрии вообще предлагают Луной не заниматься, чтобы не распылять ресурсы на то, что человеком уже исследовано, а сразу начать с Марса, тем более что в ближайшие годы будет возможность в несколько раз ускорить космические корабли за счет использования ядерных двигателей. «Луна интересна с точки зрения науки, ресурсов, обеспечения жизнедеятельности Земли, - говорит Анатолий Кузин. – Проект таких масштабов может реализовываться только широкой международной кооперацией».

Mars Sample Return Mission — межпланетная космическая миссия на Марс, целью которой является сбор образцов марсианского грунта и доставка его на Землю для анализа. Это совместный проект НАСА и ЕКА. Старт миссии запланирован на 2022 год, на Землю образцы прибудут предположительно в период с 2024 до 2025 года. Миссия будет включать в себя орбитальный и спускаемый аппараты. Целью орбитального аппарата будет доставка спускаемого аппарата до орбиты Марса, и затем доставка образцов грунта обратно на Землю. Спускаемый аппарат будет содержать модуль для подъема грунта на орбиту Марса. Доставка образцов грунта с Марса позволит провести более глубокий анализ и получить гораздо больше полезной информации, чем путём исследования их марсоходами и другими автоматическими зондами. Кроме того, присутствие образцов на Земле стирает все ограничения по времени исследования, что позволит изучать их ещё годы после завершения миссии. Образцы также подвергнутся лабораторной экспертизе на живые или мёртвые формы жизни. Однако, вопрос о поддержании жизни на протяжении месяцев во время транспортировки грунта от Марса к Земле остаётся открытым, потому что не известны условия, которые для этого нужны. Если мёртвые формы жизни и будут найдены в грунте, то будет трудно установить, были ли они живы в момент сбора образцов.

Экзомарс (англ. *ExoMars*) — совместная программа Европейского Космического Агентства (ЕКА) и Российского национального космического агентства (Роскосмос) по исследованию Марса.

Цели программы:

Научные цели программы Экзомарс в порядке очередности:

- Поиск возможных следов прошлой или настоящей жизни на Марсе.

- Характеристика водного и геохимического распределения на поверхности планеты.
- Изучение поверхности и окружающей среды на планете, выявление опасностей для будущих пилотируемых полётов на Марс.
- Исследование недр планеты, чтобы лучше понять эволюцию и возможность обитаемости Марса.
- По выполнению всех задач, успешно закончить миссию возвращением на Землю.

Технологические цели:

- Осуществление посадки большегрузных аппаратов на поверхность Марса.
- Использование солнечной электроэнергии на Марсе.
- Использование буровой установки для взятия образцов марсианского грунта.
- Развитие исследований при помощи марсоходов-роверов.

В 2018 году к красной планете будет отправлен Экзомарс Ровер. Экзомарс Ровер — высоко автоматизированный шестиколёсный вездеход, будет весить 270 кг. Также рассматривают уменьшенную версию с меньшим весом 207 кг. Инструментарий будет состоять из 10 кг полезной нагрузки «Пастер», содержащей, среди других компонентов, 2-метровый подповерхностный бур. Бур может работать в различных типах почв, а длина его сверла 2 метра. Перевозчик доставит модуль с помощью спускаемого аппарата на Марс, после чего кран системы посадки «Sky» обеспечит мягкую посадку с высокой точностью. После благополучного приземления на поверхность Марса, ровер, пользуясь солнечной энергией, начнёт свою шестимесячную миссию. Для борьбы с трудностями дистанционного управления из-за отставания связи, Экзомарс будет иметь автономное программное обеспечение для навигации визуального ландшафта, со сжатым стерео-изображением, с установленных панорамных

и инфракрасных камер на «мачте» марсохода. Для этого он создаст цифровые навигационные стерео карты с помощью пары камер, после чего автономно найдёт хорошую траекторию пути. Крупно-плановые камеры будут используются для обеспечения безопасности и предотвращения столкновений, что позволит безопасно проходить около 100 метров в сутки. После высадки и приземления ровера на поверхность Марса, Марсианский научный орбитальный аппарат будет работать как спутник-ретранслятор данных с марсохода.

Компания **Mars One** из Нидерландов планирует начать колонизацию Марса. По их расчетам человек высадится на этой планете в апреле 2023 года. Mars One верит, что стремление людей к исследованию солнечной системы выше амбиций частных корпораций и отдельных наций. Как и миссия Аполлона на Луну, колонизация Марса будет вдохновлять целые поколения, заставлять верить, что все возможно и все может быть достигнуто. Проект Mars One (Марс Один) планирует создать первые человеческие поселения на Марсе к апрелю 2023 года. Первый экипаж из четырех астронавтов эмигрирует на их новую планету с Земли после путешествия, которое займет семь месяцев. Новая команда будет присоединяться к поселению каждые два года. К 2033 году будет уже более двадцати человек, которые будут жить и работать на Марсе, в их новом доме.

Команда проекта Mars One работает над этим планом с начала 2011 года. В тот первый год были проведены широкие и исчерпывающие исследования целесообразности идеи, изучены все подробности с многочисленными специалистами и экспертными организациями. В этот анализ были включены не только технические элементы, но и всесторонне обсуждены финансовые, психологические и этические аспекты. Многие международные аэрокосмические компании, способные разрабатывать и поставлять основные компоненты оборудования для марсианской экспедиции, были заинтересованы в проекте. Mars One имеет

внушительный список людей, которые поддерживают миссию на Марс. Одним из них является профессор, доктор Жерар Хоофт, физик лауреат Нобелевской премии 1999 года.

Хронология

В **2011** году, члены проекта Mars One работали над миссией непублично. После того, как миссия была распланирована, Mars One связался с поставщиками необходимых компонентов. Все потенциальные поставщики были в восторге от аполитичного, коммерческого, пилотируемого полета на Марс и подтвердили свою способность производить компоненты по мере необходимости.

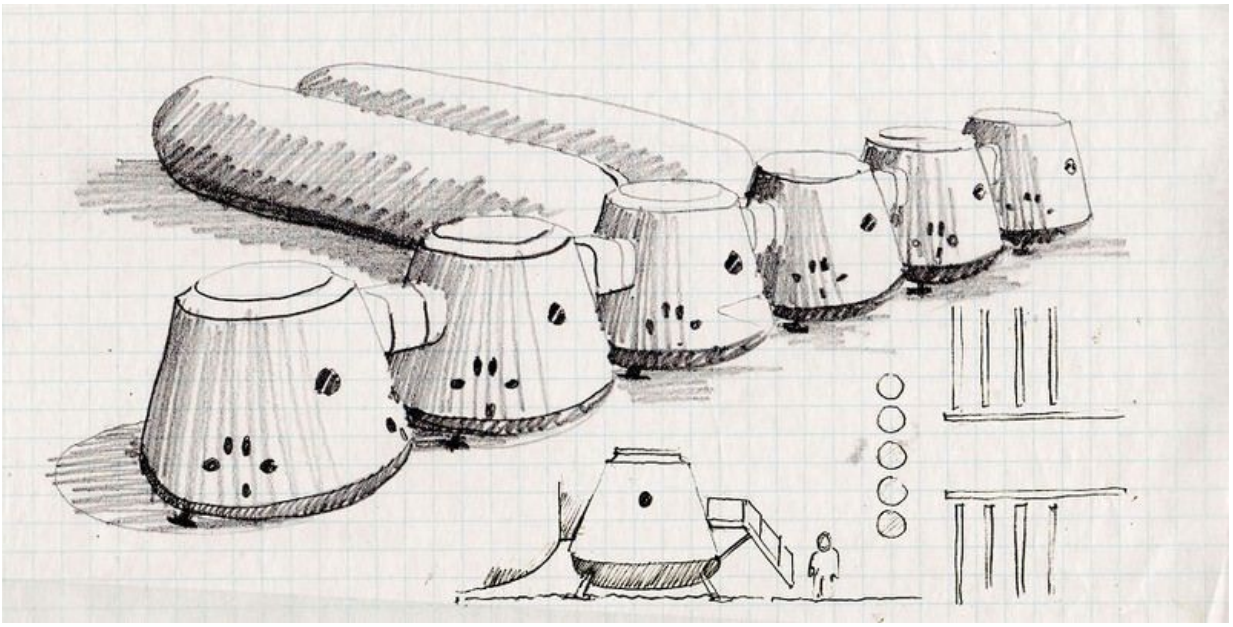


Рисунок 1 – Эскиз марсианской станции

2013.Это будет год, в котором начнется отбор астронавтов. Кто будет одним из первых четырех человек на Марсе и из тех, которые последуют за ними через каждые два года после этого? Любой, кто чувствует, что может справиться с этой задачей, может претендовать на эту должность. Там будет в общей сложности 40 астронавтов. Из желающих полететь отбираться

будут самые крепкие физически и психически. Марс Один построит копию марсианского поселения в пустыне на Земле, чтобы подготовить космонавтов и обеспечить реалистичное окружение, для проверки оборудования. Отбор космонавтов и их подготовка в смоделированной марсианской базе будет транслироваться по телевидению и в Интернете для публичного просмотра.

2014.Это будет год, в котором начнется подготовка к миссии поддержки. И продлится она вплоть до запуска в 2016 году. Также начнется производство первых марсианских спутников связи.

2016.Миссия поддержки будет запущена на Марс в январе 2016 года. Модуль приземлится на Красной планете в октябре 2016 года с грузом в 2500 кг продуктов питания или других материалов. Приземление будет совершено недалеко от того места, где предполагается расположение форпоста.

В ***2018*** году на Марс приземлится ровер. В то время как общее расположение базы будет известно, задачей марсохода будет поиск лучшего места в этой области.

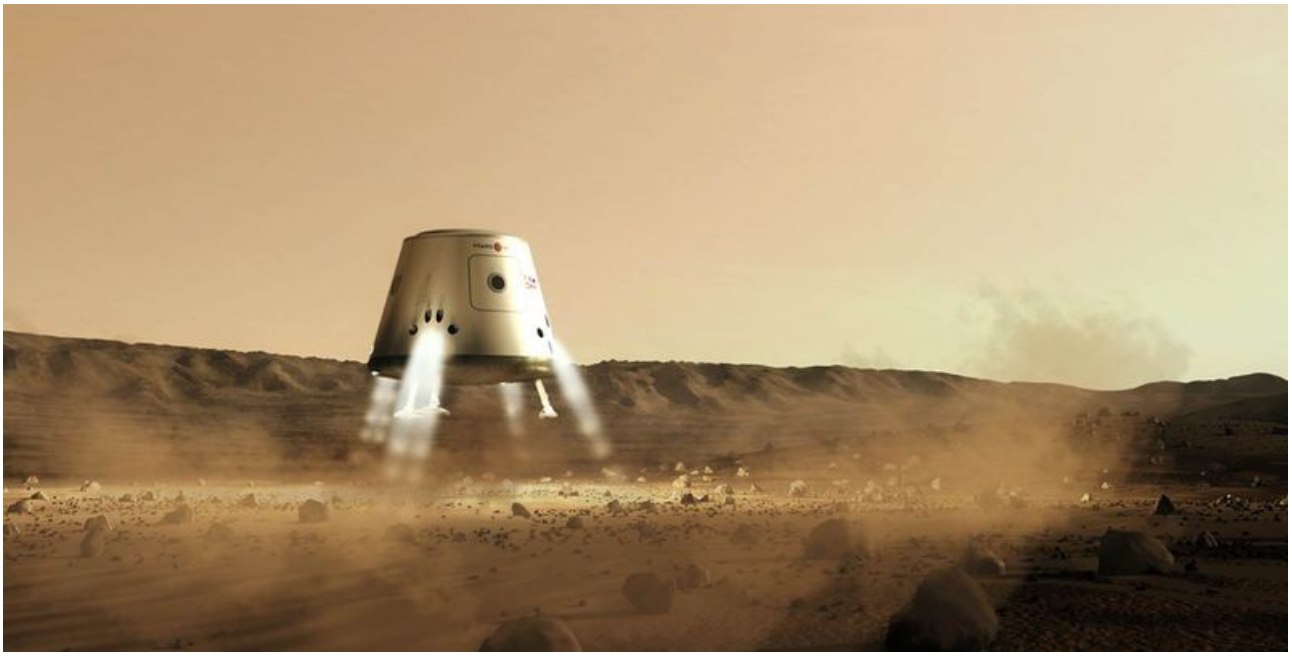


Рисунок 2 – Модель приземления ровера

В ***2021*** году все компоненты поселения достигнут пункта назначения. В целом это будут два жилых модуля, два модуля жизнеобеспечения, второй модуль поддержки, второй марсоход. Два марсохода транспортируют все компоненты в найденное место расположения базы и подготовят их к прибытию астронавтов.

2022.Вся вода и кислород для создания атмосферы будут готовы в начале 2022 года, когда земной экипаж получит добро на запуск первой команды. Каждый компонент транспортного корабля будет запущен на низкую околоземную орбиту, где они и будут собраны воедино. 14 сентября 2022 войдет в историю как начало полета первых четырех астронавтов после последней проверки. Каждый этап этого полета будет доступен для просмотра на сайте проекта в режиме 24/7.

Астронавты приземлятся в ***2023*** году и станут первыми людьми в истории, ступившими на Марс. Они соединят все модули поселения вместе с помощью роверов. Затем они установят солнечные панели, и начнут свое великое исследование Марса, их новой планеты.

В июне ***2025*** года приземлится вторая группа. К их прибытию строительство марсианской базы уже будет завершено. Вторая группа также привезет новое оборудование. Например, это могут быть еще несколько роверов, которые будут помогать им в освоении их новой планеты.



Рисунок 3 – Модель марсианской базы

1.

1. Выбор метода упрочнения шарошек буровых инструментов лунных и марсианских станций

Свойства лунной поверхности

На луне можно выделить три основных типа образований:

1) Моря – обширные, темные и довольно плоские участки поверхности, покрытые базальтовой лавой. Берега большинства морей представляют собой обрывы, а по дну тянутся невысокие валы в десятки метров. Моря наверняка связаны с вулканической деятельностью, с извержением богатой железом базальтовой лавой.



Рисунок 4 – Фото Луны

2) Материки – яркие приподнятые области, заполненные множеством больших и маленьких круглых кратеров, часто перекрывающихся, на долю которых приходится немногим более 83% площади поверхности Луны. Поверхность «материков», являющаяся более старой, гориста, ее уровень выше, чем у «морей», и разность средних высот достигает 2..3 км. Трещины и крутые каньоны шириной 1..2 км часто тянутся на сотни километров почти по прямой. Их глубина составляет от одной до нескольких сотен метров.

Эти разрывные трещины в лавовой коре часто параллельны краям морей. Некоторые из них напоминают меандры русел земных рек.

3) Горные цепи, столь знакомые нам на Земле, такие как Апеннины, довольно редки на Луне и много небольших горных систем – кольцевые структуры (цирки), подобные той, что окружают кратер Коперник. Основные цепи гор на видимой стороне Луны (Апеннины, Альпы и Кавказ) Конечно были сформированы столкновением, породившим Море Дождей. Концентрические цепи гор окружают и некоторые другие моря. Некоторые горы вдоль южного края Луны сравнимы по высоте с Эверестом. Максимальные высоты лунных гор ~ 5 км. Горы пологие с уклоном в 15-20°. Более гориста обратная сторона Луны. Уровень в круговых «морях» в районных несколько повышенной плотности лунной породы (в так называемых масконах) обычно более чем на километр ниже, чем у «морей» неправильной формы и уступает 4 км максимальной высоте материков.

1.1. Строение и состав Луны

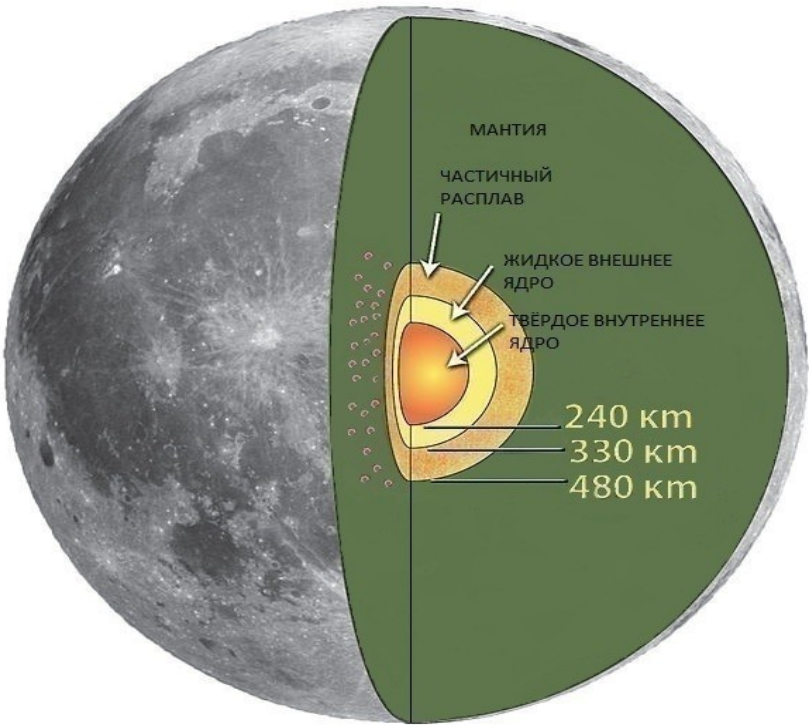


Рисунок 5 – Схема строения Луны

Плотность лунных пород составляет в среднем 3.343 г/см^3, что заметно уступает средней плотности для Земли (5.518г/см^3). Это различие связано главным образом с тем, что уплотнение вещества с глубиной проявляется на Земле значительнее заметнее чем на Луне. Имеются и различие в минералогическом составе лунных и земных пород: содержание оксидов железа в лунных базальтах на 25%, а титана – на 13% выше, чем в земных. Исследованные лунные грунты содержат 70 химических элементов. Основными лунными породами являются: 1) морские базальт, более или менее богатые железом и титаном; 2) материковые базальты, богатые камнем, редкоземельными элементами и фосфором; 3) алюминиевые материковые базальты – возможный результат ударного плавления; 4) магматические породы, такие, как анортозиты, пироксениты и дуниты. «Морские» базальты на Луне отличаются повышенным содержанием оксидов алюминия и кальция и относительно более высокой плотностью, что связывают с их глубинным происхождением. Цвет грунта от темно-

серого до черноватого. Обнаружены прозрачные и мутноватые капли-шарики. Лунный грунт обладает чрезвычайно низкой теплопроводностью, такой, что самые лучшие земные теплоизоляционные материалы передают тепло лучше лунного грунта.

1.2. Свойства марсианской поверхности

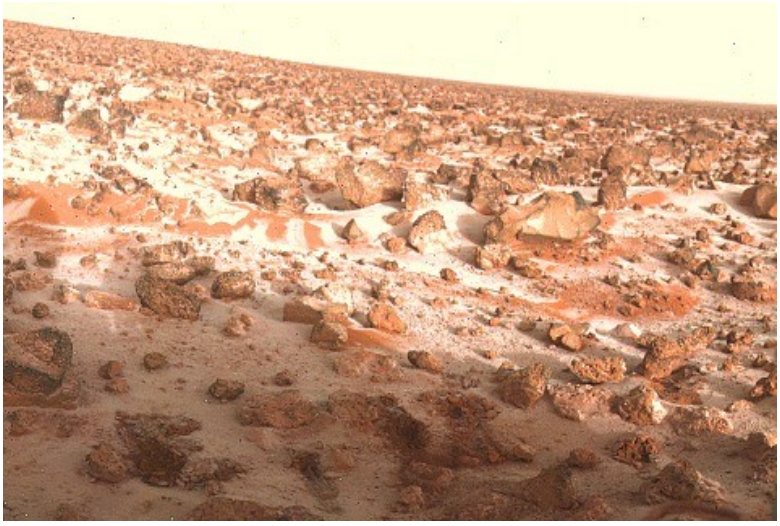


Рисунок 6 – Марсианская поверхность

Марс — планета земной группы с разреженной атмосферой (давление у поверхности в 160 раз меньше земного). Особенностями поверхностного рельефа Марса можно считать ударные кратеры наподобие лунных, а также вулканы, долины, пустыни и полярные ледниковые шапки наподобие земных. Две трети поверхности Марса занимают светлые области, получившие название материков, около трети — тёмные участки, называемые морями. Моря сосредоточены, в основном, в южном полушарии планеты, между 10 и 40° широты. Полушария Марса довольно сильно различаются по характеру поверхности. В южном полушарии поверхность находится на 1—2 км над средним уровнем и густо усеяна кратерами. Эта часть Марса напоминает лунные материки. На севере большая часть поверхности находится ниже среднего уровня, здесь мало кратеров, и основную часть занимают относительно гладкие равнины, вероятно, образовавшиеся в результате затопления лавой и эрозии. Большое

количество кратеров в южном полушарии предполагает, что поверхность здесь древняя — 3—4 млрд лет. Выделяют несколько типов кратеров: большие кратеры с плоским дном, более мелкие и молодые чашеобразные кратеры, похожие на лунные, кратеры, окружённые валом, и возвышенные кратеры. Последние два типа уникальны для Марса — кратеры с валом образовались там, где по поверхности текли жидкие выбросы, а возвышенные кратеры образовались там, где покрывало выбросов кратера защитило поверхность от ветровой эрозии. В области хаотического ландшафта вблизи границы полушарий поверхность испытала разломы и сжатия больших участков, за которыми иногда следовала эрозия (вследствие оползней или катастрофического высвобождения подземных вод), а также затопление жидкой лавой. Хаотические ландшафты часто находятся у истока больших каналов, прорезанных водой. Внешний вид Марса сильно изменяется в зависимости от времени года. Прежде всего, бросаются в глаза изменения полярных шапок. Они разрастаются и уменьшаются, создавая сезонные явления в атмосфере и на поверхности Марса.

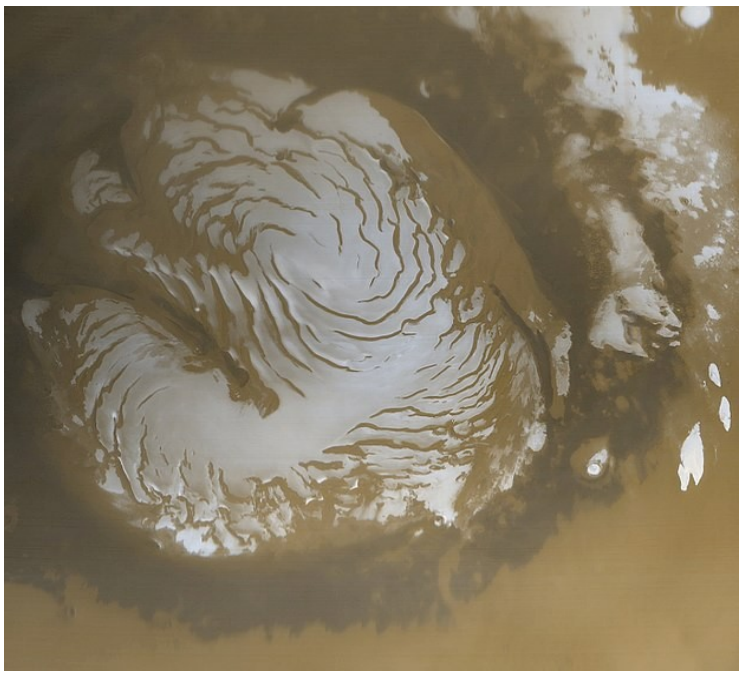


Рисунок 7 – Полярная шапка Марса

Полярные шапки состоят из двух составляющих: сезонной — углекислого газа и вековой — водяного льда. По данным со спутника *Марс Экспресс* толщина шапок может составлять от 1 м до 3,7 км. Аппарат «Марс Одиссей» обнаружил на южной полярной шапке Марса действующие гейзеры. Как считают специалисты НАСА, струи углекислого газа с весенним потеплением вырываются вверх на большую высоту, унося с собой пыль и песок. Весеннее таяние полярных шапок приводит к резкому повышению давления атмосферы и перемещению больших масс газа в противоположное полушарие. Скорость дующих при этом ветров составляет 10—40 м/с, иногда до 100 м/с. Ветер поднимает с поверхности большое количество пыли, что приводит к пылевым бурям. Сильные пылевые бури практически полностью скрывают поверхность планеты. Пылевые бури оказывают заметное воздействие на распределение температуры в атмосфере Марса. По фотографиям Маринера-7 удалось определить, что полярные шапки имеют толщину в несколько метров, а измеренная температура 115 K (-158 °C) подтвердила возможность того, что она состоит из замерзшей углекислоты — «сухого льда». Данные аппарата «Марсианский разведывательный спутник» позволили обнаружить под каменистыми осыпями у подножия гор значительный слой льда. Ледник толщиной в сотни метров занимает площадь в тысячи квадратных километров, и его дальнейшее изучение способно дать информацию об истории марсианского климата.

1.3. Строение и состав Марса

Современные модели внутреннего строения Марса предполагают, что Марс состоит из коры со средней толщиной 50 км (и максимальной до 130 км), силикатной мантии толщиной 1800 км и ядра радиусом 1480 км. Плотность в центре планеты должна достигать 8,5 г/см³. Ядро частично жидкое и состоит в основном из железа с примесью 14—17 % (по массе)

серы, причём содержание лёгких элементов вдвое выше, чем в ядре Земли. Согласно современным оценкам формирование ядра совпало с периодом раннего вулканизма и продолжалось около миллиарда лет. Примерно то же время заняло частичное плавление мантийных силикатов. Из-за меньшей силы тяжести на Марсе диапазон давлений в мантии Марса гораздо меньше, чем на Земле, а значит в ней меньше фазовых переходов. Предполагается, фазовый переход оливина в шпинелевую модификацию начинается на довольно больших глубинах — 800 км (400 км на Земле). Характер рельефа



и другие признаки позволяют предположить наличие астеносферы, состоящей из зон частично расплавленного вещества.

Рисунок 8 – Строение планет солнечной системы

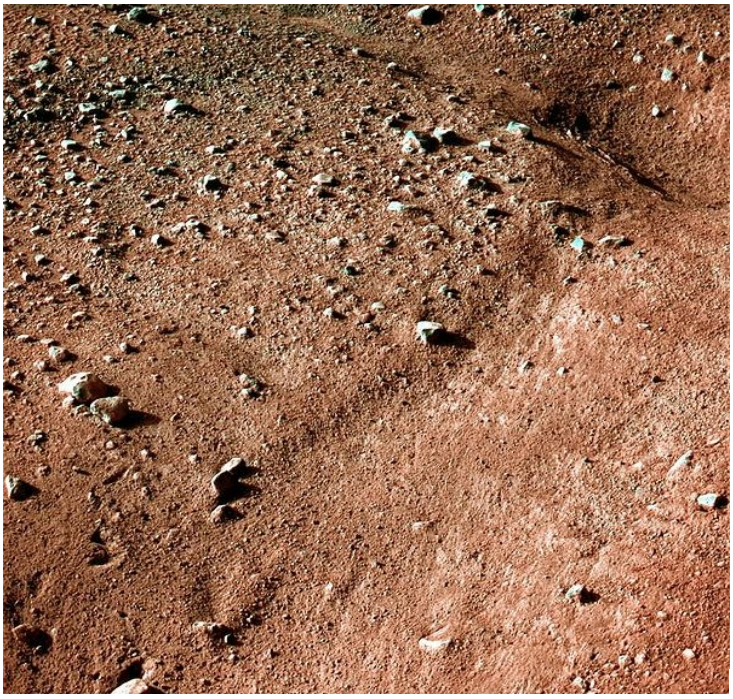


Рисунок 9 – Поверхностный слой марсианской почвы

Элементный состав поверхностного слоя марсианской почвы по данным посадочных аппаратов неодинаков в разных местах. Основная составляющая почвы — кремнезём (20—25 %), содержащий примесь гидратов оксидов железа (до 15 %), придающих почве красноватый цвет. Имеются значительные примеси соединений серы, кальция, алюминия, магния, натрия (единицы процентов для каждого).

Согласно данным зонда НАСА «Феникс» (посадка на Марс 25 мая 2008 года), соотношение pH и некоторые другие параметры марсианских почв близки к земным, и на них теоретически можно было бы выращивать растения. «Фактически, мы обнаружили, что почва на Марсе отвечает требованиям, а также содержит необходимые элементы для возникновения и поддержания жизни как в прошлом, так и в настоящем и будущем», сообщил ведущий исследователь-химик проекта Сэм Кунейвс. Также, по его словам, данный щелочной тип грунта многие могут встретить на «своём заднем дворе», и он вполне пригоден для выращивания спаржи.

В месте посадки аппарата в грунте имеется также значительное количество водяного льда. Орбитальный зонд «Марс Одиссей» также обнаружил, что под поверхностью красной планеты есть залежи водяного льда. Позже это предположение было подтверждено и другими аппаратами, но окончательно вопрос о наличии воды на Марсе был решен в 2008 году, когда зонд «Феникс», севший вблизи северного полюса планеты, получил воду из марсианского грунта.

1.4. Выбор материала покрытия

Бурильный инструмент необходимо делать из титана чтобы вся конструкция была легче, но титан не износостойкий материал поэтому необходимо нанести на него износостойкое покрытие.

Выбор материалов для нанесения упрочняющих покрытий определяется видом износа. В свою очередь вид износа зависит от условий

работы машины, агрегата, узла. В поставленной задаче детали работают в условиях сильного ударно-абразивного износа.

Выбор материала покрытия оптимального состава вызывает определенные трудности, поскольку наплавка слоев с заданными физико-механическими свойствами зависит от многих факторов: состава материала покрытия, состава металлической основы детали, характера взаимодействия легирующих элементов, способа и режимов нанесения покрытия и др.

При восстановлении деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа, используют твердые порошковые сплавы, которые во много раз повышают срок службы этих деталей. Твердые сплавы особого класса – это износостойкие металлические материалы, обладающие высокой твердостью и сохраняющие ее при высоких температурах в процессе работы. Для твердых сплавов характерно содержание большого количества карбидов и боридов, сцементированных соответствующей эвтектикой. Название “твердые сплавы” условное, поскольку большинство из них имеют твердость ниже твердости закаленных высокоуглеродистых сталей, которая составляет HRC 56-60. Однако, износостойкость сплава, например, ПГ-С1, твердость которого HRC 45-50, выше, чем у сталей.

Износостойкость напыленных слоев определяется не только наличием в сплаве тех или иных карбидов, но и строением матрицы – основы сплава, которая может быть ферритной, аустенитной, мартенситной.

Феррит имеет низкую твердость, и в силу этого в нем плохо удерживаются твердые карбидные частицы, характеризующие износостойкость сплава. Мартенситная основа обладает наибольшей износостойкостью при абразивном изнашивании, но при отсутствии ударных нагрузок. При ударных нагрузках из-за высокой хрупкости происходит выкрашивание карбидов, что ускоряет изнашивание. Более высокую износостойкость при ударных нагрузках обеспечивает аустенитная и аустенитно-мартенситная основы. Аустенит по сравнению с

мартенситом менее износостойкий, но зато более вязкий и создает условия для прочного удержания внедренных карбидных частиц в своей основе.

Но и в аустенитной матрице для получения с высокой износостойкостью количество карбидов должно быть в определенных пределах. Значительное увеличение их может уменьшить износостойкость сплава, так как карбиды начинают выкрашиваться, а не изнашиваться. При ударно-абразивном изнашивании рекомендуется, чтобы количество карбидной фазы не превышало 25-30%.

Наиболее полно отвечают требованиям ударно-абразивной стойкости хромоникелевые порошки. За исключением хрома и никеля эти сплавы содержат в своем составе углерод, присадки бора и кремния, которые снижают температуру плавления и придают сплавам способность самофлюсования.

Никель является очень ценным легирующим элементом, позволяющим в широких пределах регулировать количество аустенита в сплавах и тем самым получать наплавочные слои с различными физико-механическими свойствами.

Хром – карбидообразующий элемент; в зависимости от содержания углерода и температуры нанесения покрытия хром образует карбиды различного состава. С увеличением содержания хрома повышаются твердость и износостойкость сплавов, но понижаются пластичность и увеличивается склонность к образованию трещин. Хром способствует упрочнению основы сплава, а также повышает устойчивость сплава к коррозии.

Углерод – основной карбидообразующий элемент. При его содержании в материале покрытия до 0,6% в сочетании с другими карбидообразующими элементами образуются сплавы с доэвтектической структурой, отличающейся высокой ударостойкостью при сравнительно высокой износостойкости. При содержании углерода более 2% образуются заэвтектические структуры с количеством карбидов до 40%. Такие сплавы

обладают высокой износостойкостью, но пониженной ударнойпрочностью.

Бор дает углероду и хрому различные соединения в виде боридов и карбоборидов. Введение небольшого количества бора значительно повышает твердость и износостойкость сплава, но резко снижает вязкость, что является причиной образования трещин при напылении. Бор обладает флюсующими свойствами.

Кремний - сильный раскислитель, карбидов не образует, служит составной частью твердого раствора, способствует повышению жаростойкости сплавов. При содержании его свыше 4% структура напыленного слоя ухудшается: снижается ударная вязкость и повышается хрупкость.

Среди состава основных порошковых твердых сплавов, таких как ПР-Н73Х16С3Р3, ПР-Н70Х17С4Р4, ПГ-СР3, ПР-Н80Х13С2Р, ПГ-ФБХ6-2, известно, что покрытия из ПР-Н70Х17С4Р4 обладают наибольшей твердостью 62-65 HRC и температурой плавления.

Таблица 1 – Свойства покрытий в зависимости от материала

Марка	$T_{пл}$, ^0C	HRC	Свойства покрытий
ПР-Н67Х18С5Р4	1000	60..62	Высокая износостойкость, высокая коррозионная устойчивость и жаростойкость, хорошая прочность сцепления со сталями
ПР-Н70Х17С4Р4	990	55..59	
ПГ-СР4	990	58..62	Твердость и износостойкость сплавов возрастают, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния
ПР-	1200	58..60	Высокая

Х4Г2Р4С2Ф			износостойкость
ПР-Х5		58..62	Высокая износостойкость при больших нагрузках и скоростях скольжения

1.5. Выбор метода упрочнения

Существует большое число методов упрочнения рабочих поверхностей деталей машин. Выбор материала и метода нанесения того или иного покрытия зависит от способности изделия противостоять воздействиям внешней среды, в которой ему предстоит работать. В настоящее время у нас и за рубежом применяются следующие газотермические процессы получения защитных слоев: вакуумные, ионно-плазменные, импульсные, осаждение из газовой фазы, наплавка, металлизация, детонационное, газопламенное и плазменное напыление.

Процессы нанесения покрытий все более и более совершенствуются. В самые последние годы появились новые технологические процессы, занимающие теперь значительное место в специальной литературе.

Широко используемые в электронной, оптической, атомной промышленности, авиации и даже в машиностроении эти новые способы, недавно внедренные в отрасль нанесения покрытий и обработки поверхности, вызывают в настоящее время особенный интерес в частности по следующим причинам:

1. - Повышение цен на сырые материалы (медь и её сплавы, никель и его сплавы, хром и т. д.), что побуждает промышленников к поискам

заменителей, использованию покрытий из пластических, композиционных, материалов или смесей обычных металлов (Fe - Al ...).

2. - Повышение стоимости эксплуатации агрегатов нанесения покрытий в связи с ужесточением контроля над стоками и условиями работы трудящихся.

3- Увеличение спроса на более сложные покрытия в связи с повышением показателей работы машин, двигателей, электрических частей и т. д.

В данной работе дается анализ современных процессов нанесения покрытий, которые находятся в распоряжении специалистов, с энергетической и технологической точек зрения.

В настоящее время у нас и за рубежом успешно применяются также и газотермические процессы получения защитных слоев: наплавка, металлизация, детонационное, газопламенное и плазменное напыление.

Одним из наиболее распространенных способов упрочнения поверхности деталей и их реставрации является метод наплавки.

Наплавка - один из наиболее распространенных методов нанесения покрытий на детали машин и механизмов, используемых в народном хозяйстве.

Существует множество способов наплавки: ручная, автоматическая, под флюсом, аргоно-дуговая, шлаковая, вибро-дуговая, плазменная и др. При всех способах наплавки характерным является расплавление поверхности детали и наплавочного материала в виде проволоки или порошка под действием электрической дуги или другого концентрированного источника тепла и перенос расплавленного металла на поверхность детали. После кристаллизации и остывания металл сварочной ванны превращается в наплавленный валик. В составе наплавленного металла имеются различные по составу и структуре участки: зона литого металла, зона термического влияния, где произошло изменение структуры и свойств основного металла. Зона термического

влияния нередко является местом образования хрупких фаз, приводящих к резкому изменению физико-механических свойств детали: понижению усталостной прочности и упругости металла детали, возникновение внутренних напряжений в теле детали.

В то же время наплавка металлов дает возможность получать покрытия, равнопрочные с основой, регулировать свойства поверхности наплавленного металла, получать покрытия с требуемыми свойствами: кислотоупорные, жаростойкие, коррозионностойкие, износостойкие, антифрикционные. Однако наплавку нельзя применять для деталей из сплавов железа с содержанием углерода более 0,45% вследствие его значительного выгорания, а также для легкоокисляющихся сплавов.

Существенным недостатком этого метода является значительный нагрев поверхности (до 1300К), вызывающий нежелательные структурные превращения в основе, а последующее охлаждение ведет к образованию трещин в наплавленном слое, вследствие чего усталостная прочность деталей снижается на 35-60%. Недостатком, ограничивающим применение наплавки в изделиях специальной техники, является также и сложность получения на поверхности детали тонких, отличных от основы по химическому составу и физическим свойствам, покрытий. Это ограничение возникает из-за расплавления основного металла детали и частичного перемешивания с металлом наплавки.

В настоящее время получили мощное развитие и такие газотермические способы нанесения покрытий как:

электродуговая металлизация,

газопламенное напыление,

плазменное напыление.

Характерной чертой этих способов образования покрытий является отсутствие расплавления металла основы или минимальная степень его оплавления.

Способы газотермического напыления отличаются более высокой

производительностью (в 10-1000 раз) по сравнению с наплавкой. Возможно получать покрытия практически из любых материалов толщиной от 10^{-5} м до 10^{-2} м и более.

Газотермическому напылению присущи следующие недостатки: прочность сцепления покрытия с основой невысока и составляет 20-40 МПа. При этом прочностные свойства зависят от способа напыления и возрастают в ряду: газопламенное напыление, электродуговая металлизация, плазменное напыление [2].

Способ газопламенного напыления отличается простотой и низкой стоимостью применяемого оборудования.

Основным недостатком газопламенных покрытий является низкая прочность сцепления их с материалом основы, например для NiAl она достигает 22 МПа, и низкие механические свойства покрытий. Кроме этого, данный метод не позволяет напылять материалы с высокой температурой плавления, так как температура пламени не превышает 3000 К.

В изделиях специальной техники наибольшее применение нашел способ плазменного напыления покрытий.

Плазменное напыление осуществляется с помощью плазменной струи. Поток плазмы характеризуется следующими энергетическими показателями: температура в ядре достигает 30000 К, скорость струи 300-600 м/с, коэффициент теплопередачи 284 МДж/с м2.

Характерным отличием процесса плазменного напыления от газопламенного является более высокая температура в плазменной струе, инертность среды и более высокие скорости полета частиц. Эти особенности метода позволяют в широком диапазоне регулировать свойства покрытий и в значительной степени устранять недостатки, присущие газопламенному методу напыления. Например, плазменные покрытия из порошка стали имеют в 3 раза большую прочность сцепления, чем газопламенные.

К недостаткам метода плазменного напыления следует отнести их

недостаточное сцепление с основой.

Современные разработки по усовершенствованию этого способа позволяют, приближаясь по прочностным характеристикам к покрытиям, нанесенным детонационным напылением, полностью исключить недостатки, присущие электрометаллизации и газопламенному напылению, как-то ограниченный круг материалов покрытий и невысокая их плотность.

Классифицируя методы нанесения покрытий по таким критериям, как толщина покрытия, его прочность, разнообразие материалов покрытия и возможность их применения в специальной технике - можно сказать, что не существует метода нанесения покрытий, удовлетворяющего всем требованиям, предъявляемым к сопряженным деталям. В частности, оптимальную толщину покрытия для большинства пар трения в пределах 0,5-4,0 мм возможно нанести путем наплавки или газотермическим напылением.

Контактная прочность покрытия в пределах 100-500 МПа обеспечивается наплавкой, но практически недостижима для газотермического напыления.

Наиболее широко можно варьировать материалами в составе покрытий при нанесении их газотермическим, в частности, плазменным напылением. Возможно использование металлов, керметов, керамики. Все другие методы нанесения покрытий резко ограничивают выбор используемых материалов.

Таким образом, наиболее полно используются преимущества газотермического напыления практически любых материалов и их композиций при разработке гибридных технологий, объединяющих в своем составе различные принципы воздействия на материал покрытия. При этом можно существенно увеличить прочностные свойства напыляемых покрытий.

1.6. Методы нанесения покрытий и их основные технико-экономические показатели

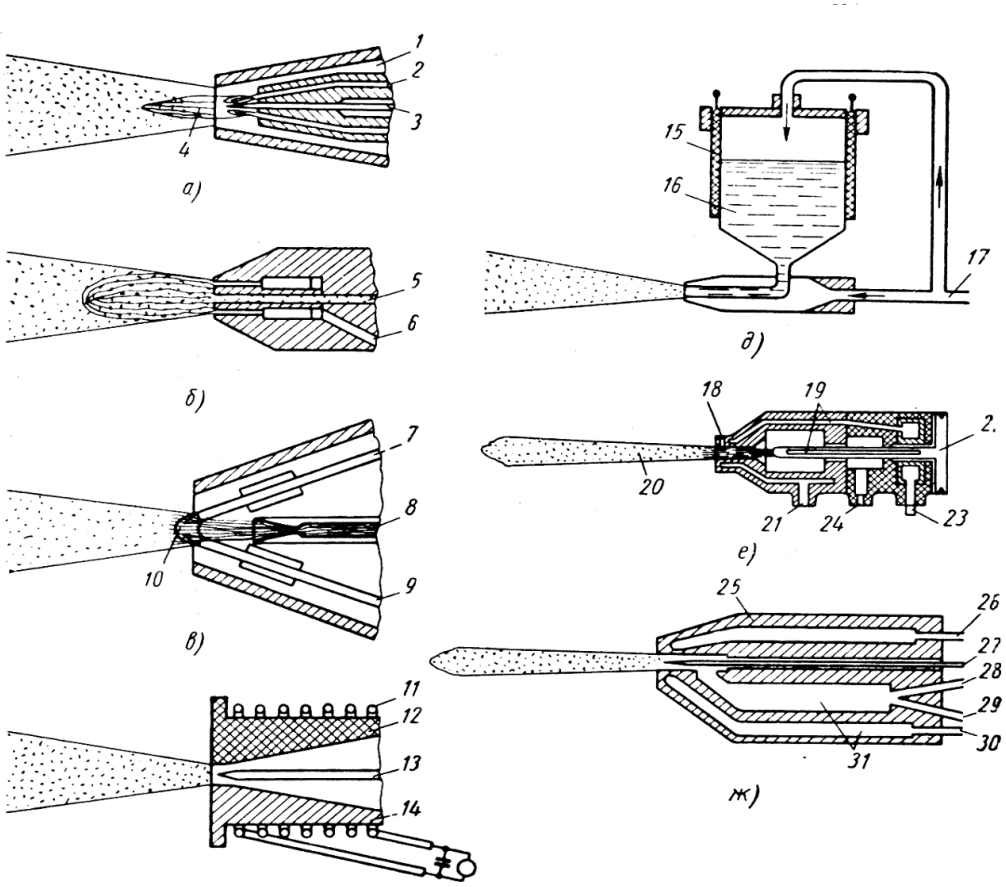
Таблица 2 – Методы нанесения покрытий

Метод нанесения покрытий	Температура струи,дуги, К	Нагрев подложки, К	Скорость струи, м/с	Скорость частиц порошка,м.с-1
Газопламенный	2800	370-500	30-120	30-50
Металлизационный	6300	400-550	100-160	25-30
Детонационный	2800	470	2950	700-820
Плазменный	7000-20000	370-470	200-2500	63-250
Плазменно-воздушный	0.1-50	20-50	5-25	1
Газопламенный	0.1-10	10-25	3-4	6,3
Метализация	0.1-5	5-15	4-5	1,4
Детанационный	0.05-0.5	75-100	0.9-1	21,4

Использование износостойких, коррозионностойких, жаростойких, химически стойких, электроизоляционных, теплоизоляционных и других видов покрытий позволяет резко сократить потери металлов, расход ресурсов на их возмещение и дает возможность повысить качество, надежность и долговечность машин, оборудования и сооружений. Повышение технического уровня и качества машин - важнейший резерв роста производительности труда, экономии всех видов ресурсов и основа научно- технического прогресса.

Для придания поверхностям широкого диапазона свойств, удовлетворяющих различным эксплуатационным требованиям изделий, применяется множество способов создания покрытий.

1.6.1. Методы газотермического нанесения покрытий



а — пламя горючий газ — кислород; б — пламя горючий газ — сжатый воздух; в — электрическая дуга: г — индукционный нагрев; д — нагрев сопротивлением; е — стабилизированная газом электродуговая плазма; ж — принцип ракетного нагрева;

1 — сжатый воздух; 2— смесь горючего газа и кислорода; 3 — распыляемая проволока; 4 — металлизационный факел; 5 — порошок; 6 — смесь горючий газ — воздух; 7 — распыляемая проволока (+); 8 — сжатый воздух; 9 — распыляемая проволока (—); 10 — электрическая дуга; 11 — катушка, охлаждаемая водой; 12 — изоляционный материал; 13 — распыляемая проволока; 14 — концентратор; 15 — нагревательная

спираль; 16 — жидкий металл; 17 — сжатый воздух или защитный газ; 18 — подача порошка; 19 — водяное охлаждение; 20 — струя плазмы; 11 — подвод тока, сток воды; 22 — электрод; 23 — подвод тока, ввод воды; 24 — ввод плазмообразующего газа; 25 — водяное охлаждение; 26 — ввод воды; 27 — проволока; 28 — горючий газ; 26 — кислород; 30 — сток воды; 31 — камера сгорания

Рисунок 10 – Методы нанесения покрытий

1.6.2. Детонационные способы нанесения покрытий

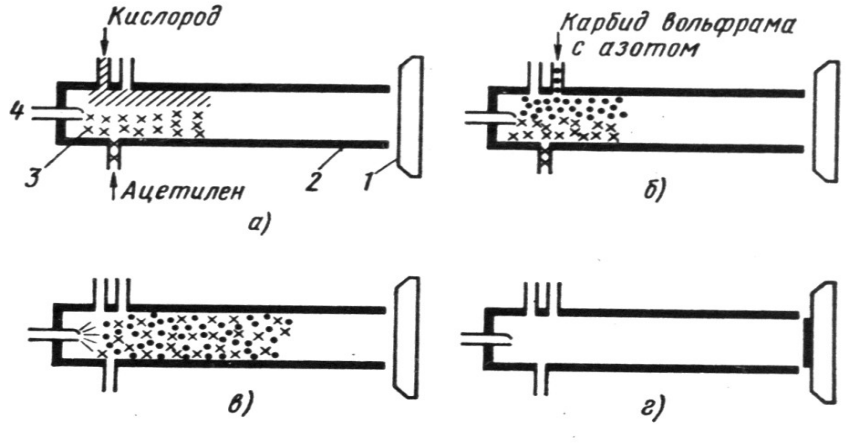


Рисунок 11 - Схема детонационных способов нанесения покрытий

Детонационное напыление — одна из разновидностей газотермического напыления промышленных покрытий, в основе которого лежит принцип нагрева напыляемого материала (обычно порошка) с последующим его ускорением и переносом на напыляемую деталь с помощью продуктов детонации. При детонационном напылении для нагрева и ускорения напыляемого материала используется энергия продуктов детонации газокислородного топлива. В качестве горючего газа обычно применяется пропан-бутановая смесь.

Благодаря высокой скорости напыляемых частиц (600—1000 м/сек.), детонационные покрытия обладают плотностью, близкой к плотности

спечённого материала и высокой адгезией. Детонационное напыление позволяет напылять широкий круг материалов: металлы и их сплавы, оксиды, твёрдые сплавы на основе карбидов. При этом нагрев напыляемого изделия незначителен.

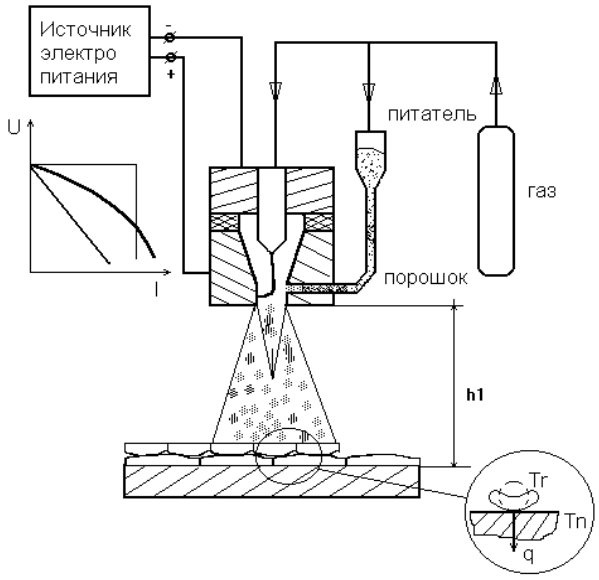


Рисунок 12 – Схема процесса плазменного напыления

2. Конструкторская часть

2.1. Устройство и принцип работы плазматрона

Плазмотрон предназначен для плазменного напыления керамических, металлических и полимерных покрытий из порошковых материалов воздушно-плазменным напылением на наружные металлические и неметаллические поверхности.

Основные технические характеристики:

1. Номинальный рабочий ток, А, не более 300

2. Номинальная продолжительность включения, ПВ,% 100

3. Мощность, кВт, не более 80

4. Расход рабочего газа при давлении 2,5-5 атм. не более, куб.м./час 4,8

5. Расход охлаждающей воды не менее, куб.м./час 0,2-0,3

6. Габаритные размеры плазмотрона без коммуникаций, не более 65 х180

7. Масса плазмотрона без коммуникаций, кг. не более 1,1

Общий вид плазмотрона показан на чертеже.

Плазмотрон состоит из двух основных частей анодной 1 и катодной 3, соединенных гайкой поз.16 и электроизолированных друг от друга изолятором 2.

В катодной части основной деталью является водоохлаждаемый катод, изготовленный из меди с тугоплавкой гафниевой вставкой. Катод закреплен на катододержателе. Гайка-завихритель имеет резьбу на внутренней поверхности для соединения с катододержателем и четырехзаходную резьбу с крупным шагом на наружной поверхности для завихрения воздуха, проходящего между гайкой-завихрителем и втулкой.

В катододержатель запрессована медная трубка, служащая для улучшения обтекания катода охлаждающей водой. Катододержатель закреплен внутри текстолитовой втулки поз.3,имеющей каналы для протекания воды и рабочего газа. Закрепление катододержателя во втулке осуществляется с помощью гайки поз.5 посредством разрезной шайбы поз.6 и компенсаторной прокладки,служащей для регулировки расстояния между катодом и вставкой. Втулка закрепляется внутри корпуса с помощью двух винтов М4. Вставка прижимается к втулке с помощью крышки,имеющей резьбу на внутренней части, посредством которой она соединяется с корпусом местах, где это необходимо, устанавливаются резиновые манжеты с целью исключения выхода наружу воды и рабочего газа.

В анодной части основной деталью является водоохлаждаемый анод процессе работы плазмотрона между катодом и анодом горит электрическая дуга, нагревающая плазмообразующий газ. Анод установлен внутри корпуса анода. Корпус анода имеет два штуцера для подвода и отвода охлаждающей воды. Анод закреплен внутри корпуса анода с помощью крышки. Крышка соединяется с корпусом анода посредством резьбового соединения. Между анодом и корпусом анода с помощью втулки установлен текстолитовый вкладыш, служащий для направления потока охлаждающей воды. В крышку запрессован медный вкладыш, имеющий два отверстия для подачи порошка. Соответствующие отверстия с резьбой выполнены и в крышке .

Для подвода коммуникаций используется специальный текстолитовый насадок, имеющий соответствующие каналы и устанавливаемый на катодной части плазмотрона.

Принцип действия плазмотрона основан на явлении перехода газа в состояние плазмы при разогреве его до высоких температур. В данном плазмотроне нагрев газа осуществляется электрической дугой, зажигаемой между катодом и анодом.

Порядок запуска плазмотрона следующий. В зазор между вкладышем и корпусом подается плазмообразующий газ, который проходя по специальному каналу во вкладыше попадает в зазор между катододержателем и втулкой. Затем проходя по резьбе гайки-завихрителя завихренный воздух попадает в пространство между катодом и вкладышем. Далее он проходит внутри анода и выходит наружу через сопло вкладыша.

Одновременно с плазмообразующим газом в плазмотрон подается охлаждающая жидкость(вода). Плазмотрон имеет два охлаждающих контура отдельно для катодной и анодной части. Вода, охлаждающая катоднуючасть подается внутрь катододержателя, проходит по нему к катоду, обтекая его внутреннюю поверхность и трубку, протекает по зазору

между трубкой и катододержателем, охлаждая последний. Затем вода попадает в специальное отверстие в катододержателе, протекает по винтовому каналу во вкладыше поз.3, охлаждая корпус, попадает в зазор между катододержателем и вкладышем и по нему вытекает наружу.

Для охлаждения анодной части вода подается в один из штуцеров корпуса анода, протекает по каналам анода, охлаждая его, через специальное отверстие во вкладыше попадает в зазор между вкладышем и корпусом анода, охлаждая также и крышку с вкладышем. Затем вода через второй штуцер корпуса анода выходит наружу [7].

Основная электрическая дуга, служащая для разогрева плазмообразующего газа должна загореться между катодом и анодом. Ток этой дуги 200-300 А. Расстояние между катодом и анодом достаточно велико (около 50 мм),и зажигание дуги между ними может быть затруднено. Конструкция плазмотрона позволяет облегчить этот процесс. Прежде чем подавать напряжение на катод и анод для основной дуги, зажигают так называемую дежурную дугу между катодом и вставкой. Ток этой дуги около 80 А. Дежурная дуга горит 3-4 сек. и предназначена для ионизации пространства между основным анодом и катодом, создания, таким образом, токопроводящей среды между ними и облегчения зажигания основной дуги. После истечения 3-4 сек. дежурная дуга гасится и напряжение подается на основные катод и анод. Между ними загорается основная дуга, нагревает плазмообразующий газ и из сопла вкладыша начинает вытекать плазменная струя.

Электрический ток подается на катод через катододержатель, с помощью закрепления клеммы на его резьбовой части. На вставку, электроизолированную от катода и анодной части плазмотрона текстолитовыми втулками и шайбами, ток подается через корпус и крышку.На анод ток подается через корпус анода с помощью закрепления клеммы на одном из штуцеров для подачи воды.

После выхода плазмотрона на устойчивый режим работы через отверстия в крышке и вкладыше на срезе сопла внутрь плазменной струи с помощью потока транспортирующего газа подается порошок материала наносимого покрытия. Порошок расплавляется плазменной струей и увлекаемый ей попадает на подложку.

Данный плазмотрон предназначен для работы в составе установки для плазменного напыления, показанной на плакате. Установка имеет приспособления для закрепления плазмотрона и подводимых к нему коммуникаций. Плазмотрон закрепляется с помощью хомутового зажима.

Классификация питателей-дозаторов.

В настоящее время создано большое количество различных порошковых питателей установок для плазменного напыления. По принципу работы они делятся на питатели пневматического, вибрационного и механического типов. Существуют также питатели смешанного типа, например вибрационно-пневматического.

В ***питателях пневматического типа*** используется поток (струя) газа. создающий псевдосжиженный слой порошка и увлекающий его в виде взвеси из бачка и шланг, по которому газ транспортирует порошок к плазматрону.

В ***питателях вибрационного типа*** высыпанию порошка из бачка под действием силы тяжести способствует вибрация. Транспортирующий газ подхватывает и увлекает порошок. При наличии патрубка (байпаса), соединяющего полости бачка н приемного стакана, перепад давления между ними равен нулю, поэтому питатели вибрационного типа лишены недостатков, свойственных пневматическим. Однако процесс вибрации весьма чувствителен к трудно регулируемым и не поддающимся контролю факторам, например резонансу, распределению массы в системе и др. Стабильность работы вибраторов, а следовательно, и питателя резко нарушается даже при незаметных изменениях силы тока (для электровибратора) или подачи воздуха (для пневмовибратора) и при неизбежном вследствие расходования порошка изменении массы бачка.

Работа питателей механического типа основана на использовании движущихся деталей роторов, шнеков, лопастей, лопаток и т. п., передвигающих порошок к отверстию, через которое он высыпается из бачка. Транспортирующий газ подхватывает порошок уже за пределами бачка. В этих питателях на порошок не воздействуют ни струя газа, ни вибратор, поэтому они не имеют недостатков, описанных выше. Главная трудность, которая возникает при конструировании механических питателей, заключается в том, что движение деталей в порошке,

являющемся абразивным материалом, приводит к интенсивному их износу. Кроме того, порошок заполняет зазоры между перемещающимися деталями, вследствие чего происходит заклинивание и питатель часто выходит из строя. Для предотвращения попадания порошка в зазор необходимо, чтобы все его частицы были больше величины зазора. Следовательно, питатели механического типа могут применяться только для порошков с размером частиц не менее 50 мкм. Между тем порошки для напыления обычно содержат более мелкозернистые фракции и значительное количество пылевидных частиц. Для таких порошков используются питатели для серийных установок плазменного напыления.

Описание конструкции и работы роторного дозатора.

В рамках дипломного проекта была разработана конструкция роторного дозатора. Проектируемый роторный дозатор является питателем механического типа.

Внешний вид проектируемого роторного дозатора показан на рис. 19. На рис. 20 показан роторный дозатор в составе плазменной установки.

Сборочный чертеж роторного дозатора представлен в приложении А (рис. А.1.)



Рисунок 13 - Роторный дозатор в составе установки воздушно-плазменного



Рисунок 14 –Роторный дозатор в составе установки воздушно-плазменного напыления

В бачок поз.1 дозатора засыпается напыляемый материал в виде порошка и завинчивается крышкой поз.2. Работа дозатора основана на использовании движущейся лопатки ротора поз.3, передвигающей порошок к отверстию поз.4, через которое он высыпается из бачка. Для передачи вращающего момента ротору используется электродвигатель поз.5, который крепится к корпусу поз.6 четырьмя болтами поз.7. Для выравнивания давления, в бачок подается воздух через трубку поз.8 . Для того, чтобы прочищать дозатор и удалять остатки порошка, дозатор выполняют сборным. Для ссыпания остатков порошка используется крышка поз.9, а для доступа к лопаткам ротора крышка поз.10 (которая может быть откручена с помощью болтов поз.11).

Дозировка порошка регулируется скоростью вращения ротора.

2.2. Выбор режимов напыления

Основными технологическими параметрами, определяющими свойства покрытий, являются величина тока дуги плазматрона, а так же расход и состав плазмообразующего газа. В связи с этим построение математической модели, устанавливающей связь между этими параметрами с температурой и скоростью напыляемых частиц, является важным этапом выбора режима напыления и управления процессом.

Необходимость расчета температуры частиц при плазменном напылении обусловлена тем, что она определяет свойства покрытий (прочность сцепления, когезионную прочность, структуру, пористость и т.п.), ее можно регулировать в широких пределах путем изменения технологических параметров, в случае применения сложных соединений она не должна превышать температуру их термического превращения или разложения. Кроме того, экспериментальный подбор режимных параметров напыления – это трудоемкий процесс, при котором для каждого материала требуются многочисленные лабораторные исследования.

2.3. Структура математической модели

При построении математической модели процесса плазменного напыления были проведены теоретические или экспериментальные исследования на всех стадиях, изображенных на рис. 2.1.

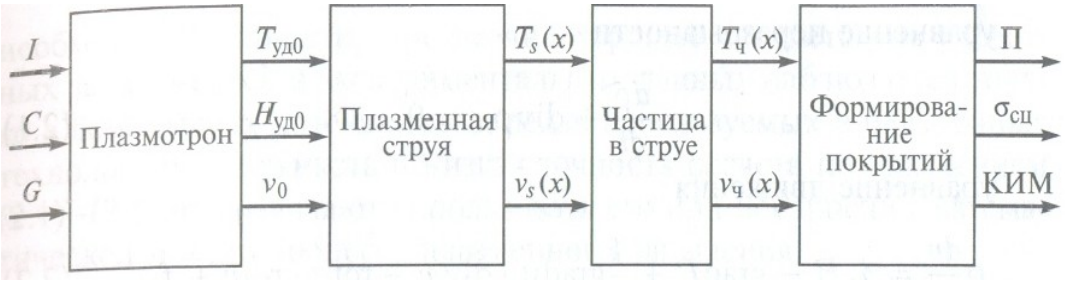


Рисунок 15 – Стадии процесса плазменного напыления при построении математической модели

Температуру напыляемых частиц рассчитывают в следующей последовательности.

1. По заданным значениям тока дуги /, расхода С и состава С плазмообразующего газа определяют удельную энтальпию газа Яудо на срезе сопла плазмотрона.

2. Вычисляют температуру T_0 и скорость v_0 струи на срезе сопла плазмотрона.

3. Рассчитывают температуру $T_s(x)$ и скорость $v_s(x)$ струи на различных расстояниях от среза сопла плазмотрона.

4. Плазменную струю разбивают на отрезки, в пределах которых ее температуру и скорость принимают постоянными, и для каждого отрезка вычисляют свойства плазмообразующего газа.

5. Определяют скорость $v_ч(x)$ напыляемых частиц.

6. Рассчитывают температуру $T_ч(x)$ частиц на различных расстояниях от среза сопла плазмотрона.

7. Находят зависимость пористости покрытия П и коэффициента использования материала (КИМ) от температуры и скорости частиц.

2.4. Энергетические и тепловые характеристики плазматрона

Важным звеном при построении математической модели процесса плазменного напыления является описание плазмотрона. В результате математического моделирования плазмотрона необходимо получить взаимосвязь энергетических и тепловых характеристик с удельной энтальпией, скоростью и температурой плазменной струи на срезе сопла.

Энергетической характеристикой плазмотрона является его вольтамперная характеристика, позволяющая определить мощность дуги. К его тепловым характеристикам относятся потери мощности на охлаждение электродов и термический коэффициент полезного действия.

В технологии плазменного напыления наибольшее распространение получили две схемы плазмотрона: с «короткой» самоустанавливающейся дугой (рис. 2.2, а) и с фиксированной длиной дуги $l_{д.к.}$ с помощью нейтральных межэлектродных вставок (рис. 2.2, б).

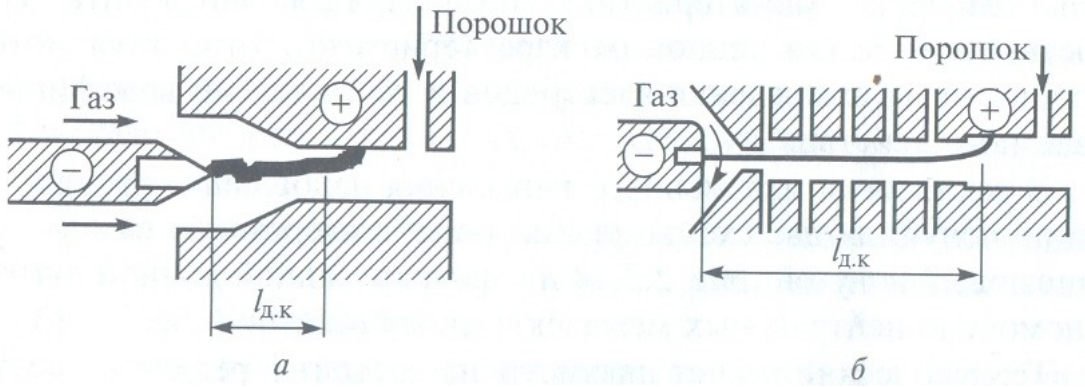


Рисунок 16 – Схема плазматрона с «короткой» самоустанавливающейся дугой (а) и фиксированной длиной дуги (б)

На сегодняшний день методик точного расчета интегральных характеристик дугового разряда не существует. Поэтому для расчета параметров плазмотронов при турбулентном теплообмене между дугой и потоком плазмообразующего газа используют критериальный и

эмпирический методы с применением соответствующих зависимостей. Рассмотрим эти методы более подробно.

Критериальный метод основан на экспериментальном нахождении критериальных зависимостей геометрически подобных плазмотронов. При его использовании критериально обобщенную вольтамперную характеристику и термический коэффициент полезного действия η представляют в следующем виде:

$$U = A\left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{\alpha}\left(\frac{G}{d}\right)^{\beta}\left(\frac{l}{d}\right)^{\gamma}(Pd)^{\delta}; \qquad (2.7)$$

$$\eta = \frac{1-\eta}{\eta} = C\left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{a}\left(\frac{G}{d}\right)^{b}\left(\frac{l}{d}\right)^{c}(Pd)^{d}, \qquad (2.8)$$

где коэффициенты A, C показатели степени α, β, γ, δ, a, b, c и d – постоянные для конкретной конструкции плазмотрона; U – напряжение дуги; I – величина тока дуги; G – расход газа; d – диаметр сопла; l – длина дуги; P – давление.

Зависимости (2.7) и (2.8) составлены из критериев, которые наиболее точно отражают характерные процессы взаимодействия дуги с потоком газа:

1) l/d – критерий геометрического подобия. При малом отношении l/d вольтамперные характеристики имеют нисходящий характер, а при больших l/d – параболический (вначале нисходящий, а затем восходящий). Оптимальная длина дуги, при которой ее полезная мощность имеет наибольшее значение, $l = 12d\sqrt{Gd}$;

2) l2/Gd – энергетический критерий, характеризующий интенсивность энерговыделения в газе при протекании электрического тока за счет джоулевой энергии

$$I^2R = \frac{I^2 l}{Gd}.$$

Энергия газа GH определяется по формуле:

$$\frac{I^2R}{Gh} \sim \frac{I^2l}{G\sigma Hd^2} \to \frac{I^2}{Gd}.$$

Поскольку в зависимостях (2.7), (2.8) значения σH учтены в коэффициентах A и C, при использовании другого газа они будут несправедливы;

3) критерий G/d, характеризующий режим течения газа в канале,

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon d}{\upsilon} \to \upsilon d^2 \frac{1}{d\upsilon} \to \frac{G}{d}.$$

(2.9)

Среднее значение скорости также учитывается коэффициентами A и C;

4) критерий Pd определяет напряжение пробоя, он представляет собой отношение диаметра сопла к длине пробега электрона $Pd \sim d/\lambda_1$.

С помощью значений критериально обобщенных вольтамперных характеристик и η можно вычислить удельную энтальпию

$$H_{óä} = UI\eta$$

(2.10)

и затем определить T_0 и ν_0 на срезе сопла.

Критериальный метод, в основном, применяют для расчета плазмотронов большой мощности. Его преимущество по сравнению с эмпирическим методом состоит в том, что зависимости (2.7) и (2.8) имеют обобщенный характер. Это позволяет при использовании различных конструкций плазмотрона не проводить экспериментального определения вольтамперных характеристик. Однако точность этого метода гораздо меньше точности эмпирического метода.

Эмпирический метод заключается в том, что при различных расходах и составах газов для конкретного плазмотрона находят вольтамперную характеристику. Для плазмотронов с самоустанавливающейся дугой при различном расходе газа (см. рис. 2.2, а) такая зависимость представлена на рис. 2.3.

В случае постоянного расхода газа (G = const) эти характеристики можно описать уравнением параболы

$$U = (aI^2 + bI + c),$$

(2.11)

где U, I – напряжение и величина тока дуги соответственно; G – расход плазмообразующего газа; a, b и c – коэффициенты, полученные экспериментальным путем.

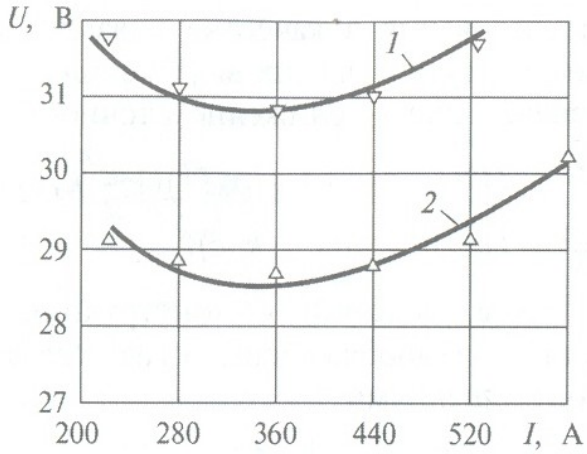


Рисунок 17 – Вольтамперная характеристика плазматрона с «короткой дугой» при расходе газа, равном 1 и 0.6г/с (соответственно кривые 1 и 2)

При $I = const$ эти зависимости можно описать выражением

$$U = G^n, \qquad (2.12)$$

где n – постоянная.

В общем виде вольтамперная характеристика плазмотрона является функцией расхода плазмообразующего газа и величины тока ДУШ:

$$U = G^n (aI^2 + bI + c). \qquad (2.13)$$

Для плазмотронов с фиксированной длиной дуги (см. рис. 2.2, *б*) коэффициент a в выражениях (2.11) и (2.12) равен или очень близок к нулю.

Количество теплоты, передаваемое охлаждающей воде,

$$Q = d + k(I - 200),$$

(2.14)

Где d и k – константы.

Поскольку критериальные зависимости не учитывают состав газа и точность расчета напряжения и термического КПД не превышает 20...40 %, их использование в математической модели процесса плазменного напыления нецелесообразно. Повысить точность можно путем применения следующих выражений;

$$U = G^{a_1}\left(a_2 + a_3 I + a_4 I^2\right), \tag{2.15}$$

$$Q = a_5 + a_6 (I - 200), \tag{2.16}$$

где Q – тепловые потери плазмотрона; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6 – экспериментальные коэффициенты, зависящие от конструкции плазмотрона.

В случае использования в качестве плазмообразующих газов смесей аргон-азот, воздуха и других выражения (2.15) и (2.16) преобразуются с незначительным снижением точности к виду

$$U = G^{a_1}\left(a^2 + a_3 I + a_4 I^2\right)(1 + k_1 c), \tag{2.17}$$

$$Q = (a_5 + a_6 I)(1 + k_2 c), \tag{2.18}$$

где κ_1, κ_2 – константы, зависящие от конструкции плазмотрона.

Расход и состав плазмообразующего газа связаны с расходами аргона и азота соотношениями

$$G = G_1 + G_2, \tag{2.19}$$

$$G = G_2 / (G_1 + G_2), \tag{2.20}$$

где G_1, G_2 – расходы аргона и азота соответственно.

Из приведенных выше выражений можно получить удельную энтальпию плазмообразующего газа

$$H_{уд} = \frac{IU - Q}{G_1 + G_2} = G^{a_1}\left(a_2 I + a_3 I^2 + a_4 I^3\right)(1 + k_1 c)G^{-1} - (a_5 + a_6 I)(1 + k_2 c)G^{-1}.$$

(2.21)

Далее по термодинамическим зависимостям находят универсальную газовую постоянную $R_0 = f\left(H_{уд}, C\right)$ и температуру $T_0 = f\left(H_{уд}, C\right)$ на срезе сопла.

Скорость струи на срезе сопла определяют по выражению

$$v_0 = \frac{4GR_0T_0}{P\pi d_c^2},$$

(2.22)

где P – давление; d_c – диаметр сопла.

Зависимости средней массовой температуры и скорости струи от мощности и расхода плазмообразующего газа показывают, что $v_0 \sim GT$, а это, в свою очередь, подтверждает справедливость формулы (2.22).

2.5. Тепловые и динамические параметры плазменной струи

Строгой теории расчета параметров плазменных струй нами не обнаружено, однако общая постановка задачи по исследованию высокотемпературных струй представлена в ряде работ. При этом было получено хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов для начального участка воздушной плазменной струи, причем вместо уравнения состояния для изобарических потоков было использовано аппроксимирующее уравнение Бейда для связи плотности с энтальпией плазмы в виде

$$\rho = A / H^n.$$

(2.23)

Применение этого уравнения позволяет учесть процессы диссоциации и ионизации, происходящие в газе при высоких температурах. Схема для расчета параметров струи, распространяющейся параллельно оси *x*, приведена на рис. 2.4. Условно струю можно разделить на три участка: начальный, переходный и основной. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

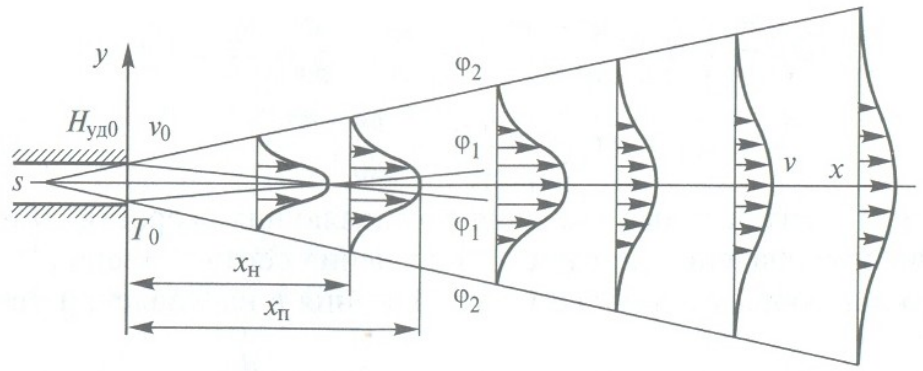


Рисунок 18 – Схема для расчета параметров струи

Принимая струю полностью турбулентной, в уравнении энергии можно пренебречь членами, учитывающими энергию излучения, а в уравнениях движения – членами, учитывающими молекулярную вязкость и теплопроводность.

уравнение движения

$$\rho\frac{du}{dt}+\rho\frac{du}{dx}+\rho\frac{du}{dy}=-\frac{dp}{dx}+\frac{d\tau_{xx}}{dx}+\frac{d\tau_{xy}}{dy},$$

(2.24)

уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt}+\frac{d}{dx}(\rho u)+\frac{d}{dy}(\rho u)=0,$$

(2.25)

уравнение энергии

$$\rho\frac{d}{dt}\left(H+\frac{u^2+v^2}{2}\right)+\rho u\frac{d}{dx}\left(H+\frac{u^2+v^2}{2}\right)+\rho v\frac{d}{dy}\left(H+\frac{u^2+v^2}{2}\right)=$$

$$= \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx}\left(u\tau_{xx} + v\tau_{xy}\right) + \frac{d}{dy}\left(u\tau_{xy} + v\tau_{yy}\right) + \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy},$$

(2.26)

где u и v – мгновенные значения составляющих скорости; ρ и p – мгновенные значения плотности и давления соответственно.

Составляющая нормального напряжения в направлении оси абсцисс

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3}\mu\left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}\right) + 2\mu\frac{du}{dx},$$

(2.27)

а в направлении оси ординат

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3}\mu\left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}\right) + 2\mu\frac{dv}{dy}.$$

(2.28)

Составляющая тангенциального напряжения

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}\right).$$

(2.29)

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади в направлении осей x и y,

$$q_x = \lambda\frac{dT}{dx}, q_y = \lambda\frac{dT}{dy},$$

где λ – коэффициент молекулярной теплопроводности.

При решении системы уравнений (2.24) – (2.26) используем модель турбулентности Прандтля, что позволяет получить хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными для сжимаемой жидкости. При этом напряжение турбулентного трения τ_t и перенос теплоты w_t запишем в виде

$$\tau_t = \varepsilon\frac{du}{dy} = \rho l_u^2\left(\frac{du}{dy}\right);$$

$$w_t = \lambda_t\frac{dT}{dy} = c_p p l_u l_t\frac{du}{dy}\cdot\frac{dT}{dy},$$

где l_u, l_t – длина пути при переносе массы и теплоты; ε и λ_t – коэффициенты турбулентности и теплопроводности.

В результате изменения начального подогрева $H_н$ (т. е. отношения энтальпии газа при 20 °С к энтальпии при искомой температуре) и скорости истечения плазмы были определены углы раскрытия струи и распределение скорости и температуры в пограничной зоне.

Длину начального участка, в ядре которого температуру и скорость струи принимают равными значениям на срезе сопла плазмотрона, приближенно можно рассчитать по формуле

$$x_н = R_c / \alpha\varphi_1,$$

где R_c – радиус сопла, мм; α – экспериментальный коэффициент, равный 0,143; φ_1 – внутренняя граница струи (находится из решения (2.27)-(2.29)).

За пределами ядра профиль энтальпии определяется соотношением

$$(H_0 - H_1)/(H_0 - H_2) = 1 - \eta(1 - \eta + 3\eta^2 - 2\eta^3),$$

где H_0, H_1, H_2 – значения удельной энтальпии на срезе сопла плазмотрона, в рассматриваемом участке и на внешней границе струи;

$$\eta = (y_2 - [R_c - y])/(y_2 - y_1),$$

где y_2, y_1 – ординаты внешней и внутренней границ начального участка.

Профиль скорости струи можно найти по выражению

$$v_s = v_{s0} - v_{s0}(1 - \eta^{3/2})/2.$$

(2.31)

Основное количество теплоты частицы получают на начальном участке струи. Из совместного решения интегральных соотношений законов сохранения импульса и энергии и уравнения состояния газа получено выражение для длины начального участка:

$$x_H = 1.81 R_c B_2 / \left(C_H B_1 \sqrt{2B_3}\right), \qquad (2.32)$$

где C_H – экспериментальная константа начального участка; B_1, B_2 и B_3 – функции начального подогрева струи и состава газа.

Коэффициенты B_1, B_2 и B_3 в выражении (2.32) определяют по зависимостям

$$B_1 = \int_0^1 \frac{d\eta}{\left[1 - (1 - 1/Q_0)(1 - \eta + \eta^2 - 3\eta^3 + 2\eta^4)\right]^n}; \quad (2.33)$$

$$B_2 = \int_0^1 \frac{(2\eta^{3/2} - \eta^3)d\eta}{\left[1 - (1 - 1/Q_0)(1 - \eta + \eta^2 - 3\eta^3 + 2\eta^4)\right]^n};$$

(2.34)

$$B_3 = \int_0^1 \frac{(2\eta^{3/2} - \eta^3)(1 - \eta)d\eta}{\left[1 - (1 - 1/Q_0)(1 - \eta + \eta^2 - 3\eta^3 + 2\eta^4)\right]^n}.$$

(2.35)

Поскольку расчет длины начального участка плазменной струи по выражению (2.32) довольно громоздкий, для аргоноазотной плазмы предварительно рассчитанные нами значения были аппроксимированы равенством вида

$$X_H = R_c\left(7.61/Q_0^{0.142}\left(8.22/Q_0^{0.194} - 7.61/Q_0^{0.142}\right)\right)C/0.3.$$

(2.36)

Значения длины начального участка в дальнейшем используются для расчета температуры и скорости в переходном и на основном участках струи. Температура на оси переходного участка

$$T_{sm}(x) = T_{s0} - 0.255T_{s0}(x - x_H)/0.5x_H.$$

(2.37)

Температуру и скорость на оси основного участка можно описать следующими выражениями:

$$T_{s(x)} = \frac{0.745T_0}{\left[\frac{(0.55C_0(x - 1.5x_H))T_0}{R_c T^{\infty}} + 1\right]^{2/3}};$$

(2.38)

$$v_{s(x)} = \frac{v}{\left[\frac{(0.55C_0(x - 1.5x_H))T_0}{R_c T^{\infty}} + 1\right]^{2/3}},$$

(2.39)

где T^{∞} – температура окружающей среды; $x_н$ – длина начального участка струи; C_0 – экспериментальная константа, равная для аргона 0,01, а для азота – 0,001 (для аргоноазотной струи изменяется линейно от 0,01 до 0,001 в зависимости от массового содержания азота в смеси).

Радиальное затухание температуры и скорости в переходном и основном участках можно описать профилями Шлихтинга

$$(T_s - 300)/(T_{sm} - 300) = 1 - \xi^{3/8},$$

$$v_s / v_{sm} = (1 - \xi^{3/8})^2,$$

(2.40)

где v_{sm}, T_{sm} – скорость и температура на оси струи соответсвенно; $\xi = |y - R_c| y_2$ – безразмерная ордината.

Коэффициент n в выражениях (2,33) – (2.35) зависит от состава плазмообразующего газа, его можно определить по соотношению (2.41) с использованием удельной энтальпии и плотности, рассчитанных по методике, изложенной в § 2.4. Значения n для аргоноазотной смеси с массовым содержанием азота до 30%, находящиеся в пределах 0,575 – 0,668, были аппроксимированы нами выражением

$$n = 0.304(2 + C)^{0.96}.$$

(2.41)

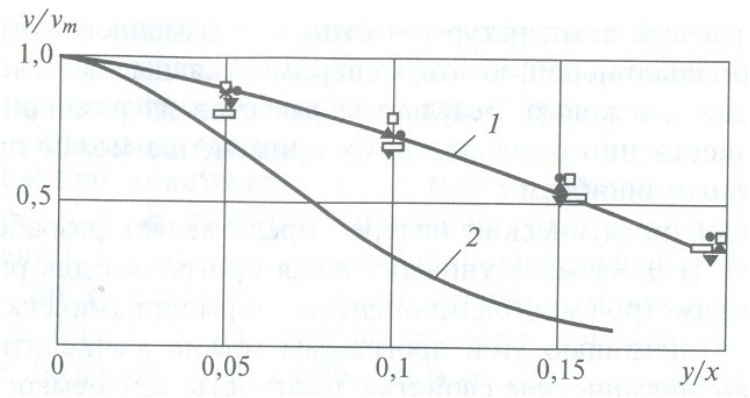


Рисунок 19 – Теоретический и экспериментальный профили скоростей (кривая 1), полученный для плазменной струи при v_0 = 1100м/с и для несжимаемой жидкости (кривая 2)

Проведенные расчеты показывают, что при малом подогреве плазменные струи подобны газодинамическим струям. Теоретический и экспериментальный профили скоростей в безразмерных координатах представлены на рис. 2.5. Следует отметить, что эти профили скоростей (как и температур) полнее, чем для неизотермических струй и несжимаемой жидкости. Все это указывает на возможность более эффективного использования плазменной струи при проведении технологических процессов.

Анализ результатов экспериментальных исследований плазменных струй показывает достаточную сходимость полученных результатов. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составляет не более 15...20 %, что находится в пределах необходимой точности технологических расчетов.

2.6. Термодинамические и переносные свойства плазмообразующих газов

При напылении в качестве плазмообразующего газа обычно используют аргоноазотную смесь, с помощью которой можно наносить покрытия из различных материалов. Аргон и азот не взрывоопасны, относительно доступны и дешевы. В последнее время для этих целей все чаще применяют воздух.

При расчете температуры частиц в плазменной струе наиболее рационально использовать экспериментальные данные по свойствам газов. Поскольку результаты расчетов из различных источников существенно отличаются, их применение может привести к значительным ошибкам.

Большой практический интерес представляет разработанная в МГТУ им. Н.Э.Баумана универсальная программа для расчета состава и параметров многокомпонентных термодинамических систем «Астра». С помощью этой программы можно вычислить следующие термодинамические свойства: плотность, теплоемкость, удельную энтальпию и число грамм-молей в 1 кг газа для любого состава газовой смеси. По программе «Астра» были выполнены расчеты термодинамических свойств аргоноазотной смеси в интервале температур 1 000...15 000 К. Однако поскольку при использовании программы «Астра» требуются большой объем машинной памяти и много времени, ее применение при расчете плазменного напыления нецелесообразно.

Рассчитанные по программе «Астра» свойства аргоноазотной смеси и воздуха были аппроксимированы полиномами с помощью программ APLL, APFS и FFCT библиотеки стандартных подпрограмм ЕС–1022. При этом было принято, что $f_i(x)$, $q_i(x)$, $I = 1,2,...,$ m – функции, найденные при относительных температурах $x = x_1,x_2,\ldots,x_n$.

Коэффициенты аппроксимации

$$P(x) = \sum_{i=1} C_i q_{i(x)}$$

(2.42)

должны быть определены так, чтобы выполнялось условие

$$l_m = \sum_{k=1}^{n} W(x_k)(f(x_k) - P(x_k))^2 = \min \quad , \qquad (2.43)$$

Где *W(x)* – весовая функция.

Необходимое условие минимума имеет вид

$$\frac{dl_m}{dc_i} = 0, \qquad i = 1,2,\ldots,m.$$

(2.44)

Таким образом, получаем систему *m* линейных уравнений с *m* неизвестными C_i. Система уравнений (2.44) составляется программой APFS. С помощью программы APLL осуществляют решение этой системы и расчет коэффициентов C_i, $i = 1,2,...,m$, при которых число l_m минимально. Программа FFCT предназначена для ввода аппроксимируемых свойств, параметров *x* и функций $q_i(x)$, которыми производится аппроксимация.

Разложение многочлена *P(x)* можно проводить по любым функциям *y(x)*. В наиболее простом случае – это разложение по степеням *x*. Ошибка, с которой осуществляется разложение функции по степеням *x* порядка первого отброшенного члена, т. е. $l_m \approx Q(x^{m+1})$, на границе значений аргумента становится довольно большой. Эту ошибку можно существенно уменьшить, разлагая многочлен *P(x)* по полиномам Чебышева. По рассчитанным коэффициентам C_i при полиномах Чебышева были получены выражения для вектора *C* при степенях *x*, что позволило, не снижая точности, сократить объем вычислений. Диапазон значений температур был сокращен до интервала от -1 до 1 путем преобразования $x = (T - 8000)/7000$, что значительно уменьшает ошибки при округлении. Функции, с помощью которых были аппроксимированы термодинамические значения, описаны в подпрограмме FFCT. Все рассматриваемые точки были взяты с одинаковым весом -1,0. После расчета коэффициентов при полиномах Чебышева были

определены коэффициенты в случае разложения по степеням *x*. Затем были вычислены значения функции (например, плотности) при температурах 1000, 2000, 3000,..., 15000 К и относительная ошибка.

Наибольший практический интерес представляет аргоноазотная смесь с массовым содержанием азота до 30%, так как дальнейшее увеличение содержания азота в смеси не приводит к заметному улучшению качества покрытий. Кроме того, эрозия электродов плазмотрона с увеличением содержания азота в плазмообразующем газе значительно возрастает. В связи с этим выражения для вычисления плотности, удельной энтальпии, теплоемкости и числа грамм-молей в 1 кг газа были получены для аргоноазотной смеси с массовым содержанием азота до 30%. Для этой цели по описанной выше программе были найдены коэффициенты аппроксимирующих полиномов, описывающие свойства чистого аргона и аргоноазотной смеси с массовым содержанием азота 30%.

Термодинамические свойства аргоноазотной смеси с массовым содержанием азота до 30 % можно вычислить по формуле

$$Y = \sum_i C_{iAr} x^{i-1} + \sum_i \left(C_{iAr+30\%N_2} - C_{iAr}\right) x^{i-1} C / 0.3,$$

(2.45)

где C_{iar} – коэффициенты разложения свойств аргона в ряд Тейлора; $C_{iar+30\%N_2}$ – коэффициенты разложения свойств аргоноазотной смеси с массовым содержанием азота 30%; C – массовое содержание азота в аргоноазотнои смеси; x – безразмерная температура, изменяющаяся от -1 до 1.

Для расчета плотности и числа грамм-молей в 1 кг газа в интервале температур 1 000...15 000 К использовалась безразмерная температура x_s в виде

$$x_s = (T_s - 8000)/7000.$$

Теплоемкость и удельную энтальпию можно определить по формуле (2.45) в интервале температур 4 000...15 000 К. При этом

$$x_s = (T_s - 9500)/5500.$$

В интервале температур 1 000...4 000 К теплоемкость вычисляется по выражению

$$c_p = 520 + 230 \cdot C / 0.3.$$

(2.46)

Удельную энтальпию аргоноазотной смеси можно найти по выражению (2.45), начиная с температуры 4000 К, что вполне достаточно, так как температура на срезе сопла плазмотрона при плазменном напылении выше 4000 К.

Термодинамические свойства аргоноазотной смеси (плотность и число грамм-молей в 1 кг смеси), определенные по выражению (2.45) с коэффициентами, отличаются от рассчитанных по программе «Астра» не более чем на 6%, теплоемкость – на 7%, а удельная энтальпия – на 7,5%.

Зависимости теплоемкости аргоноазотной смеси от температуры газа приведены на рис. 2.6. Сплошные линии соответствуют значениям свойств газа, рассчитанным по программе «Астра», а пунктирные – по выражениям (2.45), (2.46).

Рассмотрим такие переносные свойства аргоноазотной смеси, как вязкость и теплопроводность. В качестве исходных для расчета взяты усредненные по литературным источникам значения вязкости и теплопроводности чистых газов аргона и азота.

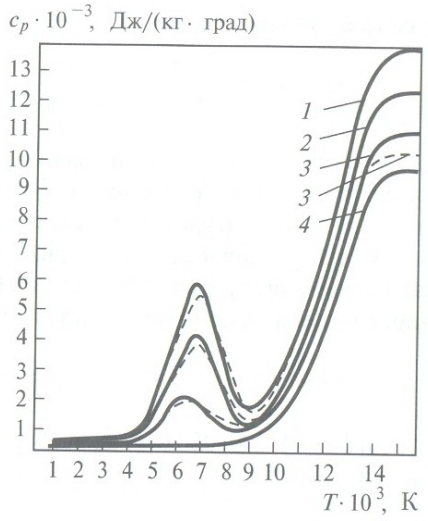


Рисунок 20 – Зависимости значения теплоемкости аргоноазотной смеси отзначения температуры газа:
1 – 70%Ar +30%N_2; 2 – 80%Ar +20%N_2; 3 – 90%Ar +10%N_2; 4 – 100%Ar

Вязкость аргоноазотной смеси определяли по формуле

$$\mu = \mu_{Ar} + (\mu_{N_2} - \mu_{Ar})C \,.$$

(2.47)

Предположение линейной зависимости вязкости от массового содержания азота вполне оправдано. Предварительно проведенные исследования влияния свойств газа на температурное состояние напыляемых частиц показали, что двукратное изменение вязкости газа практически не вызывает изменения температуры частиц. Значения же вязкости чистых аргона и азота от температуры отличаются не более чем в 2 раза.

Более сложен расчет теплопроводности смеси газов. Это связано с тем, что теплопроводности аргона и азота отличаются в несколько раз, а теплопроводность аргоноазотной смеси, как показали проведенные нами исследования, необходимо определять с высокой точностью.

Простое эмпирическое выражение для нахождения теплопроводности смесей имеет вид

$$\lambda_{CM} = 0.5\left(\sum_{i}^{N} x_i \lambda_i + 1/\sum_{i}^{N} x_i / \lambda_i\right), \qquad (2.48)$$

где x_i — относительная мольная концентрация i-го компонента, которую можно выразить через массовую концентрацию и числа грамм-молей в 1 кг газа соотношением

$$x_i = C_i M_i / \sum_i C_i M_i \,.$$

(2.49)

Результаты расчетов теплопроводности смеси газов по формуле (2.48) хорошо согласуются со значениями, полученными экспериментальным

путем, при температурах в несколько сот градусов. В области высоких температур справедливость выражения (2.48) сомнительна. В диапазоне температур 1 000...15 000K для определения теплопроводности смеси газов можно использовать приближенную формулу

$$\lambda_{CM} = \sum_{i=1} \lambda_i \left[1 + \sum_{k=1,i} (1.065 G_{ik} (x_k / x_i)) \right]^{-1}, \tag{2.50}$$

где

$$G_{ik} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(1 + \frac{M_k}{M_i} \right)^{-1/2} \left[\left(1 + \frac{M_i}{M_k} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_k} \right)^{1/4} \right]^2. \tag{2.51}$$

Зависимость теплопроводности аргоноазотной смеси от концентрации азота при различной температуре (формула (2.50)) приведена на рис. 2.7. Поскольку изменение теплопроводности от массового содержания азота отличается от линейной зависимости менее чем на 30 %, теплопроводность смеси можно найти по уравнению

$$\lambda_{CM} = \lambda_{Ar} + (\lambda_{N_2} - \lambda_{Ar}) C. \tag{2.52}$$

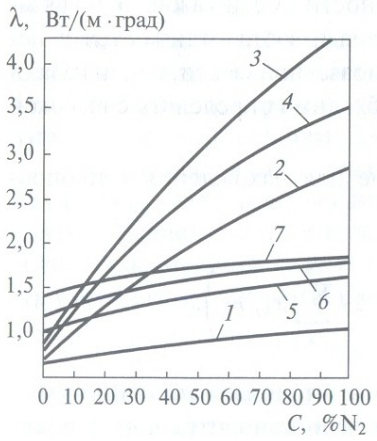


Рисунок 21 – Зависимости значения теплопроводности аргоноазотной смеси от значения концентрации азота, полученные при температуре 5000...11000K (кривые 1-7 соответственно)

Вязкость и теплопроводность чистого аргона и азота, необходимые для расчета μ_{CM} и λ_{CM}, были определены по выражению

$$Z = \sum_{i=1}^{n} C_i x^{i-1},$$

(2.53)

Где для вязкости $x = \frac{T_s - 8000}{7000}$, а для теплопроводности $x = \frac{T_s - 6500}{5500}$.

Полученные коэффициенты C_i использованы в подпрограмме PROP для вычисления свойств газа в зависимости от температуры и массового содержания азота в аргоноазотной смеси.

Таким образом, с помощью полученных выражений (2.45) и (2.52), (2.53) можно быстро и с достаточной степенью точности рассчитать термодинамические и переносные свойства аргоноазотной смеси, необходимые для определения температуры частиц при плазменном напылении.

2.7. Расчет параметров частиц в плазменной струе

Скорость напыляемых частиц при плазменном нанесении покрытий определяют из уравнения движения

$$\rho_{\div} \frac{d\upsilon_{\div}}{dt} = \frac{3}{4} C_d \rho_{\ddot{i}} \frac{(\upsilon_{\ddot{i}} - \upsilon_{\div})}{d_{\div}},$$

(2.54)

где $\rho_ч$, $\nu_ч$, $d_ч$ – плотность, скорость и диаметр частиц соответственно; $\rho_п$, $\nu_п$ – плотность и скорость плазменной струи соответственно; C_d – коэффициент гидродинамического сопротивления.

В расчетах обычно используют значения коэффициента гидродинамического сопротивления, полученные для одиночной сферической частицы, движущейся с постоянной скоростью в неподвижной несжимаемой жидкости бесконечной протяженности. Однако условия, при которых происходит движение порошка в плазменной струе, существенно отличаются от перечисленных выше. Поскольку учесть все особенности движения частиц в струе не представляется возможным, при плазменном напылении наблюдается существенное расхождение рассчитанной и измеренной скоростей.

В ряде работ показано, что вольфрамовые частицы ускоряются в плазменной струе значительно быстрее, чем это следует из уравнения (2.54) с использованием значений коэффициента гидродинамического сопротивления, полученных с помощью теории газодинамики. Уже на расстояниях в несколько миллиметров от среза сопла частицы приобретают скорость, которая на всем протяжении в струе практически не изменяется.

В связи с большим ускорением частиц в струе сделано предположение, что они, начиная с момента ввода в плазмотрон, движутся с постоянной скоростью. Это основано, в свою очередь, на предположении

о том, что температура потока не зависит от радиуса струи. На самом же деле в центре струи температура и скорость больше соответствующих значений в периферийной зоне. Напыляемый материал при вводе в плазмотрон (струю) вначале попадает в периферийную, относительно холодную, часть струи. В реальных условиях частица достаточно длительное время находится в относительно холодных областях струи. Поэтому сделанные предположения о мгновенном ускорении частиц и постоянном профиле температур в канале и на срезе сопла плазмотрона взаимно компенсируют друг друга и мало сказываются на температуре частиц, так как последняя пропорциональна температуре струи и времени нахождения частиц в струе газа.

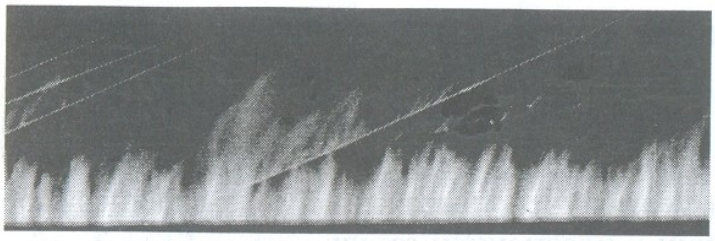


Рисунок 22 – Фоторазвертка плазменной струи с напыляемыми частицами

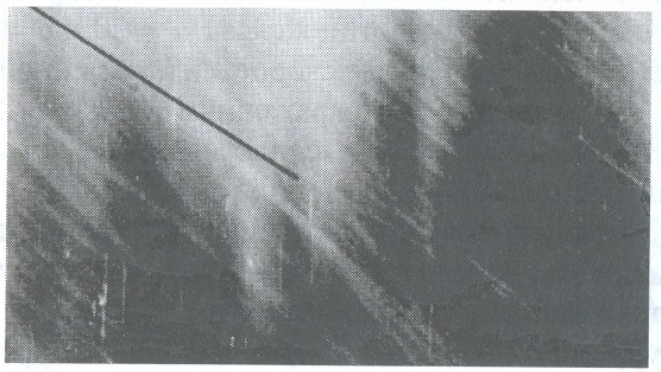


Рисунок 23 – Фоторазвертка плазменной струи с частицами, полученная
с помощью ИССО-1

Скорость частиц является предметом экспериментального изучения многих исследователей. Однако использовать экспериментальные данные других авторов не представляется возможным, поскольку эксперименты были проведены на различном оборудовании, а режимы напыления в литературе описаны не в полной мере. В связи с этим с помощью

скоростной киносъемки камерой СКС-1М была получена фоторазвертка плазменной струи с напыляемыми частицами (рис. 2.8), а измерителем скорости светящихся объектов ИССО-1 (рис. 2.9) была определена скорость частиц различной плотности и грануляции. Плотность частиц (Al_2O_3, СНГН, ПХ18Н9Т, TiNi, Mo и W) предварительно получали методом гидростатического взвешивания, ее пределы составляли 3000...19300кг/м^3. Размеры частиц были равны 50...63, 63...100 и 100...160 мкм. Режим работы плазмотрона задавали величиной тока дуги, расходом и составом плазмообразующего газа, в качестве которого была использована аргоноазотная смесь с массовым содержанием азота от 0 до 30 %. Скорость частиц в зависимости от их плотности и грануляции и от скорости и плотности газового потока была аппроксимирована по методу наименьших квадратов соотношением

$$v_ч = A\frac{\rho_г^L v_г}{d_ч \rho_ч},$$

(2.55)

Плотность и скорость плазменной струи в соотношении (2.55) были рассчитаны с использованием программы «Астра». В результате было получено выражение для определения скорости частиц

$$v_ч = \frac{5\rho_г^{0.4} v_г^{0.7}}{d_ч^{0.4} \rho_ч^{0.5}},$$

(2.56)

которое справедливо для частиц диаметром 50...200мкм при изменении их плотности в пределах 3 000...19 300кг/м^3, а также скорости и плотности плазменной струи в диапазоне 400...1200м/с и 0,034...0,05кг/м^3 соответственно. Выражение (2.56) описывает экспериментальные данные в указанных пределах со среднеквадратичной ошибкой 10,5%. Так как плотность плазмообразующего газа изменяется незначительно, в уравнении для расчета скорости частиц ее изменением можно пренебречь. С учетом этого выражение (2.56) преобразуется к виду

$$v_ч = 1.4 \frac{v_г^{0.7}}{d_ч^{0.4} \rho_ч^{0.5}},$$

(2.57)

Нами также получено выражение, связывающее скорости напыляемых частиц и плазменной струи:

$$v_ч = à + b v_г,$$

(2.58)

где a и b – численные константы, зависящие от плотности и диаметра частиц (в частности, для частиц железа a = 20 и b = 0,6 м/с).

В исследуемом нами интервале скоростей плазменной струи скорости частиц, вычисленные по выражениям (2.57) и (2.58), отличаются не более чем на 5%. Это свидетельствует о достаточной точности и универсальности выражений (2.56) и (2.57).

Таким образом, получены выражения для расчета скорости, а значит, и времени нахождения частиц в струе, которое необходимо для определения температуры напыляемых частиц.

Температуру напыляемых частиц находят из уравнения теплопроводности. Частицы сложных соединений (карбиды, бориды, оксиды) имеют низкую теплопроводность. Свойства таких частиц (теплоемкость, теплопроводность и т. д.) могут существенно зависеть от температуры, а свойства плакированных частиц претерпевают скачок на границе раздела. В связи с этим расчет температуры частиц необходимо проводить не только с учетом ее зависимости от радиуса частицы, но и с учетом изменения свойств материала по радиусу.

Нагрев частицы был рассмотрен в предположении ее сферической формы, что оправдано микронными размерами частицы и ее вращением, обусловленным асимметричным вводом порошка в плазменную струю.

Уравнение теплопроводности с учетом этого при начальном условии T(г, 0) = f(г) имеет вид

$$\rho(T)c_p(T)\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{r^2}\cdot\frac{d}{dr}(\lambda(T)r^2\frac{dT}{dr}), \qquad (2.59)$$

Граничные условия зависят от фазового состояния частицы. Рассмотрим несколько случаев.

1. Частица находится в однофазном состоянии. Это имеет место, когда плавление частицы еще не началось либо когда она уже полностью расплавилась, но ее поверхность не достигла температуры испарения. При этом граничные условия в центре частицы имеют вид

$$\frac{dT}{dr}|_{r=0} = 0,$$

(2.60)

а на поверхности частицы

$$\lambda(T)\frac{dT}{dr}|_{r=D/2} = \alpha(T_s - T).$$

(2.61)

2. Поверхность частицы достигла температуры плавления, и начался процесс плавления. Условие (2.60) в центре частицы остается без изменения, на поверхности же граничное условие с учетом начала плавления можно выразить следующим образом:

$$\lambda(T)\frac{dT}{dr}|_{r=D/2} = \alpha(T_s - T_{ïë}) + \alpha_{ïë}\rho(\dot{O}_{ïë})\frac{dr_{ïë}}{d\tau},$$

(2.62)

3. Частица находится в двухфазном состоянии, т.е. состоит из двух слоев: внутреннего (твердого) и внешнего (жидкого). По мере дальнейшего подвода теплоты граница плавления смещается внутрь частицы. В этом случае граничные условия в центре и на поверхности частицы можно описать выражениями (2,60) и (2.61), а на радиусе плавления

$$T(R = R_{ïë}) = \dot{O}_{ïë},$$

(2.63)

$$\lambda(T)\frac{dT}{dr}|_{r=r_{i\ddot{e}}}=\lambda(T)\frac{dT}{dr}+\alpha_{i\ddot{e}}\rho(\grave{O}_{i\ddot{e}})\frac{dr_{i\ddot{e}}}{d\tau},$$

(2.64)

4. Поверхность частицы достигла температуры испарения. В результате поступающей теплоты начинается испарение на наружной границе частицы. Так как испарившийся материал уносится плазменной струей, радиус частицы уменьшается. При этом граничное условие (2.60) в центре частицы остается без изменения, а на радиусе плавления описывается выражениями (2.63) и (2.64). На поверхности же частицы выражение (2.61) преобразуется к виду

$$\lambda(T)\frac{dT}{dr}|_{r=r_{\grave{e}\tilde{n}\ddot{i}}}=\alpha(\grave{O}_s-T)+\alpha_{\grave{e}\tilde{n}\ddot{i}}\rho\frac{dr_{\grave{e}\tilde{n}\ddot{i}}}{d\tau},$$

(2.65)

Температура поверхности частицы должна оставаться равной температуре испарения, т.е.

$$\grave{O}(R=R_{\grave{e}\tilde{n}\ddot{i}})=\grave{O}_{\grave{e}\tilde{n}\ddot{i}},$$

(2.66)

В общем случае задача расчета температуры частиц в такой постановке не имеет аналитического решения, но может быть решена численно, например, с помощью метода конечных приращений. При этом вместо функции T(r, τ) используем таблицу ее значений:

$$T(0,0),T(h,0),T(2h,0),...,T(nh,0),...,T(R,0),$$

$$T(0,\tau),T(h,\tau),T(2h,\tau),...,T(nh,\tau),...,T(R,\tau),$$

……

$$T(0,m\tau),T(h,m\tau),T(2h,m\tau),...,T(nh,m\tau),...,T(R,m\tau).$$

Воспользуемся неявной разностной схемой, обеспечивающей устойчивость решения при произвольном соотношении шагов, и заменим производную температуры по времени дифференциальным оператором

$$\frac{dT}{d\tau}=(T_i-T_i^{'})/\Delta\tau,$$ (2.67)

а производную температуры по радиусу – дифференциальным оператором внутри частицы

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_i = (T_{i+1/2} - T_{i-1/2})/\Delta r$$

(2.68)

и дифференциальным оператором на границе

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_i = (T_{i+1} - T_i)/\Delta r,$$

(2.69)

где T_i – температура на радиусе r_i; $T_i^{'}$ – температура на радиусе r_i в момент времени, отличающийся от рассматриваемого на шаг $\Delta\tau$; $\Delta\tau$ и Δr – временной и пространственный шаги.

Разобьем радиус частицы на равные отрезки (рис. 2.10). Центру сферы соответствует точка $i = 1$, поверхности – точка $i = k - 1$, радиусу плавления – точка $i = M - 1$, а внешней границе сфера-газ – точка $i = k$. Заменив в уравнении теплопроводности частные производные соответствующими дифференциальными операторами, получим

$$p_i c_{pi} \frac{T_i - T_i^{'}}{\Delta\tau} = \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left[\lambda r^2 \frac{T_{i+0.5} - T_{i-0.5}}{\Delta r}\right] =$$

$$= \frac{1}{r^2}\left[\frac{\lambda_{i+0.5} r_{i+0.5}^2 T_{i+1}}{\Delta r^2} - \frac{\lambda_{i-0.5} r_{i-0.5}^2 T_i}{\Delta r^2} - \frac{\lambda_{i+0.5} r_{i+0.5}^2 T_i}{\Delta r^2} + \frac{\lambda_{i-0.5} r_{i-0.5}^2 T_i^{'}}{\Delta r^2}\right]. \quad (2.70)$$

Пусть длина ячейки $\Delta r = m = R/k-2$, тогда уравнение (2.70) можно записать в виде

$$T_{i+1} + b_i T_i + c_i T_{i-1} + d_i = 0, \quad (2.71)$$

где коэффициенты c_i, b_i и d_i для $i = 2,3\ldots,k - 2$ находят по формулам

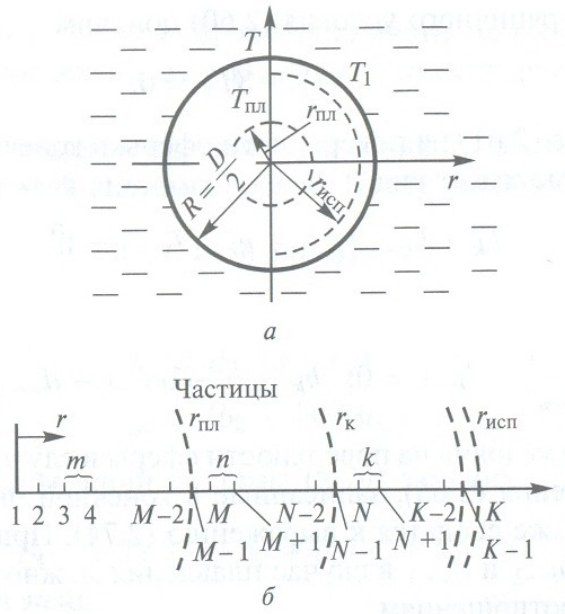


Рисунок 24 – Схема для расчета температуры частиц (а) и разбиения радиуса частицы (б)

$$c_i = \left(\frac{i-1.5}{i-0.5}\right)^2 \frac{\lambda_{i-0.5}}{\lambda_{i+0.5}};$$

$$d_i = \left(\frac{i-1}{i-0.5}\right)^2 \frac{m^2 p_i c_{pi} T_i'}{\Delta r \lambda_{i+0.5}}; \qquad (2.72)$$

$$b_i = -1 - c_i - d_i / T_i.$$

Разложим значение температуры в точке $i = 2$ в ряд Тейлора

$$T_2 = T_1 + \frac{dT_1}{dr}\Delta r + \frac{1}{2}\cdot\frac{d^2T}{dr^2} + \ldots = T_1 + \frac{dT_1}{dr} + \frac{1}{2}(T_1 + 2T_2 + T_3) + \ldots$$

С учетом граничного условия (2.60) получим

$$T_3 - 4T_2 + 3T_1 = 0.$$

(2.73)

Выражение (2.61) на поверхности сферы в конечной дифференциальной форме имеет вид

$$T_k + b_{k-1}T_{k-1} + c_{k-1}T_{k-2} = 0, \qquad (2.74)$$

где

$$c_{k-1} = \frac{\lambda_{k-1}}{\alpha_m}; d_{k-1} = 0; b_{k-1} = -1c_{k-1} - d_{k-1}/T_i. \qquad (2.75)$$

Граничные условия на поверхности сферы в случае ее плавления (2.62) и испарения (2.65), записанные в конечной дифференциальной форме, также сводятся к выражению (2.74). При этом коэффициенты c_{k-1}, b_{k-1} и d_{k-1} в случае плавления можно определить по следующим соотношениям:

$$c_{k-1} = \frac{\lambda_{k-1}}{\alpha_m}; d_{k-1} = \frac{-\alpha_{пл}\rho_{k-1}}{\alpha}\frac{\Delta r_{пл}}{\Delta r}; b_{k-1} = -1 - c_{k-1}, \quad (2.76)$$

а при испарении

$$c_{k-1} = \frac{\lambda_{k-1}}{\alpha_m}; d_{k-1} = \frac{-\alpha_{исп}\rho_{k-1}}{\alpha}\frac{\Delta r_{исп}}{\Delta r}; b_{k-1} = -1 - c_{k-1}. \quad (2.77)$$

Условие на границе плавления внутри сферы можно записать в виде уравнения (2.71) с коэффициентами

$$c_i = \frac{\lambda_{i-0.5}}{\lambda_{i+0.5}}; d_i = \frac{-\alpha_{пл}\rho_{im}}{\lambda_{i+0.5}}\frac{\Delta r_{пл}}{\Delta r};$$
$$b_i = -1 - c_i; i = M - 1 \quad (2.78)$$

Таким образом, в общем случае уравнение теплопроводности с граничными условиями сводится к системе уравнений

$$T_3 - 4T_2 + 3T_1 = 0,$$
$$T_3 + b_2T_2 + c_2T_1 + d_2 = 0,$$
$$T_4 + b_3T_3 + c_3T_3 + d_3 = 0.$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.79)$$
$$T_k + b_{k-1}T_{k-1} + c_{k-1}T_{k-1} + d_{k-1} = 0,$$
$$T_k = T_d.$$

Коэффициенты c_i, b_i и d_i в зависимости от фазового состояния частицы определяют по описанным выше выражениям (2.72), (2.75) - (2.78).

Рассмотрим решение системы уравнений (2.79). Вычтем из второго уравнения этой системы первое. После преобразований получим

$$T_1 = h_2 + g_2T_2, \quad (2.80)$$

где

$$h_2 = d_2 / (3 - c_2);$$
$$g_2 = (b_2 + 4) / (3c_2).$$

(2.81)

Во втором уравнении системы (2.79) заменим T_1 выражением (2.80):

$$T_3 + b_2 T_2 + c_2 (h_2 + g_2 T_2) + d_2 = 0.$$

Введя значение

$$h_3 = (d_2 + c_2 h_2) g_3; g_3 = -1 / (b_2 + c_2 g),$$

в результате получим

$$T_2 = h_3 + g_3 T_3. \qquad (2.82)$$

Чтобы исключить T_2 в третьем уравнении системы, используем соотношение (2.82). Описанную последовательность расчета можно продолжить до точки $i = к - 1$. При этом система уравнений (2.79) преобразуется к виду

$$T_i = h_{i+1} + g_{i+1} T_{i+1}.$$

(2.83)

Знание коэффициентов g_{i+1} и h_{i+1} можно определить по формулам

$$g_{i+1} = -1 / (b_i + c_i q_i);$$
$$h_{i+1} = (d_i + c_i h_i) q_{i+1,}$$

(2.84)

где $i = 3,4,\ldots,k-1$ коэффициенты q_2 и h_2 находят согласно выражениям (2.81).

Таким образом, расчет температуры частиц проводят в следующей последовательности. Вначале вычисляют коэффициенты c_i, b_i и d_i, а затем коэффициенты q_i и h_i, в порядке возрастания номеров по формулам (2.41) и (2.44) (прямая подгонка). Температуру в точках T_i, рассчитывают в порядке убывания номеров по формуле (2.83) (обратная подгонка).

Для решения уравнения теплопроводности (2.59) составлена программа, включающая случаи, когда частица находится в однофазном

состоянии и когда происходит ее плавление; испарение не рассматривается.

Построение программы соответствует изложенному порядку численного решения уравнения теплопроводности. Для определения коэффициентов составлены следующие подпрограммы:

СВД1 — для c_i, b_i и d_i, когда частица находится в однофазном состоянии (по выражению (2.72));

СВД2 — для c_{k-1}, b_{k-1} и d_{k-1} (по формуле (2.75));

СВД3 — для c_{m-1}, b_{m-1} и d_{m-1} в точке плавления, находящейся внутри частицы (по формуле (2.76));

СВД4 — для c_{k-1}, b_{k-1} и d_{k-1} (по формуле (2.76)).

Затем вычисляют коэффициенты q_i и h_i с помощью подпрограммы FACT.

Распределение температуры по радиусу частицы находят с помощью подпрограммы TEMP.

Особенность и сложность решения уравнения теплопроводности в случае плавления частицы связано с тем, что на каждом шаге по времени необходимо правильно определить, на какую величину сместится граница плавления. Критерием достоверности является условие (2.63). Пусть в качестве исходного значения, на которое изменился радиус плавления частицы, будет $\Delta r_{пл}$. При большом $\Delta r_{пл}$ температура на границе твердой и жидкой фаз окажется ниже температуры плавления, и наоборот. Действительно, если принять большой $\Delta r_{пл}$, много теплоты расходуется на плавление этого слоя, что приводит к снижению температуры. Поскольку определить $\Delta r_{пл}$ с необходимой точностью аналитически невозможно, $\Delta r_{пл}$ находят путем последовательных приближений.

Описанный расчет температуры реализован в программе FUSION, исходными данными которой являются число точек и длина отрезка разбиения радиуса частицы, продолжительность нагрева, коэффициент

теплоотдачи, температура плавления, удельная теплота плавления материала частицы, а также начальное распределение температуры по радиусу частицы. К выходным данным относятся распределение температуры по радиусу частицы и отклонение границы раздела твердой и жидкой фаз от сетки разбиения.

Таким образом, использование полученных выражений позволило рассчитать скорость и температуру частиц в плазменной струе с учетом изменения свойств струи.

2.8. Влияние режимов плазменного напыления на свойства покрытий

При математическом моделировании процесса плазменного напыления наиболее сложным и наименее исследованным является этап формообразования покрытия (см. рис. 2.1). Установить теоретическую зависимость свойств покрытий от температуры и скорости напыляемых частиц из-за сложного характера теплового и динамического взаимодействия частиц и подложки пока не представляется возможным.

Режимные параметры напыления (величина тока, расход и состав плазмообразующего газа), влияющие на скорость и температуру напыляемых частиц, определяют исходя из необходимости получения максимума прочности сцепления или из заданной прочности сцепления и пористости покрытия.

Наибольшую зависимость от среднемассовой температуры напыляемых частиц имеют коэффициент использования материала (КИМ), пористость и прочность сцепления покрытия с основой (рис. 2.11).

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают, что свойства покрытий определяются не только скоростью и температурой частиц, но и температурой подложки. При нанесении покрытий температуру подложки стремятся поддерживать постоянной, так как в

противном случае по мере нагрева подложки необходима корректировка режима.

Изменение скорости частиц в пределах 40...100 м/с незначительно влияет на прочность их сцепления с подложкой. Поскольку доминирующее влияние на пористость покрытий по сравнению с их скоростью оказывает температура частиц, связь свойств покрытий с режимными параметрами напыления целесообразно устанавливать через температуру частиц.

По сравнению с прочностью сцепления менее исследована зависимость пористости покрытий от среднемассовой температуры частиц. Нами были установлены эмпирические зависимости пористости покрытий и коэффициента использования материала от среднемассовой температуры частиц. Покрытия наносили из порошков ПЦП-100, оксида алюминия (размеры частиц 50...63 и 63...100 мкм), относящегося к керамическим покрытиям, и нихрома (размеры частиц 50...63 и 63...100мкм).

Пористость измеряли методом гидростатического взвешивания. Температуру частиц *T* рассчитывали согласно уравнению (2.59).

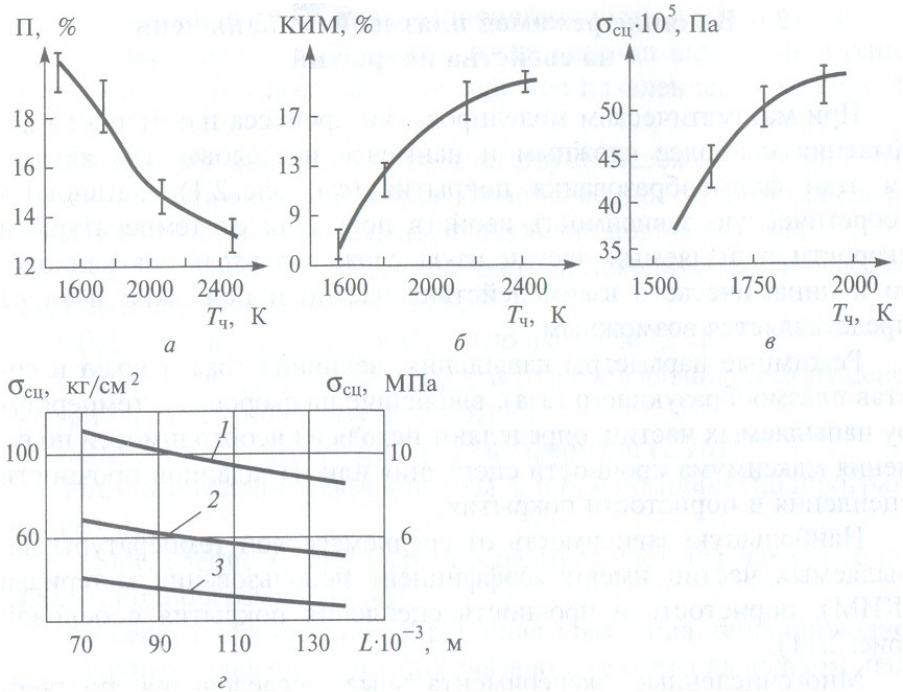


Рисунок 25 – Зависимости значений пористости (а), КИМ (б) и прочности сцепления (в) от значений температуры частиц, а так же прочности сцепления от дистанции напыления (г) при диаметре частиц

равном 40, 60 и 90мкм (кривые 1-3 соответственно)

С повышением величины T наблюдается плавное изменение пористости, прочности сцепления и коэффициента использования материала (см. рис. 2.11), которое может быть описано параболической зависимостью вида

$$П = b_3 T^2 + b_2 T + b_1;$$

(2.85)

$$\sigma_{сц} = b_1' T^2 + b_2' T + b_3',$$

(2.86)

где T – температура частиц ($T = T/2000$); b_1, b_2, b_3 – константы, зависящие от напыляемого материала.

Константы в (2.85) и (2.86) были получены путем аппроксимации экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Значения коэффициентов аппроксимации приведены в табл. 2.2.

Установлено, что зависимость (2.85) в пределах ошибки измерений (15%) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными; ее применение по заданной пористости позволяет определить необходимую величину $T_ч$.

Таблица 3 – Коэффициенты аппроксимации

Материал	Пределы изменения Т,К	Пористость и КИМ	Коэффициенты		
			b_1	b_2	b_3
Al_2O_3	1630…2300	П КИМ	69,0 -4,8	-87 1,0	33,3 19,6
NiCr	1300…1900	П КИМ	22,6 35,1	0 -4,0	-11,3 35,8
ZrO_2	1700…2000	П КИМ	16,8 -37,8	0 0	-5,94 58,8

Температуру частиц, пористость покрытия и коэффициент использования материала применяют в качестве входных параметров при моделировании и поиске оптимальных режимов напыления.

Разработанная математическая модель плазменного напыления является основой для построения автоматизированных установок и систем управления процессом нанесения покрытий.

3. Проектная часть

3.1. Назначение участка плазменного напыления

Плазменное напыление покрытий на рабочую поверхность деталей изделий при их упрочнении и восстановлении производится оператором преимущественно вручную, особенно при сложной геометрии напыляемой поверхности и высоких требованиях к качеству покрытий.

Для получения гарантированного высококачественного плазменного покрытия на деталях важно, чтобы производственный участок был соответствующим образом оснащен и оборудован.

Участок предназначен для плазменного напыления металлических, металлополимерных композиционных и других материалов с целью получения высокопрочных, износостойких, антикоррозионных покрытий на различных материалах [5], [6].

3.2. Состав участка плазменного напыления

- Установка для напыления на воздухе и смеси воздуха с пропаном;
- камера дробеструйной подготовки напыляемой поверхности.

Несущая поверхность детали иногда требует доработки: изменения структуры или свойств механических и физических параметров. Провести такое преобразование можно, используя плазменное напыление. Процесс

является одним из видов диффузии, при которой происходит металлизация внешнего слоя изделия. Для осуществления такой обработки применяют специальное оборудование, способное превращать металлические частички в плазму и с высокой точностью переносить ее на объект.

3.3. Требования к оборудованию и помещениям

При организации участка плазменного нанесения покрытий необходимо руководствоваться методическими рекомендациями "Вопросы гигиены труда и профилактики профзаболеваний при плазменной обработке металлов" Минздрава СССР, 1974 г. Участок должен соответствовать требованиям "Санитарных правил при сварке, наплавке и резке металлов", утвержденных зам. министра здравоохранения СССР, главным санитарным врачом СССР N 1069-73 от 5 марта 1973 г.

Помещение должно быть отапливаемым с естественным и искусственным освещением Высота от уровня пола до потолка должна быть не менее 3,5 м. Свободная площадь, не занятая оборудованием, на каждого работающего должна быть не менее 10 кв.м. Размещение участков в подвальных помещениях зданий не допускается.

Стены помещений должны быть выполнены из кирпича или другого несгораемого материала и покрыты звукопоглащающей облицовкой из материала с коэффициентом поглощения звука не менее 0,7.

Уровни шума в помещениях напыления не должны превышать величины, установленной "Гигиеническими нормами допустимых уровней звукового давления и уровней звука на рабочих местах".

На участках, где производится обработка изделий массой более 20 кг, должны быть предусмотрены подъемно-транспортные механизмы.

В помещениях плазменного напыления должно быть предусмотрено аварийное освещение.

Помещение должно быть оборудовано противопожарным инвентарем, углекислотными огнетушителями марок ОУ-2 и ОУ-8, ящиками с песком.

Рекомендуемая планировка участка плазменного напыления показана на рисунке 1.

Участок для напыления должен содержать:

- бокс для напыления (2), оборудованный системой приточно-вытяжной вентиляции (3) с производительностью 3000-4000 $м^3$/час, при работе же в закрытом объеме - местным отсосом с производительностью 5000-6000 $м^3$/час;

- пульт управления процессом напыления (5), соответствующий "Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденных Главным энергетическим управлением при Госплане СССР (Союзэнерго) 1 июля 1970 г.;

- установку для пескоструйной обработки поверхности изделия (1), включающую в себя: пескоструйную камеру, пистолет, приемный бункер для песка и систему шлангов для подачи в пистолет сжатого воздуха. В качестве рабочего материала используется корундовая крошка по ГОСТ 3647-80. Сжатый воздух подается в пистолет осушенным и очищенным, пройдя по технологической линии для осушки и очистки воздуха;

- слесарный верстак с набором соответствующих инструментов для проведения подготовительных и ремонтно-профилактических работ (11);

- шкаф для хранения порошковых материалов (10);

- приспособление типа "пьяная бочка" для смешивания порошков (9);

- лабораторный стол (стол оператора-напылителя) (12);

- сушильный шкаф с температурой не менее 200°С (8).

Планировка помещения должна обеспечивать свободный доступ к оборудованию и магистралям, размещенным в боксе для напыления и в пульте управления.

Оптимальная площадь участка для напыления на воздухе 36-60 кв.м.

Участок для напыления должен быть оборудован системой приточно-вытяжной вентиляции. Вентиляционные установки должны отвечать требованиям ГОСТ 124.021-75, СН 245-71 гл.5.

Участок должен иметь:

- четыре магистрали подвода и отвода воды к плазменной установке, обеспечивающие расход воды до 20 л/мин при давлении в магистрали 6-8 атм. Вода, подаваемая в систему охлаждения, должна иметь температуру 5-35°С и соответствовать ГОСТ 2874-82. При наличии в магистральной воде высокого уровня жесткости необходимо использовать блок автономного охлаждения (БАО) с дистиллированой водой (14);

- магистраль сжатого воздуха, обеспечивающую подачу рабочего и транспортирующего газа к пульту управления плазменным распылителем и дробеструйной камерой с давлением 6-8 атм. и расходом до 2 м^{3}/мин.

- электроподводку:

а) 3-х фазного тока 380 В, мощностью до 80 кВт;

б) однофазного тока 220 В, до 6 кВт.

Установка и эксплуатация оборудования, подводка электропитания должны соответствовать "Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденных Союзэнерго 1 июля 1970 г.

Примечание: В процессе разработки проекта участка плазменного напыления технические требования могут уточняться и дополняться по согласованию заинтересованных сторон.

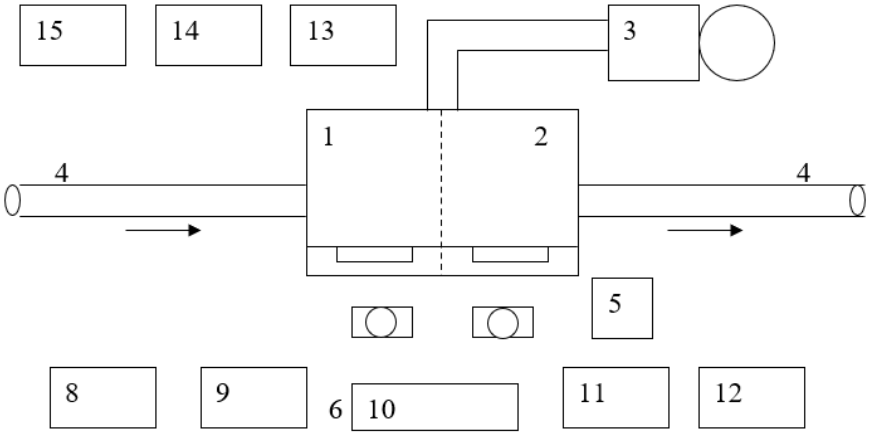


Рисунок 26 – План участка плазменного напыления

1 – пескоструйная камера; 2 – камера напыления; 3 – система вентиляции и очистки воздуха; 4 – изделие; 5 – пульт управления; 6, 7 – рабочее места операторов; 8 - сушильный шкаф; 9 – приспособление типа “пьяная бочка”; 10 – шкаф для хранения порошковых материалов; 11 – слесарный верстак; 12 – лабораторный стол; 13 – блок электропитания; 14 – блок автономного охлаждения; 15 – компрессор.

Габаритные размеры:

Бокс для подготовки и напыления – 1500 х 1000 х 1900 мм;
Источник питания - 840 х 780 х 1550 мм;
Пульт управления - 600 х 250 х 1600 мм.

4. Технологическая часть

4.1. Операционный технологический процесс

Технологический процесс упрочнения и восстановления деталей плазменным напылением включает в себя следующие операции:

- зачистка поверхности;
- контроль восстанавливаемой поверхности;
- наплавка;
- абразивная обработка поверхности детали;
- контроль;
- подготовка порошка;
- сушка порошка;
- плазменное напыление покрытия;
- контроль качества покрытия.

Зачистка изношенной поверхности металлической щеткой производится для извлечения из поверхностного слоя детали внедрившихся инородных тел грунта, снятия оксидной пленки металла.

Контроль восстанавливаемой поверхности проводят для обнаружения сильно изношенных участков подлежащих наплавке.

Наплавку применяют в случае обнаружения на напыляемой поверхности раковин, трещин, сколов, при неравномерности износа. Придают необходимую конфигурацию детали.

Абразивная обработка напыляемой поверхности детали производится шлифовальным кругом для получения необходимой шероховатости. Такая обработка необходима для удаления оксидной пленки, что активизирует напыляемую поверхность для обеспечения образования химических связей между этой поверхностью и напыляемыми частицами, а также получаемые микронеровности дают возможность механического зацепления напыляемых частиц с основой. Подготовленная поверхность не должна иметь блестящих участков.

Проводимый перед напылением контроль детали необходим для проверки напыляемой поверхности на отсутствие замасливания, загрязнения, возможные в процессе хранения.

Подготовку порошка следует проводить в случае продолжительного его хранения, т.к. слежавшиеся частицы образуют комки.

Сушка порошка необходима для придания ему требуемых характеристик, обеспечивающих образование качественного напыленного слоя.

Окончательным контролем проверяют напыленную деталь на отсутствие газовых раковин, трещин, отслоений и выдерживание требуемых геометрических размеров.

Типовая схема напыления покрытий плазменным методом



Рисунок 27 – Типовая схема напыления покрытий плазменным методом

Порошковые распылители в зависимости от свойств и размеров частиц могут осуществлять подачу присадочного материала:

- непосредственно в плазменную струю на выходе из плазмотрона;

- под углом к соплу плазмотрона, навстречу потоку ионизированного газа;

- внутрь сопла плазмотрона в заанодную зону или в доанодную зону плазменной дуги.

Подача порошка в плазменную струю используется в плазмотронах большой мощности. Такая схема подачи не влияет на формирование потока плазмы, а плазмотроны характеризуются завышенной мощностью, чтобы тепла плазменной струи хватило на нагрев порошка.

Подача порошка в доанодную зону наиболее выгодна с точки зрения теплообмена, но сопряжена с перегревом частиц в сопле и забиванием сопла расплавленными частицами, что приводит к необходимости выдвижения повышенных требований к равномерности подачи порошка.

Эффективность нагрева частиц порошка можно повысить при одних и тех же параметрах режимов путем более равномерного его распределения по сечению горячей зоны плазменной струи. Этому способствуют конструкции плазмотронов, позволяющие вводить порошок в плазменную струю не через одно отверстие, а, например, через три, расположенных под углом 120°. При этом КПД нагрева порошка изменяется от 2 до 30 %.

4.1.1. Подготовка порошков

Порошки перед засыпкой в дозирующее устройство должны быть просушены при периодическом перемешивании при температуре 120-150ºС в течение 2-3 ч. Толщина слоя засыпки в противень не более 20 мм.

Просушенные порошки просеивают через сито с сеткой по ГОСТ 3584-73 или ГОСТ 6613-73. Для нанесения покрытий используют порошок гранулометрического состава 40-63 мкм и 63-100 мкм [4].

Приготовленные порошки допускается хранить на воздухе при температуре (25+10) °С и относительной влажности 70% в течении 8 часов. При хранении порошков более длительное время перед применением их следует просушить по вышеуказанному режиму [11].

4.1.2. Вспомогательные материалы

При пескоструйной обработке напыляемой поверхности рекомендуется применять электрокорунд марки 13А, 14А зернистостью 60-80 и зернистостью 120-160 ГОСТ 3647-71 или дробь ДСК (ДЧК) зернистостью 0,8-1,5 ГОСТ 11964-66.

В качестве рабочего газа используется сжатый воздух по ГОСТ 11882-73 с чистотой не ниже 9 класса по ГОСТ 17433-80.

В качестве катодов плазменных распылителей используются медные электроды с гафниевой вставкой (ТУ 48-4-389-76).

Для очистки поверхности изделий перед нанесением покрытий следует применять технический этиловый спирт по ГОСТ 17229-78, синтетические моющие средства (Лабомид, Темп), растворители. При протирке изделий следует использовать обрезки из хлопчатобумажной ткани по ГОСТ 11680-76.

4.1.3. Подготовка поверхности детали, промывка и обезжиривание

Прочность сцепления напыленного покрытия с основой, соответственно и его эксплуатационные характеристики, в значительной

мере зависят от чистоты напыляемой поверхности (отсутствие окисных пленок, масел, влаги), ее конфигурации и шероховатости.

Поэтому в практике нанесения покрытий подготовке поверхности придается первостепенное значение.

Поверхности большинства деталей, поступающих для восстановления, покрыты жировыми пленками и различными загрязнениями. Поэтому все детали должны быть тщательно очищены и промыты. Чаще всего для очистки применяются синтетические моющие средства (Лабомид, Темп), растворители.

Влагу из пористых поверхностей и трещин удаляют подогревом деталей до 200°С, остатки масла выжигают горелкой при избытке кислорода в пламени.

После мойки и очистки детали подвергаются дефектации. Детали с износом выше допустимого, а также детали с повреждениями, поддающимися устранению, подлежат восстановлению и дальнейшему использованию.

Одной из подготовительных операций перед напылением является защита участков детали, не подлежащих напылению. Их закрывают защитными масками или покрывают изолирующими составами типа "Протектор-1", "Протектор-2", в отверстия вставляют пробки из термостойкой резины. В некоторых случаях изготавливают специальные установочные приспособления, конструкция которых обеспечивает изоляцию не подлежащих напылению частей деталей.

4.1.4. Предварительная механическая обработка

Предварительная механическая обработка напыляемой поверхности производится в следующих целях:

- для устранения неравномерностей износа (конусности, эллипсности и т.п.) и получения покрытия равномерной толщины;

- для придания необходимой конфигурации подготавливаемой под напыление поверхности;

При устранении неравномерностей необходимо иметь в виду, что наибольшая рабочая толщина напыленного слоя не должна превышать для металлических покрытий и композиционных покрытий на их основе - 2,5мм.

При напылении покрытий выше оговоренной толщины необходимо применение специальных приемов. Минимальная рабочая толщина покрытия должна быть не менее 0,2 мм.

Участок поверхности детали, подлежащий напылению, должен иметь определенную конфигурацию в части радиусов закругления кромок, разделки выемок, в этом случае необходимо пользоваться рекомендациями, представленными на рис. 4.3.

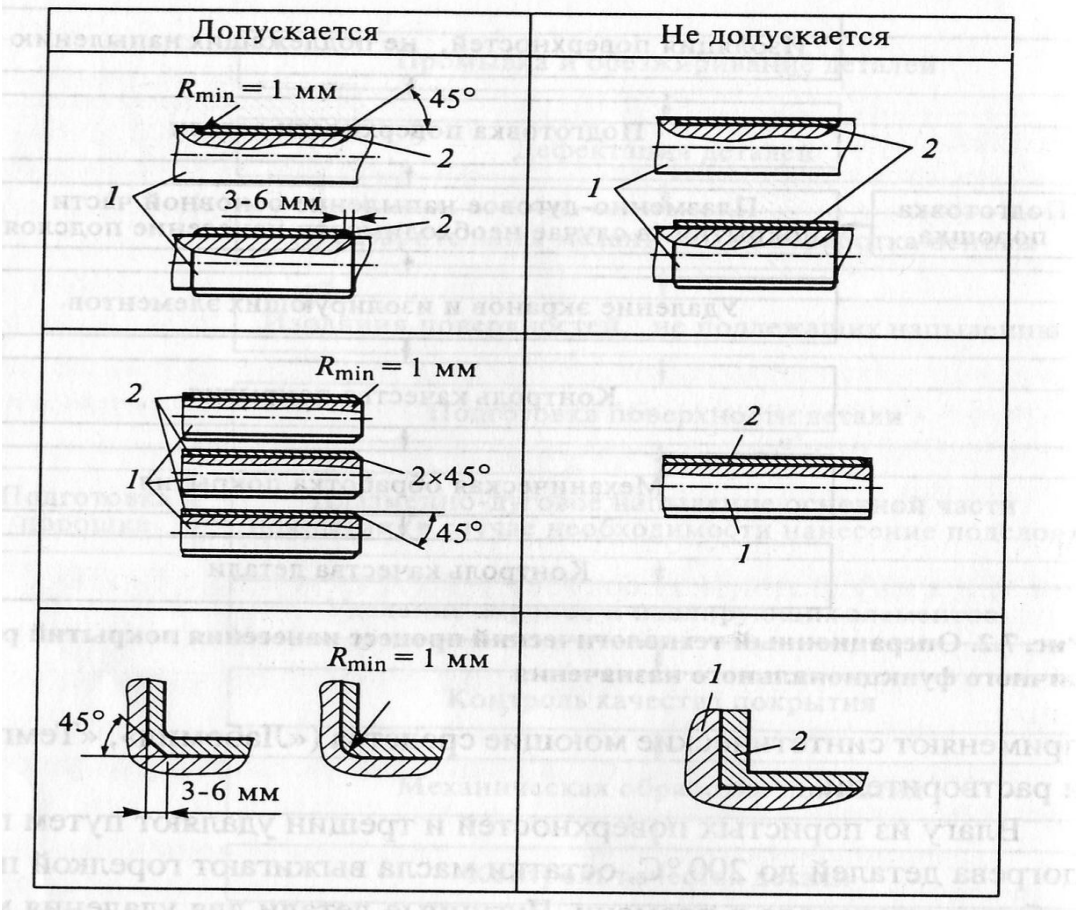


Рисунок 28 – Рекомендации по конфигурации поверхностей, подлежащих напылению

Специальная резьба (канавки) выполняется на наружных цилиндрических поверхностях при толщине покрытия выше 0,5 мм и на всех внутренних поверхностях в соответствии с рис.4.3.

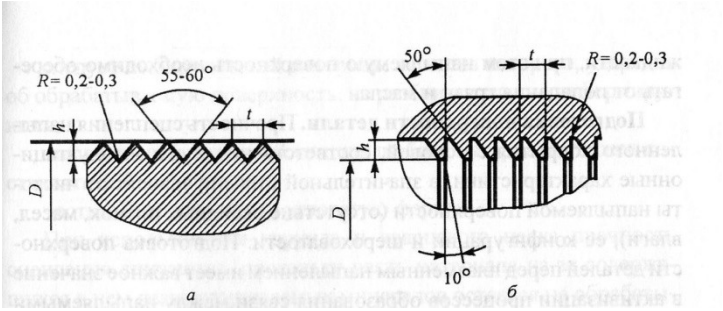


Рисунок 29 – Шаг и глубина резьбы

Шаг и глубина резьбы (канавок) в зависимости от диаметра напыляемой детали выбираются по таблице 4.1.

Для деталей неответственного назначения или в случае нанесения легко нагруженных покрытий, при твердости поверхности детали не выше HRC 30 подготовка поверхности под напыление может заканчиваться нарезанием "рваной" резьбы, нарезку которой выполняют токарным резцом из быстрорежущей стали по ГОСТ 18873-73 с углом заточки 50-60° и отрицательным передним углом. Резец в резцедержателе устанавливают с вылетом 100-150 мм со смещением режущей грани ниже оси обрабатываемой детали.

Таблица 4.1. Шаг и глубина резьбы(канавок)

Размеры Резьбы	Диаметр напыляемой детали (D), мм		
	От 50 до 80	Св. 80 до 150	Св. 150 до 250

Шаг (t) Глубина (h)	1,0 0,6	1,5 0,9	2,0 1,2

Шаг резьбы должен составлять 0,7-1,0 мм, глубина резьбы 0,4-0,7 мм. Резьба выполняется без охлаждающей жидкости, поверхность необходимо оберегать от попадания грязи и масла.

4.1.5. Абразивно-струйная обработка

Для получения необходимой шероховатости поверхности детали перед напылением, кроме деталей с "рваной" резьбой, должны подвергаться абразивно-струйной обработке. Такая обработка поверхности необходима для удаления окисной пленки с напыляемой поверхности и для создания развитой поверхности. Удаление окисной пленки активирует напыляемую поверхность, что обеспечивает образование химических связей между этой поверхностью и напыляемыми частицами. Создание развитой поверхности - это получение микронеровностей на поверхности для возможности механического зацепления частиц с покрытием в процессе напыления.

При абразивно-струйной обработке частицы абразивного материала разгоняются сжатым воздухом и ударяются с большими скоростями об обрабатываемую поверхность. На технологию дробеструйной обработки оказывает влияние вид абразивного материала, его форма и размеры.

В качестве абразивного материала используют электрокорунд марки 13А, 14А зернистостью 60-80 (50% по массе) и зернистостью 120-160 ГОСТ 3647-71 и ОСТ 2-115-71 или дробь марки ДСК (ДЧК) зернистостью 0,8-1,5 ГОСТ 11964-66.

Абразивная обработка ведется на следующих режимах:

- давление воздуха - 0,5-0,6 МПа (5-6 кгс/см^2);
- угол наклона абразивной струи к поверхности детали 60-90°;
- дистанция обработки (расстояние от сопла до поверхности детали)

100-150 мм;

- расход воздуха - 3-4 $м^3$/мин.

После абразивно-струйной обработки поверхность детали должна быть обдута сжатым воздухом от оставшихся мелких частиц абразива. Подготовленная поверхность должна быть матовой, не иметь блестящих участков.

Время между дробеструйной обработкой и напылением должно быть, по возможности, минимальным и не превышать 2 часа, так как активная поверхность легко окисляется. В процессе хранения необходимо следить, чтобы поверхность после абразивно-струйной обработки не загрязнялась; необходимо избегать прикосновения руками, пользоваться только обезжиренным инструментом и оснасткой, поверхность накрывать полиэтиленовой пленкой.

Для абразивно-струйной обработки рекомендуется использовать аппарат струйной обработки.

4.1.6. Напыление

Работы по нанесению покрытий должны производиться на специализированном участке при температуре в помещении не ниже +10°С и влажности воздуха не более 70%.

Участки деталей, примыкающие к напыляемой поверхности, не подлежащие напылению, должны быть изолированы металлическими экранами. Экраны должны устанавливаться на расстоянии от напыляемой поверхности равной или несколько большим толщины наносимого покрытия, рис. 4.4.

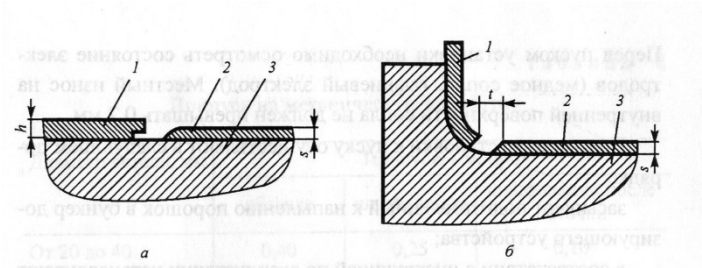


Рисунок 30 – Установка экранов

В качестве оборудования для напыления используется установка воздушно-плазменного напыления.

Перед пуском установки необходимо осмотреть состояние электродов (медное сопло, гафниевый электрод). На внутренней поверхности сопла допускается местный износ не более 0,2 мм.

Установка к пуску подготавливается в следующем порядке:

- засыпается подготовленный порошок в бункер дозирующего устройства;

- устанавливается давление газа и охлаждающей воды и их первоначальные расходы в соответствии с инструкцией по эксплуатации;

- включается установка при отключенном источнике питания, проверяется правильность подачи газа в горелку и срабатывание осциллятора [3].

После включения установки в начале процесса устанавливаются режимы напыления.

При подготовке и отладке оборудования необходимо отрегулировать положение плазмотрона таким образом, чтобы угол между осью сопла и напыляемой поверхностью детали находился в пределах 75-90°.

Нанесение покрытия до заданной толщины следует производить послойно. Толщина слоя, наносимого за один проход, не должна превышать 0,2 мм.

Общая температура детали в процессе напыления не должна превышать 200°С. При появлении на поверхности покрытия характерных цветов побежалости процесс напыления следует прекратить для охлаждения детали. Для охлаждения детали в процессе напыления допускается обдувка сжатым воздухом кл. 0+7 по ГОСТ 17433-80.

В случае образования на покрытии каплевидных наплывов, инородных точечных включений (выбросы из плазмотрона) процесс

нанесения покрытий следует прекратить. Образовавшиеся дефекты (диаметром до 2 мм) необходимо удалить острым ножом или шабером.

При плазменном напылении первые один - два прохода выполняют без подачи порошка для подогрева поверхности детали до температуры 50-80°С.

4.1.7. Механическая обработка

Настоящий раздел - руководящий технический материал - разработан на техпроцесс обработки плазменных покрытий лезвийным инструментом.

Механическая обработка покрытий лезвийным инструментом рекомендуется для предварительной и окончательной обработки покрытий твердостью до HRCэ 60-64.

В зависимости от механических свойств, химического состава покрытия и вида обработки в качестве инструментального материала используют твердые сплавы групп ВК, ТК, ТТК, режущую минералокерамику, поликристаллические сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора и алмаза.

Для обработки газотермических покрытий используются инструментальные материалы различного состава и свойств (табл. 4.4).

Обработка резанием осуществляется на токарных, фрезерных, расточных станках универсальных, специальных, металлорежущих, с ЧПУ и станках-автоматах. Используемое металлорежущее оборудование должно иметь жесткость, соответствующую паспортной жесткости нового станка.

Обработка напыленных деталей производится в последовательности, которая определяется чертежом и технической документацией.

Предварительные рекомендации по технологическим режимам резания некоторых покрытий приведены в таблице 4.5. В конкретных условиях производится их уточнение.

Скорость резания, подачу и глубину выбирают из условия обеспечения производительности обработки, стойкости инструмента и состояния обработанной поверхности, так как глубина резания обычно превышает 0,6 мм, резание осуществляется в основном закругленной вершиной резца. Резцы с отрицательным значением переднего угла не применяют, передний угол не превышает 8°. Установка резца с пластиной из твердых сплавов показана на рис. 4.5.

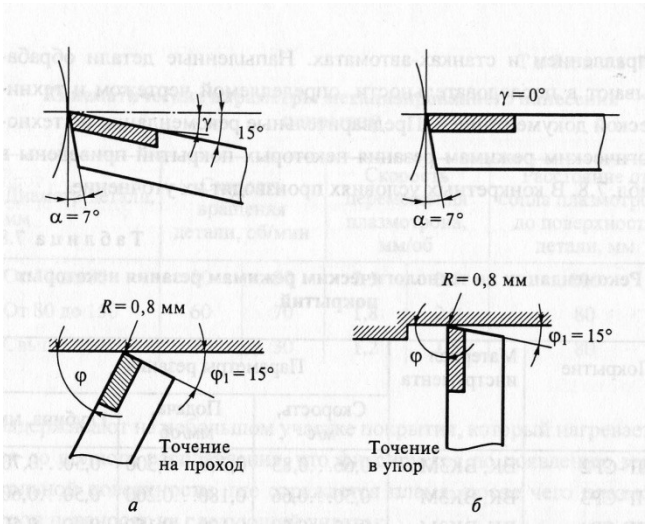


Рисунок 31 – Установка резца с пластиной из твердых сплавов

В случае необходимости для повышения работоспособности инструмента и точности детали точение может производиться с охлаждением.

Таблица 4 – Величина припуска на механическую обработку

Диаметр,мм	Величина припуска на сторону (мм) при		
	Обточке	Шлифовании	Шлифовании после обточки
От 20 до 40 От 40 до 60 От 60 до 100 От 100 до 150 Свыше 150	0,40 0,50 0,60 0,75 1,00	0,25 0,35 0,45 0,60 0,75	0,10 0,15 0,20 0,25 0,30

Таблица 5 – Параметры нанесения покрытий на поверхности тел вращения

Диаметр детали, мм	Скорость вращения детали, об/мин		Скорость перемещения плазмотрона, мм/об		Расстояние от сопла плазмотрона до поверхности детали, мм
от 50 до 80	80	90	2,5	3,0	100
от 80 до 150	60	70	1,8	2,0	80
свыше 150	20	30	1,2	1,5	80

Таблица 6 – Инструментальные материалы для обработки покрытий

Группа	Марка	ISO	Область применения
Твердый сплав	ВК3	К01	Чистовое точение с малыми сечениями среза покрытий из цветных металлов, пластмассы, неметаллических материалов
Минерало-керамика	ВК3М	К01	Чистовое точение покрытий, содержащих абразивные неметаллические включения
Поликристал-лические сверхтвердые матералы	ВК4 ВК6	К30	Черновое и получерновое точение при неравномерном сечении среза покрытий из цветных металлов и полимерных мате-Риалов
	ВК6М ВК6М	К10 М01	Чистовое и получистовое точение покрытий на основе Fe, Ni, W, Mo при тонких сечениях среза на малых скоростях резания
	ВК8 ВК10	440 М40	Черновое и получистовое точение покрытий из порошков нержавеющих сталей сплавов на основе Ti-Ta, Ni, W, Mo
	ВК15 ОМ	М50	Тяжелые случаи точения покрытий из порошков нержавеющих сталей сплавов на основе Ti, Ni, W, Mo

Продолжение таблицы 6

	ВК20М Т5К10 Т14К8 Т15К6 Т30К4 ТТ10К8 А	Р30 Р20 Р10 Р01 М10	Черновое и получистовое точение покрытий на основе Fe-C - в особо тяжелых случаях; - по корке и окалине покрытий; - при неравномерном сечении среза и непрерывном резании; - с малым сечением среза; - чистовое точение.
	Т5К12В	Р40	Тяжелое черновое точение
	ТТ8К6	М10	Получистовое точение покрытий из цветных металлов
	ВО13 ВК		Тонкое, чистовое, точение покрытий из порошков сталей твердостью HRCэ 30-64
	Композит 01 эльбор-Р		Тонкая и чистовая обработка покрытий из порошков на основе Ni, Fe, Co твердостью до HRCэ 65, цветных металлов в условиях безударного резания

Таблица 7 – Рекомендации по технологическим режимам резания покрытий

Покрытие	Инструмент, материал	Условия резания		
		v, м/с	s, мм/об	t, мм
ПГ-СР2	ВК, ВК3М	0,66-0,83	0,200-0,300	0,50-0,70
ПГ-СР3	ВК, ВК3М	0,50-0,66	0,180-0,200	0,50-0,60
ПГ-СР4	ВК, ВК3М	0,40-0,50	0,100-0,150	0,40-0,50
ПГ-10Н-01	Композит 01	1,20	0,080	0,20-1,00
ПГ-10Н-01	Композит 10	0,50-0,66	0,045-0,200	До 1,50
ПГ-10Н-01	Киборит	0,70-1,00	0,100-0,200	0,20-0,30
ПГ-12Н-01	Композит 01	1,50-1,75	0,070-0,110	До 1,50 0,1
ПГ-12Н-01	Киборит	0,70-1,00	0,100-0,150	До 2,00
ПГ-19М-01	Киборит	0,50	0,3	
Нп-65Г	ВК8	1,00-1,50	До 0,300	
На основе Ni	Композит 10	0,33-0,70	0,150-0,300	
		1,60-1,75	0,070-0,150	

4.2. Контроль качества и дефектация

Качество пескоструйной обработки поверхности и поверхности с напыленным подслоем контролируется визуально сравнением с эталоном. Эталон и поверхность напыленного слоя должны удовлетворять следующим требованиям:

- высота микронеровностей после пескоструйной обработки и после нанесения подслоя должна быть не менее 70 мкм;
- нанесенный подслой должен быть равномерным по всей поверхности.

Качество покрытия контролируется внешним осмотром на отсутствие сколов, вспучиваний и отслоений, бугристости, цветов побежалости, трещин.

Для выявления сколов и трещин применяется лупа с 4-10 кратным увеличением.

В случае выявления некачественных покрытий они должны быть удалены с применением механической обработки и нанесены повторно с соблюдением настоящих рекомендаций.

Геометрические размеры деталей с покрытиями после обработки замеряются с помощью штангенциркуля (ГОСТ 01.01-87) или микрометра (ГОСТ 6.507-78).

Контроль шероховатости производится с помощью профилометра-профилографа модели 252 типа АП по ГОСТ 19299-73.

Таблица 8 – Дефекты при обработке покрытий

Дефекты	Причины	Способ устранения
Отслоение напыленного слоя	Неправильная подготовка поверхности под напыление	Удалить дефектное покрытие. Подготовить поверхность в соответствии с требованиями. Напылить и обработать.
	Несоблюдение технологии напыления	То же
Разнотолщинность (выше допускаемой)	Чрезмерное затупление инструмента	Удалить дефектное покрытие. Напылить и обработать заточенным инструментом
	Неправильный выбор геометрических и конструкционных параметров инструмента	Удалить дефектное покрытие. Напылить и обработать новым инструментом с оптимальными геометрическими параметрами
	Эксцентричная установка детали на станке	Удалить дефектное покрытие.Напылить.Правильно установить деталь и обработать

Метод испытаний на ударную прочность основывается на определении энергии удара, которую может выдержать наплавленный слой определенной толщины без разрушения.

Ударная прочность наплавленного металла является критерием чувствительности к ударам и показывает различные склонности материалов к отслаиванию при высоких энергиях удара.

Удар тела о плиту является одним из наиболее распространенных лабораторных испытаний изделий (или их отдельных узлов) на ударные воздействия.

Разработанная испытательная машина дает возможность определить энергию удара и тем самым произвести оценку ударной прочности различных наплавленных и напыленных материалов.

Ударная прочность (ударная вязкость) определяется как энергия удара, отнесенная к площади контакта двух соударяемых поверхностей, которую может выдержать испытываемый образец без образования трещин.

$$П_{УД} = \frac{m\ g\ h}{S},$$

где, $П_{УД}$ – ударная прочность, $МДж/м^2$;

m – масса падающего груза, кг;

h – высота падения груза, м;

S – площадь контакта, $м^2$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Исследования показывают, что материалы покрытий, нанесенных на зубья экскаваторов, для работы без образования трещин, должны иметь ударную прочность не менее 2,2$МДж/м^2$.

Предлагаемая испытательная машина обеспечивает определение ударной прочности до 3,7$МДж/м^2$.

Рассмотрим принцип работы машины (рис. 4.6.). Падающий груз (1) определенной массы поднимается на определенную высоту. После включения электромагнита (4) из его корпуса выходит упор (3) на который

ложится направляющая груза (2). Высота и масса груза определяет ту энергию удара, с которой он взаимодействует с образцом.

При отключении электромагнита упор втягивается пружиной в корпус и груз падает вниз по трубе (5), в которой сделано направляющее отверстие, которое также служит для возможности наблюдения и управления процессом испытания.

Труба внизу сварена с фланцем (6), который закреплен с помощью винтов (7) на опорах (8), высота которых позволяет свободно устанавливать и вытаскивать образец (9).

С помощью подъемного механизма (храповика) груз снова поднимается на необходимую высоту.

Масса падающего груза выбрана такой, чтобы при падении с высоты 1 м была определена допустимая величина ударной прочности 2,2 $МДж/м^2$, при площади контакта $10^{-4}\ м^2$.

Таким образом,

$$m=\frac{П_{УД}\ S}{g\ h}=\frac{2{,}2\cdot10^{6}\cdot10^{-4}}{10\cdot1}=22 \text{ (кг)}$$

Рассчитанные геометрические параметры падающего груза обеспечивают выполнение его из стали с плотностью $\rho=7900\ кг/м^3$ массой 22 кг.

$$m_1=\frac{\pi\cdot0{,}14^2}{4}\cdot0{,}174\cdot7900=21{,}22 \text{ (кг)}$$

$$m_2=\frac{\pi\cdot0{,}07^2}{4}\cdot0{,}006\cdot7900=0{,}18 \text{ (кг)}$$

$$m_2=\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{3}\cdot\pi\cdot0{,}05\cdot\left(0{,}06+0{,}0113+0{,}06\cdot0{,}0113\right)=0{,}6 \text{ (кг)}$$

$$m=m_1+m_2+m_3$$

При проведении испытаний высота падения груза увеличивается до тех пор, пока возле отпечатка не появится первая трещина. Испытаниям

подвергается каждый раз новый образец. При каждом испытании необходимо получить пять параллельных проб.

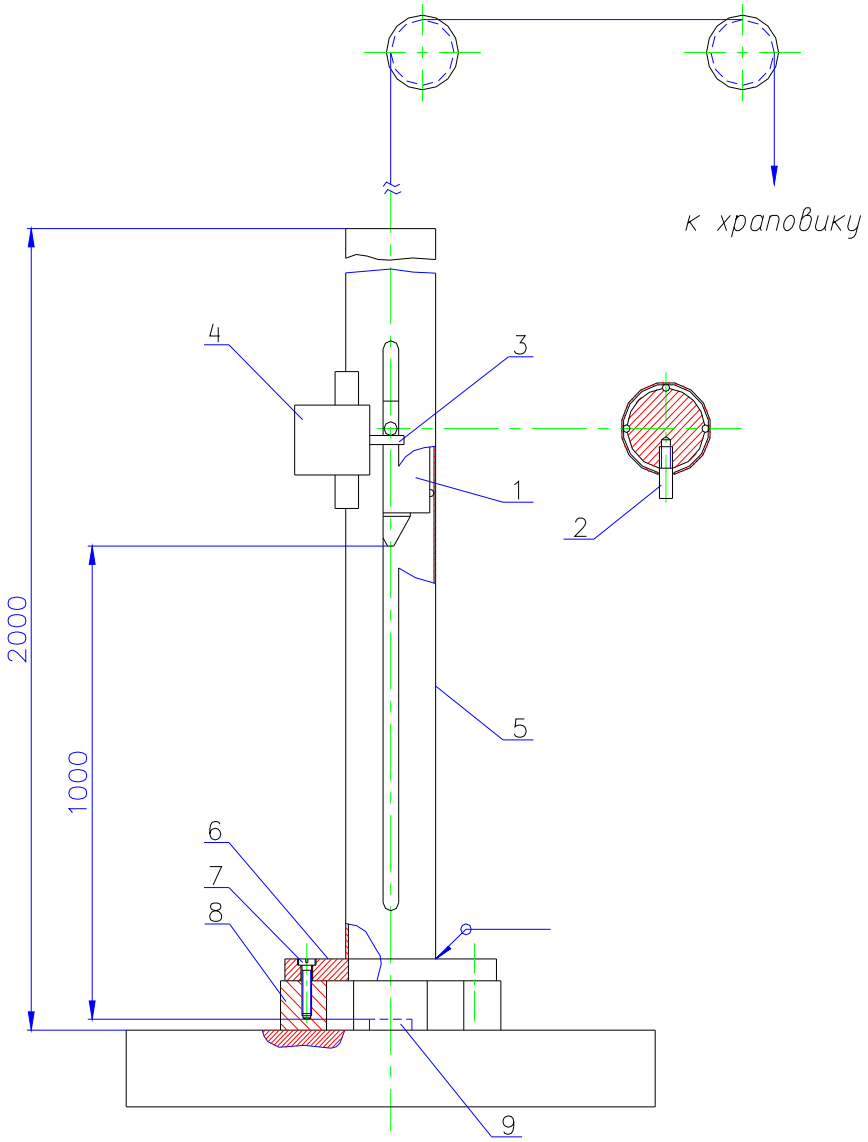


Рисунок 32 – Машина для испытаний на ударною прочность

Важным параметром, характеризующим качество покрытия, является его адгезионная прочность. Аналитическое определение указанного параметра весьма затруднительно ввиду отсутствия необходимых прочностных характеристик и сложного характера напряжённого состояния в системе. Существует большое количество методов экспериментального определения прочности сцепления покрытия с основой.

При этом каждый метод имеет качественные и количественные характеристики. Качественные характеристики заключаются в определе-

нии косвенных показателей (адгезии) отрыва по величине и площади скола или удара, углу загиба или кручения, путём царапанья покрытий и т.п.

Количественные характеристики метода определения величины адгезии заключаются в том, что при нагружении усилия отрыва происходит отрыв покрытия от основы, при этом фиксируют усилие отрыва. Прочность сцепления определяют по зависимости:

Sсц.= P/F

Клеевой метод определения величины прочности сцепления состоит том, что сначала на основу наносится покрытие, для придания плоскопараллельности основы и напылённого покрытия предварительно проводят мехобработку. После этого покрывают клеем подготовленные поверхности покрытия и основной части приспособления, представленного на рис. 2.7., и дают выдержку в течение 20-30 мин. В специальном приспособлении, обеспечивающем соосность и плоскопараллельность частей устройства, в котором обеспечивается удельное давление P = 3 кгс/см^, проводят склеивание. После полимеризации клея удаляют его остатки механическим путём и проводят стандартные испытания на прочность сцепления в разрывной машине.

К достоинствам данного метода определения величины адгезии следует отнести равномерное распределение прикладываемой нагрузки по всей площади отрыва и, следовательно, получение достоверных результатов.

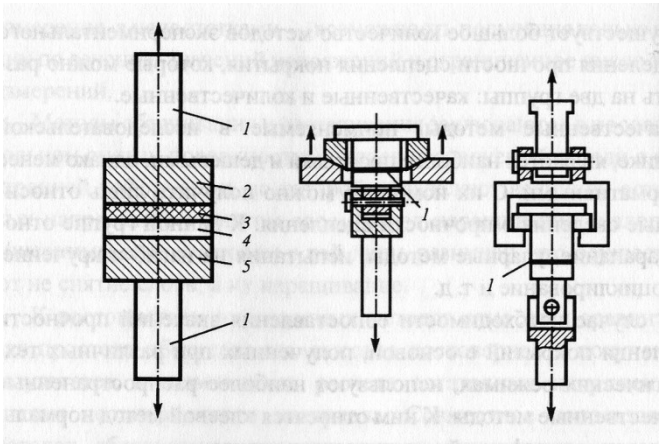


Рисунок 33 – Клеевой метод определения величины прочности

сцепления покрытия с основой

К недостаткам данного метода относят:

1.Длительное время, необходимое для получения конечных результатов.

2.Необходимость механической обработки напылённого покрытия, которая может повлиять на конечный результат опыта.

3.Проникновение клея через поры тонких напылённых покрытий, что может искажать величину замеряемой адгезионной прочности покрытий.

4.Прочность клея должна быть выше предполагаемой адгезионной прочности покрытий.

Указанные недостатки в клеевом методе определения величины прочности сцепления в некоторой степени устраняет штифтовой метод.

Штифтовой метод определения величины прочности сцепления состоит в том, что на штифт и основу одновременно наносится покрытие. После этого к изготовленному образцу в разрывной машине прикладывается усилие, по величине которого определяют прочность сцепления покрытия с основой. К достоинствам штифтового метода можно отнести:

- возможность многократного использования приспособлений;

- отсутствие подготовительных операций;

- оперативность метода;

- возможность определения величины адгезии любых покрытий.

Большее применение нашёл штифтовой метод - метод отрыва штифта от покрытия (рис. 4.8) и метод отрыва покрытия от основы штифта (рис. 4.9).

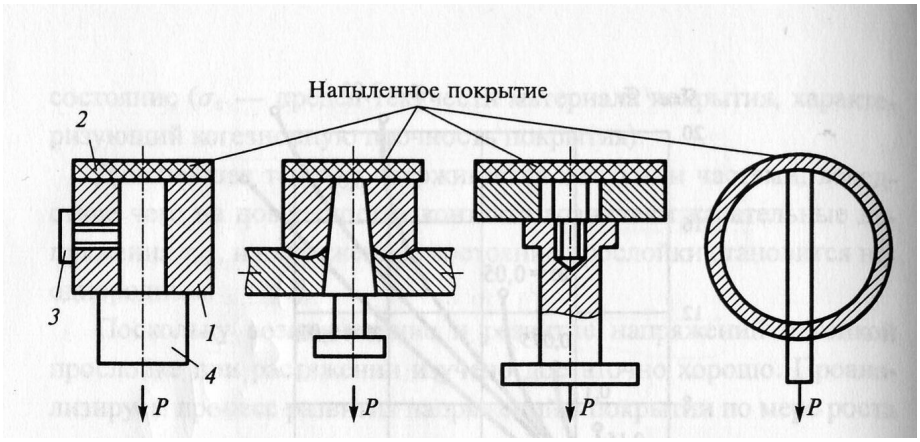


Рисунок 34 – Метод отрыва штифта от покрытия

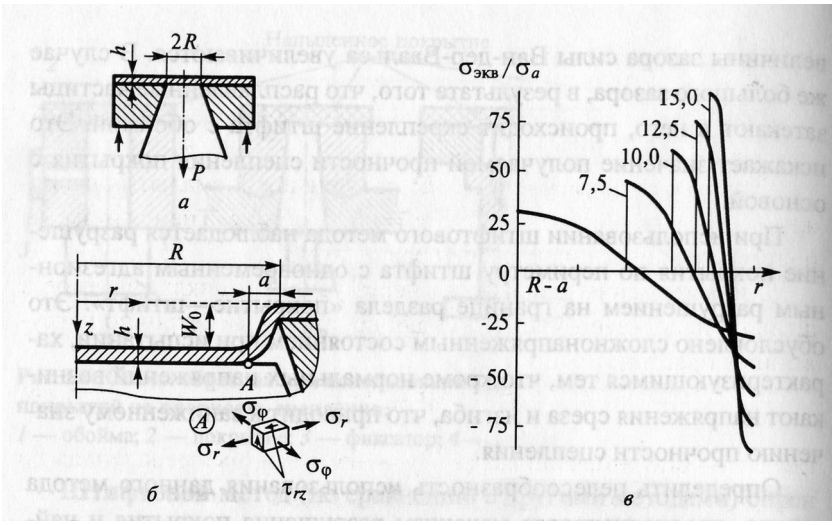


Рисунок 35 – метод отрыва покрытия от основы штифта

Для случая отрыва штифта от покрытия условие определения прочности сцепления можно записать в виде неравенства:

d<=4bt/G

где, d - диаметр штифта,

b - толщина покрытия,

t - напряжение среза в покрытии,

G - напряжение адгезионной прочности покрытия.

Анализируя неравенство можно сделать вывод, что для тонких покрытий из плазменно-напылённых материалов диаметр штифта не может превышать 2 мм. Вследствие этого считают, что данная схема нагружения обладает недостаточной точностью для определения средней величины прочности сцепления.

Условие адгезионного разрушения для схемы отрыва покрытия от основы штифта имеет вид:

$$D <= d + 4dbt/G \text{ ,мм}$$

Для этого случая величина диаметра штифта может быть любых размеров. Это позволяет проводить испытания при любом уровне значений разрушающих усилий и, таким образом, практически исключить ошибки регистрации разрушающих усилий. Кроме того, поскольку распределение дефектов в напылённом слое носит случайный характер, увеличение размеров нагружаемой зоны позволяет получить практически более важную интегральную характеристику прочности покрытия.

5. Промышленная безопасность и экология

С развитием плазменной техники и технологии решение вопросов улучшения качества условий труда направлено на сохранение высокого уровня здоровья и способности к активному выполнению профессиональных, общественных, биологических и других навыков работающих на производстве.

Результаты медицинского обследования рабочих, обслуживающих плазменные установки, многолетние наблюдения за состоянием здоровья лиц отдельных профессий позволяют утверждать, что комплекс неблагоприятных производственных факторов при плазменной обработке может приводить к развитию разнообразных расстройств нервной и сердечно-сосудистой систем, а также к заболеваниям органов дыхания, анализаторов.

Признаки нарушений вегето-сосудистой системы, а также разные степени профессионального снижения слуховой чувствительности выявлены в три раза чаще у металлизаторов плазменных покрытий, что связано, прежде всего, с влиянием высокочастотного шума более высокого уровня, чем при других видах технологии.

5.1. Анализ опасных и вредных факторов, сопровождающих процесс плазменного напыления

При выполнении напыления на работающих могут воздействовать опасные и вредные производственные факторы. К вредным производствен-ным факторам относятся: повышенная запылённость и загазованность воздуха рабочей зоны; ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучение дуги плазмотрона, а также инфракрасное излучение с напыляемой поверхности; электромагнитные поля; ионизирующие излучения; шум, ультразвук, статическая нагрузка на руку.

В зону дыхания работающих могут поступать аэрозоли в виде дисперсной системы из мелких частиц твёрдого вещества (алюминий, железо, их оксиды). Воздействие на организм выделяющихся вредных веществ может явиться причиной острых и хронических профессиональных заболеваний и отравлений.

Интенсивность излучения дуги в оптическом диапазоне и его спектр зависят от мощности дуги, применяемых материалов, плазмообразующего газа. При отсутствии защиты возможны поражения органов зрения (электрофтальмия, катаракта и т. п.) и ожоги кожных покровов.

При напылении плазмотроном - пистолетом имеет место статическая нагрузка на руки, в результате чего могут возникнуть заболевания нервно-мышечного аппарата плечевого пояса.

К опасным производственным факторам относятся воздействие электрического тока, искр и брызги, возможность взрыва баллонов и систем, находящихся под давлением; движущиеся механизмы и изделия.

Неправильная эксплуатация электрооборудования может привести к поражению электрическим током. Применение открытой струи плазмы, наличие искр, брызг расплавленного металла не только создают

возможность ожогов, но и повышают опасность возникновения пожара. Опасность создают использование при плазменном напылении газов, содержащих кислород, а также эксплуатация сосудов, работающих под давлением, не равным атмосферному. При плазменном напылении к интенсивным факторам относят:

- выделение вредных веществ;
- ультрафиолетовое излучение;
- шум;
- ультразвук;
- электрический ток;
- брызги и выбросы расплавленного металла;

к умеренным факторам относят:

- видимое излучение;
- инфракрасное излучение;
- движущиеся механизмы и изделия;
- системы, находящиеся под давлением, не равным атмосферному;

к незначительным:

- магнитные поля;
- статическая нагрузка на руку.

5.1.1. Пылегазообразные вещества

Состав пыли и газа, образующихся при напылении, зависит, главным образом, от типа напыляемых материалов. При напылении выделяется большое количество пыли, вследствие чего в зоне дыхания рабочего концентрация ее всегда больше предельно допустимой величины, которая составляет 4 мг/м куб.

Пыль оказывает на человека фиброгенное (действие на легкие), раздражающее, аллергенное и токсическое действие.

Механизм действия пыли на организм следующий: внутрь легких проникает пыль меньше 5 мкм, большие частицы задерживаются в

дыхательных трактах; пыль с размером от 0.2 до 5 мкм оседает в альвеолах легких и проникает в легочную ткань. Пыль с размером 0.2мкм не успевает осесть. Заболевания, вызываемые пылями, называются пневмоканиозами.

5.1.2. Ультрафиолетовое излучение

В зоне напыления температура дуги достаточно высока: от 2300 до 10000К, поэтому дуга является источником лучистой энергии широкого диапазона от ультрафиолетового до инфракрасного излучения.

Яркость дуги порядка 15Е+7 Кд/$м^2$ = 15Е+3 стильб, при физиологической норме не более 1 стильба =10000 Кд/$м^2$.

Ультрафиолетовое излучение - электромагнитные волны с длиной волны от 0.0136 до 0.04 мкм. Ультрафиолетовые лучи с длиной волны менее 0.32 мкм, действуя на глаз, вызывают заболевание, называемое электрофтальмией. Человек уже на начальной стадии этого заболевания ощущает резкую боль и ощущение песка в глазах, ухудшение зрения, головную боль.

Ультрафиолетовое излучение характеризуется двояким действием на организм: с одной стороны - опасностью переоблучения, а с другой его необходимостью для нормального функционирования организма, поскольку ультрафиолетовые лучи являются важным стимулятором основных биологических процессов.

Оценка ультрафиолетового облучения производится по величине эритемной дозы. За единицу эритемной дозы принимается эр, равный ватту мощности ультрафиолетового излучения с длиной волны 0.297 мкм. Для человека нормативная доза – эр * час/$м^2$ (эритемная доза) 7.5 Мэр * час/$м^2$ (предельно допустимая доза).

В результате электрических разрядов, ультрафиолетовой радиации и высокой температуры при напылении происходит образование озона. Концентрация озона в зоне дыхания может колебаться от 0.1 до 1 мг/м куб

(предельно допустимая концентрация 0.1мг/м куб). При больших концентрациях озон разлагается с взрывом.

5.1.3. Шум и ультразвук

Не менее вредны в процессе плазменного напыления шум и ультразвук. Шум неблагоприятно действует на организм человека, вызывает психические и физиологические нарушения, снижающие работоспособность и создающие предпосылки для общих и профессиональных заболеваний.

Неприятность шума объясняется тем, что звук имеет импульсный характер, непериодический, тогда как музыка и человеческая речь - колебания, имеющие периодический характер и поэтому лучше воспринимаются ухом.

Уровни шума принято измерять в относительных единицах, дб. Для измерения уровней шума используют шумомеры. Общие уровни шума, измеренные с помощью шумомера, называют уровнями звука и выражают в децибелах.

Нормативные значения уровня шума (ГОСТ 12.1.003-83) – уровни звука 85 дб.

При уровне шума 130-140 дб возникают боли в ухе (могут лопнуть барабанные перепонки). При уровне шума 85-90дб может наступить глухота постепенно. Постоянное воздействие шума приводит к неврологическим заболеваниям (постоянные боли в голове, сердце, потеря сна), развивается гипертония, спазмы сосудов и ухудшение работы желудка (язва).

Ультразвук оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека. Его действие может приводить к функциональным нарушениям нервной системы, головным болям, изменениям давления, состава и свойств крови, потере слуховой чувствительности и повышенной утомляемости.

Под ультразвуком понимают колебания, распространяющиеся в воздухе, жидкой и твердой средах с частотой 16 кГц.

Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах при действии ультразвука не должны превышать 80-90 дб.

5.2. Инженерные мероприятия по уменьшению воздействия вредных и опасных производственных факторов

Для проведения плазменного напыления выделяются помещения или изолированные участки цеха. Площадь помещения, не занятая оборудованием, не менее $10 м^2$ на каждого работающего. Помещения должны иметь звукопоглощающую облицовку, рассчитанную на снижение высокочастотного шума. Вспомогательные операции для плазменного напыления (приготовление порошков, механическая обработка) проводятся вне основных участков.

Баллоны со сжатыми газами необходимо устанавливать за пределами участка плазменного напыления с последующей подачей газа к газоразборному щиту.

5.2.1. Опасные факторы

Все машины, агрегаты и оборудование, используемые при напылении, имеют опасные зоны, в пределах которых не исключены случаи производственного травматизма. К ним относятся области разлета брызг обрабатываемого материала, агрегаты и токопроводящие линии, находящиеся под напряжением выше безопасного.

Электрический ток, проходя через организм, оказывает термическое, электролитическое и биологическое действие, вызывая общие и местные электротравмы.

Местные электротравмы подразделяются на электрические ожоги, электрические знаки, металлизацию кожи, механические повреждения, электроофтальмию.

Общие электротравмы или электрические удары по тяжести делятся на четыре степени:

1 - судорожное сокращение мышц без потери сознания;

2 - сокращение мышц с потерей сознания, но сохранившимся дыханием и работой сердца;

3 - потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания;

4 - клиническая (мнимая) смерть.

Поражающее действие электрического тока зависит от следующих факторов: значения и длительности протекания тока через тело человека, рода и частоты тока, индивидуальных свойств человека.

5.2.2. Электробезопасность

Основными причинами воздействия тока на человека являются: случайные прикосновения или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям; появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действиях персонала; шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода и др.

Основные меры защиты от поражения током: изоляция, недоступность токоведущих частей, электрическое разделение сети с помощью специальных разделяющих трансформаторов, применение малого напряжения (не выше 42В, а в особо опасных помещениях - 12В), использование двойной (рабочей и дополнительной) изоляции, выравнивание потенциала, защитные заземление и зануление, защитное отключение, применение специальных электрозащитных средств; организация безопасной эксплуатации электроустановок.

5.2.3. Вентиляция

Основным мероприятием, направленным на оздоровление атмосферы при процессе плазменного напыления является создание местной и общеобменной вентиляции. Но за счет общеобменной вентиляции практически невозможно снизить концентрацию загрязнений в рабочей

зоне. Поэтому необходимо применение местных отсосов. Всасывающие отверстия должны располагаться как можно ближе к месту напыления, так как скорость воздушного потока при удалении от всасывающего отверстия падает примерно обратно пропорционально квадрату расстояния.

Имеется множество конструкций местных отсосов, например:

- наклонные вытяжные панели и щелевые воздухоприемники;

- конструкции, позволяющие перемещать отсосы по длине воздуховодов или имеющие шарнирно - сочлененные воздуховоды.

Если технологический процесс не позволяет расположить приемник вредных веществ вблизи источника загрязнения, то следует применять сочетание отсосов с местной приточной вентиляцией, воздушными душами или подачей чистого воздуха под маску рабочего.

5.2.4. Защита от ультрафиолетового излучения

В качестве экранов используют стеклянные светофильтры: круглые и прямоугольные - для защитных очков, прямоугольные - для щитков. Светофильтры изготавливают из темного (ТС) и синего (СС) стекла.

Тип светофильтра, который необходимо применять в конкретных условиях работы, определяется в зависимости от свойств пропускания и оптической плотности светофильтра для различных участков спектра электромагнитных волн. Учитывая, что практически оценка фактических условий облучения электромагнитными волнами является трудоемким процессом, рекомендуется выбор марки светофильтра производить на основе оценки косвенных показателей (например, силы тока) [8].

Для плазменного напыления: при токе i=320-350 А – светофильтр С-9.

5.2.5. Методы борьбы с шумом

При ручном напылении деталей невозможно уменьшить звук, исходящий от плазмотрона (прямой звук), поэтому для снижения шума

нужно уменьшить энергию отраженных волн, т.е. произвести акустическую обработку помещения.

Под акустической обработкой помещения понимаются облицовка части внутренних поверхностей, ограждений звукопоглощающими материалами, а также размещение в помещении штучных поглотителей, представляющих собой свободно подвешиваемые объемные поглощающие тела различной формы.

Наибольший эффект при акустической обработке можно получить в точках, расположенных в зоне отраженного звука; в зоне прямого звука акустический эффект применения облицовок значительно ниже.

Звукопоглощающие облицовки размещаются на потолке и в верхних частях стен так, чтоб акустически обработанная поверхность составляла не менее 60% от общей площади помещения.

Эффективный способ уменьшения шума - помещение источников в звукоизолирующий кожух.

Высокая звукоизолирующая эффективность кожуха может быть достигнута только в случае отсутствия щелей и отверстий. При тщательной виброизоляции кожуха от фундамента и трубопроводов, а также при наличии на внутренней поверхности кожуха звукопоглощающего материала.

В качестве материаладля изготовления обшивки кожуха могут быть использованы сталь, алюминиевые сплавы, фанера, ДСП, стеклопластик. Звукопоглощающая способность кожуха определяется физическими параметрами материалов, конструктивными размерами его элементов.

Если нет возможности полностью изолировать либо источник шума, либо самого человека с помощью кожухов и кабин, то частично уменьшить влияние шума на человека можно путем создания на пути распространения шума акустических экранов.

Экраны применяются либо для ограждения источников шума от соседних рабочих мест, либо для отгораживания помещения с малошумным технологическим оборудованием от сильных источников шума.

Применение экранов целесообразно в сочетании с акустической обработкой.

Средство защиты органов слуха предназначены для защиты от производственных шумов с интенсивностью до 120дб (наушники и вкладыши) и более (шлемы).

Наушники имеют пластмассовые корпуса, звукопоглотители из ультратонкого стекловолокна с покрытием из поролона и протекторы из поливинилхлоридной пленки.

5.3. Расчет защиты от шума

Плазменное напыление происходит в помещении 4х5 и высотой 4,2 м, материал из которого сделаны стены – кирпич.

Необходимо создать требуемые шумовые условия работы для рабочего, находящегося в помещении механической обработки.

Шум исходящий от плазмотрона (85 дБ) является широкополосным, поэтому из всего спектра частот только на частоте 8000 Гц он будет наиболее сильным.

Требуемая звукоизоляция $R_{ТР}$, дБ, воздушного шума помещения плазменного напыления определяется:

$$R_{ТР} = L_{Ш} + L_{ДОП} + 10\lg S_{ОГР} - 10\lg B$$

где $L_{Ш} =$ 85 дБ – шум, исходящий от плазмотрона;

$L_{ДОП} =$ 74 дБ – допустимый октавный уровень звукового давления;

$S_{ОГР}=2\cdot2,4=8,4\,м^2$ - площадь стены, разделяющая помещения с источником шума и механической обработки;

$B=V/10=5\cdot4\cdot4,2/10=8,4\,м^2$ - постоянная помещения; V – объем помещения с ИШ;

$R_{ТР}=$ 85-74+9,24-9,24=9дБ;

Для снижение уровня шума на частоте 8000 Гц лучше всех подходит звукопоглощающие прошивные минераловатные маты (ТУ 21-24-51-100 - 73). Необходимое снижение уровня шума звукопоглощающей отделкой, дБ:

$$\Delta L=10\cdot\lg\left(B_2/B_1\right),$$

где B_1, B_2 - постоянные помещения до и после проведения акустической обработки.

$$B_1=A_1/\left(1-\alpha_{ПОМ}\right),$$

где A_1, A_2 - эквивалентная площадь звукопоглощения помещения до проведения акустической обработки и после;

$\alpha_{ПОМ}, \alpha_2$ - средний коэффициент звукопоглощения этого помещения до проведения акустической обработки и после;

$$A_1=\alpha_{ПОМ}\cdot S_{ОБЩ};$$

$$A_2=\Delta A+A;$$

здесь ΔA - добавочное поглощение, вносимое при акустической обработке;

$$\alpha_2=A_2/S_{ОБЩ}$$

При установке облицовок величина;

$$\Delta A=\alpha_{ОБЛ}\cdot S_{ОБЛ},$$

где $\alpha_{ОБЛ}$ - коэффициент звукопоглощения облицовки (при частоте 8000 Гц). Поглощение поверхностями помещения A, не занятыми облицовкой, определяется по формуле:

$$A=\alpha_{ПОМ}\left(S_{ОБЩ}-S_{ОБЛ}\right)$$

Звукопоглощающие панели устанавливаются на потолок, а на стены - панели высотой 1 м на уровне 3,2 м от пола.

$S_{ОБЩ}=$ 18*4,2+4*5*2= 115,6$м^2$ -площадь помещения с ИШ;

$S_{ОБЛ}=$ 5*4+18*1=38$м^2$ -площадь, облицованная звукопоглощающими панелями;

$\alpha_{ПОМ}$ =0,03; $\alpha_{ОБЛ}$ =0,98;

A_1=0,03*115,6=3,47;

$B_1=$ 3,47/(1-0,03)=3,6;

$\Delta A=$ 0,98*38=37,24

$A=$ 0,03*(115,6-38)=2,3

$A_2=$ 37,2+2,3=39,5

$\alpha_2=$ 39,5/115,6=0,34

$B_2=$ 39,5/(1-0,34)=59,8

$\Delta L=$ 10 lg (59,8/3,6)=12,2 дБ

Таким образом, данная облицовка подходит для шумовой защиты. Для защиты от шума работающего с плазмотроном нужно применять средства индивидуальной защиты от шума.

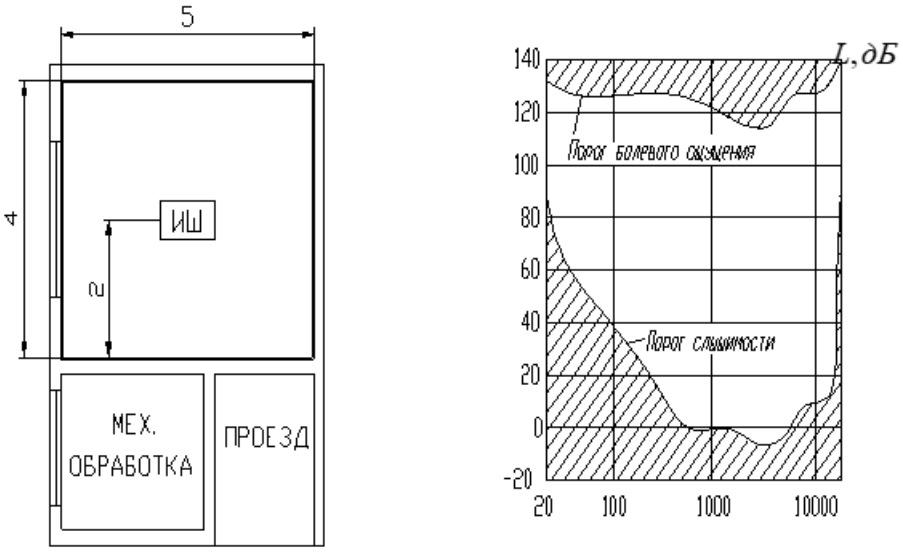
5.3.1. Средства индивидуальной защиты от шума

Когда невозможно уменьшить шум, то применяют средства индивидуальной защиты, предотвращающие профессиональные заболевания работающих. К средствам индивидуальной защиты (противошумам) относят вкладыши, наушники и шлемы.

Вкладыши – вставляемые в слуховой канал мягкие тампоны из ультратонкого волокна. Это самое дешевое и компактное средство защиты, но недостаточно эффективное (снижение шума 5-20 дБ) и неудобное, т.к. раздражается слуховой канал.

Наушники пропускают звуки речи, но не пропускают шум от оборудования, что позволяет разговаривать при работе в наушниках и слышать сигналы об опасности. Они плотно облегают ушную раковину и удерживаются дугообразной пружиной.

Шлемы. Применяются при воздействии шумов с высокими уровнями



(более 120 дБ).

Рисунок 36 – Шумовые условия работы для рабочего

Таблица 9 – Допустимые уровни шума

Рабочие места	Уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постоянные рабочие места в производственных помещениях	99	92	86	83	75	78	76	74

5.4. Экологическая оценка проекта

В процессе бурения зубья долот взаимодействуя с твердой породой под колоссальным давлением обламываются, стираются или выпадают из основы долота. Выход из действия одного из зубьев приводит к последующей поломки остальных, и соответственно непригодности долот для дальнейших работ.

Еще одно наиболее уязвимое место на буровом долото является края корпуса. В одношарошечном долото истирание металла приводит к выпадению зубьев и описанной выше поломке оборудования.

Плазменное напыление обеспечивает высокую работоспособность деталей за счет отличного качества напыленного металла, его однородности, а также благоприятной структуры.

Повышение эффективности использования плазменного напыления, в том числе и на шарошки бурового долото, связано с разработкой методов и средств автоматизации и компьютеризации процесса напыления.

Переход на автоматизированное нанесение покрытий позволит существенно улучшить качество и стабильность свойств напыляемых деталей, повысить производительность труда, снизить себестоимость продукции, сократить количество обслуживающего персонала и свести к минимуму влияние вредных условий труда. Все это произойдет за счет автоматизации самих режимов напыления, максимального исключения человеческого фактора из процесса напыления, увеличения коэффициента использования материала (КИМ), что также позволит уменьшить выброс вредных веществ (порошков) во внешнюю среду.

Основными факторами, сдерживающими широкое внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами плазменного напыления, на сегодня являются: недостаточная информация об объекте управления; невысокая точность функциональных зависимостей, описывающих процесс напыления; отсутствие методик и алгоритмов управления автоматизированными системами напыления [10].

6. Организационно-экономическая часть

6.1. Описание разработанной технологии

Задачей настоящего дипломного проекта является разработка технологического процесса напыления шарошки бурового инструмента лунохода и марсохода.

Цель организационно-экономической части дипломного проекта: рассчитать затраты на разработку и реализацию технологии нанесения износостойкого покрытия на шарошку бурильного инструмента и обосновать экономическую эффективность ее внедрения. Выбрать технологический процесс, не только удовлетворяющий эксплуатационным

требованиям к покрытию, но и экономически выгодный.Основные технологические и экономические показатели методов нанесения покрытий приведены в таблице 1.[1]

Как видно из табл. 1, плазменное напыление является самым дешевым, находясь по своим свойствам на уровне других методов.

Основным недостатком дозвуковых методов является низкая прочность сцепления покрытия с материалом основы и высокая пористость, что недопустимо при напылении износостойких покрытий. Среди сверзвуковых методов газотермического нанесения покрытий наиболее универсальным и прогрессивным является плазменный.

Таблица 10 – Сравнение характеристик методов нанесения покрытий

Метод нанесения покрытий	**Температура струи (дуги), К**	**Скорость струи, м/с**	**Скорость напыляемых частиц, м/с**	**Прочность сцепления МПа**	**Стоимость энергозатрат на напыление толщиной 0,1 мм, руб/м^2**
Газопламенное напыление	2400...2800	30...160	30...50	10...25	12000
Детонационное напыление	2400...2800	2700...2950	700...850	75...100	40000
Плазменное напыление: $Ar - N_2$ воздух	6000...20000 3000...12000	800...1400 200...1500	40...120 40...250	20...80 15...100	4900 1900

6.2. Характеристики базовой технологии напыления

При напылении в качестве плазмообразующего газа обычно используют аргоноазотную смесь, с помощью которой можно наносить покрытия из различных материалов. Но себестоимость этого процесса будет выше, чем при использовании в качестве рабочего газа воздуха, а качество покрытия лучше, чем при использовании воздушной среды [9].

Самой популярной и старой разновидностью электрического напыления является дуговая металлизация. Ранее при такой металлизации использовали дугу, горящую на переменном токе, что не позволяло получать устойчивый процесс распыления проволоки.

В настоящее время для создания дуги в электрометаллизаторах используют постоянный ток, обеспечивающий лучшую стабильность процесса нанесения покрытия. Разработанный в последнее время способ электроимпульсного нанесения покрытий дал хорошие результаты при нанесении покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей машин. В настоящее время этот метод продолжают совершенствовать

6.3. Анализ объема выпуска изделия

Исходя из запроса предприятия-заказчика по количеству изготавливаемой продукции объем выпуска изделия N=40 *шт/год*. Изделия изготавливаются под заказ партиями по 4 *шт*.

Предприятия самостоятельно планируют свою деятельность на основе договоров, заключенных с потребителями продукции и

поставщиками материально-технических ресурсов, и определяют перспективы развития исходя из спроса на производимую продукцию, работы и услуги. В своей деятельности предприятия обязаны учитывать интересы потребителя и его требования к качеству поставляемой продукции и услуг.

Поэтому анализ работы промышленных предприятий начинают с изучения показателей выпуска продукции, который предполагает следующие этапы:

Анализ формирования и выполнения производственной программы;

Анализ объема продукции;

Анализ ассортимента продукции;

Анализ структуры продукции;

Анализ качества продукции;

Анализ ритмичности производства;

Анализ выполнения договорных обязательств и реализации продукции.

6.4. Трудоемкость по этапам проектирования

Директивный срок проектирования технологического процесса – 126 дней. Исходя из заданного срока выполнения работ, определим общий фонд рабочего времени, учитывая, что на 6 мес. (181 дня) в месяце 22 рабочих дня.

$T = N \cdot T_f \cdot f = 126 \cdot 8 \cdot 1 = 1008$ *час*, где N - общее число рабочих дней без учета выходных и праздничных дней, f - число рабочих смен в день, T_f - продолжительность рабочей смены.

Таким образом, суммарная трудоемкость работы составит:

$T = 1008$ чел $\cdot$ часов.

При проектировании технологических процессов трудоемкость изготовления единицы продукции определяется как сумма трудоемкости по операциям.

Определение количества исполнителей

Формируем временный творческий коллектив исполнителей в следующем составе:

1. Инженер 1 кат.
2. Инженер-технолог.
3. Инженер 3 кат.

Порядковые номера исполнителей соответствуют указанным в таблице 2.

6.5. Расчет затрат на разработку технологии плазменного напыления износостойкого покрытия

Рассчитаем затраты по методике, применяемой в бухгалтерии для реальных работ.

Т.к. при разработке технологии было произведено опытное напыление, в расчетах указываются затраты на материалы, электроэнергию и амортизацию оборудования.

Статьи затрат:

– основная заработная плата исполнителей;

– дополнительная заработная плата;

– стоимость основных и дополнительных материалов, израсходованных в течение работ;

– начисления на заработную плату;

– командировочные расходы;

– силовая электроэнергия;

– амортизационные отчисления;

– накладные расходы.

Размер должностного оклада назначается исходя из договора на выполнение работы, заключенного между заказчиком и исполнителями.

Для вычисления фонда заработной платы ОЗП рассчитаем среднюю дневную ЗП каждого исполнителя по формуле: $Z_{сд} = \frac{Z_i}{F_m}$,

где Z_i - должностной оклад исполнителя;

$Z_{сд}$- средний дневной оклад исполнителя;

F_m- месячный фонд рабочих дней (22 дня);

По результатам расчетов составим таблицу 11.

Таблица 11 – Заработная плата по должностям

Должность	**должностной оклад (руб/мес)**	**средний дневной оклад, $Z_{сд}$**
Инженер 1 категории	25000	1130
Инженер-технолог	23000	1045
Инженер 3 категории	20000	900

Подсчитаем заработок каждого исполнителя по этапам работ по формуле :

$$Z_0 = Z_{\text{(}} \cdot \text{(}$$

Полученные результаты отразим в таблице 12.

Таблица 12 – Заработок каждого исполнителя

Этап	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Z_{oi}**
Инженер 1 категории	30000	-	-	-	-	5250	35250
Инженер-технолог	6765	19680	–	–	–	2460	28905
Инженер 3 категории	-	-	-	-	2820	-	2820
Токарь	–	–	16000	1680	-	-	17680
Оператор Плазменной установки «Киев-7»	–	–	8500	340	-	-	8840

Итого: 93495 руб.

Основная заработная плата: **93495** *руб*.

Дополнительная заработная плата (17%): 15894,2 *руб*.

Общая сумма затрат на заработную плату: 109389,2 руб.

Отчисления на социальные нужды (30%): 32816,76 руб.

Расходы на основные материалы:

расходные материалы (бумага А4 500 листов – 100 *руб*., ватман А1 10 листов – 100 *руб*., картридж для принтера 300 *руб*.)

на разработку технологии напыления: 500 *руб.*

покупка порошков для опытного напыления

и расходных материалов для проведения исследований

$$g_C = \frac{m_П}{\eta} = \frac{\pi \cdot Д \cdot \delta \cdot \rho_П \cdot l}{\eta \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 130 \cdot 0,085 \cdot 13,3 \cdot 4}{0,7 \cdot 1000} = 0,5$$

кг, где:

Д – длина детали (130 *см*)

δ - толщина покрытия (0.035 *см*)

$\rho_П$ - плотность покрытия (13,3 *г/см*^{3}),

η - коэффициент использования материала (0.7).

Для напыления использовали 0,5 *кг* порошка,

g=0,5 – 0,4 =0,1 кг – распылено мимо детали.

$C_М = g_C \cdot Ц_C = 0,5 \cdot 850 = 425$ *руб*.

Силовая электроэнергия:

$$E_{ek} = \frac{w_{yct} \cdot t_{ucn} \cdot k \cdot C_{el}}{\eta} = \frac{120 \cdot 10,75 \cdot 0,8 \cdot 2,5}{0,8 \cdot 60} = 50$$

руб.

$W_{уст}$ – суммарная установленная мощность оборудования,

$t_{исп}$ – время использования электроэнергии,

k – коэффициент загрузки оборудования,

C_{el} – стоимость силовой электроэнергии,

η – КПД электродвигателя.

Амортизация оборудования.

Для расчета необходимо посчитать $K_З$ – коэффициент загрузки оборудования. Во время разработки технологии использовалось оборудование для плазменного напыления на воздухе с 3 по 6 этапы проектирования, а именно 43 рабочих дня ($F_т$ =344 *ч*.).

$K_З = F_т \cdot / F_{ГОД} = 344/1980 = 0{,}174$,

где $F_{ГОД}$=1980 *ч* - фонд времени работы оборудования за год.

$C_{АМ} = 0{,}25 \cdot Ц \cdot к_З$, где 0,25 – норма амортизации (25*%)*,

Ц – цена оборудования , используемого для напыления,

$к_З$ – коэффициент загрузки оборудования.

Ц= 310000(установка «Киев-7») + 30000 (плазмотрон РПД – 03) + +15000(порошковый вибратор)=355000 *руб*.

$C_{АМ} = 0{,}25 \cdot 355000 \cdot 0.174 =$ **15443** *руб*.

Накладные расходы (130% от ОЗП) 121543,5 руб.

Все полученные данные сведем в таблицу 5.

Таблица 13 – Статьи затрат

Статьи затрат	**руб.**
основная зарплата	**93495**
дополнительная зарплата	15894,2
отчисления на социальные нужды	32816,76
расходные материалы	500
Порошок ПРН70Х17С4Р4	425
силовая электроэнергия	50
амортизация оборудования	15443
накладные расходы	121543,5
Итого	280167,46

Итого затрат на разработку технологии плазменного напыления износостойких покрытий: **280167,46 руб.**

Срок списания расходов – 3 года.

Способ списания – линейный.

6.6. Расчет величин капитальных затрат, связанных с внедрением в производство проектируемого технологического процесса

Для базового варианта величин капитальных затрат равны 310000 руб. (установка «Киев – 7») и 30000 руб. (плазмотрон РДП – 03). В проектируемом – необходимо купить роторный порошковый дозатор и необходимы затраты на изготовление специального насадка. На данный момент времени (2013 г.) вибратор порошкового дозатора (б/у)

обошелся в 3000 *руб*., а на изготовление специального насадка израсходовано 5000 *руб*.

Т. о. суммарные капитальные затраты

$K_б$=310000+30000=340000 *руб*.

$K_{пр}$=340000+3000+5000=348000 *руб*.

6.7. Расчет технологической себестоимости напыления единицы продукции по проектируемому и базовому вариантам

Себестоимость рассчитывают по статьям затрат: затраты на основные и вспомогательные материалы, топливо и электроэнергию для технологических целей, заработная плата рабочих (основная, дополнительная, отчисления в пенсионный фонд), затраты на содержание, обслуживание и эксплуатацию оборудования.

Себестоимость $C=C_М+C_З+C_{АМ}+C_Э+C_{РЕМ}$, где:

С – себестоимость напыления покрытия на единицу продукции,

$C_М$ - затраты на основные и вспомогательные материалы,

$C_З$ - заработная плата рабочих (основная, дополнительная, отчисления на социальные нужды),

$C_{АМ}$ - амортизация оборудования (с учетом коэффициента загрузки оборудования),

$C_Э$ - затраты на электроэнергию,

$C_{РЕМ}$ - затраты на ремонт оборудования (с учетом коэффициента загрузки оборудования),

Исходные данные для расчета.

Мощность плазмотрона……..96 *кВт*

Мощность установки……120 *кВт*

Мощность вспомогательных устройств……14 *кВт*

Расход газов……30 *л/мин*

Зарплата оператора плазменного напыления……118 ,75*руб/ч*

Стоимость электроэнергии……..2,5*руб/кВт*

Стоимость основных материалов (по данным http://www.gcs.su , справочник металлургических цен):

Порошка ПРН70Х17С4Р4……..850 *руб/кг*

Стоимость рабочего газа:

Аргон-азотной смеси…… 0,70 *руб/л*

Воздуха……..0,02 *руб/л*

Отчисления на амортизацию оборудования

(% от полной стоимости)……25%

Затраты на материалы.

$С_М = g_С \cdot Ц_С$, где

$g_С$ – норма расхода порошка при напылении,

$Ц_С$ – цена порошка.

1) Расход и стоимость основного материала при нанесении покрытия:

$$g_C = \frac{m_П}{\eta} = \frac{\pi \cdot Д \cdot \delta \cdot \rho_П \cdot l}{\eta \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 0,085 \cdot 13,3 \cdot 4}{0,7 \cdot 1000} = 0,5$$

кг, где:

Д – длина детали (50 *см*)

δ - толщина покрытия (0.035 *см*)

$\rho_П$ - плотность покрытия (13,3 *г/см*^{3}),

η - коэффициент использования материала (0.7).

Для напыления использовали 0,5 *кг* порошка,

g=1,1 – 1,08 =0,2 кг – распылено мимо детали.

$C_М = g_C \cdot Ц_C = 0,5 \cdot 850 = 425$ *руб*.

2) Расход и стоимость плазмообразующего газа:

$g_Г = 30 \cdot 195 = 5850$ *л*, где

30 *л/мин* – расход газа ,

производительность плазмотрона РПД-3 равна 10 *кг/ч*. Для напыления одной детали израсходовали *1 кг* порошка, отсюда 3 *часа* 15 *мин* (195 *мин*) – основное время операции напыления порошка.

Стоимость аргон-азотной смеси:

$C_{Ма\text{-}а} = g_{а\text{-}а} \cdot Ц_{а\text{-}а} = 5850 \cdot 0,70 = 4095$ *руб*.

Стоимость воздуха:

$C_{Мв}=g_в \cdot Ц_в=5850 \cdot 0,02=117$ *руб*.

Затраты на материалы в базовом варианте :

$C_{МБ}=C_М+C_{Ма-а}=425+4095=4520$ *руб*.

Затраты на материалы в проектируемом варианте :

$C_{Мпр}=C_{М1}+C_{М2}+C_{М4}=425+117=542$ *руб*.

6.8. Затраты на электроэнергию

Затраты на электроэнергию в базовом и проектируемом вариантах будут равны, так как мощности плазмотрона РПД-03 и плазмотрона на воздухе практически одинаковы, время напыления в базовом и проектируемом вариантах также будут равны.

$C_Э=NK_зЦ_ЭT_{ШТ}$, где:

N –установленная мощность установки,

$T_о=10$ *мин*. – основное время выполнения операции

$T_В=10$ *мин*. – вспомогательное время выполнения операции (по 10 *мин*. на каждую операцию напыления),

а - процент времени на обслуживание составляет 15-17 % от оперативного времени $T_{ОП}=T_О+T_В=2$ *мин*, принимаем 15% (0,3 *мин*.).

б - процент на отдых в зависимости от характера факторов, влияющих на утомляемость. Может колебаться от так как процесс плазменного напыления – довольно вредное производство (ультрафиолет, шум, пыль и др.), то б принимаем от $T_{ОП}$ (1,5 *мин*.).

$T_{ШТ}=T_{ОП}(1+(а+б)/40)=10(1+(2+1,5)/40)=10,75$ мин.

Нормы времени по операциям для проектируемого варианта и базового взяты без изменений. Так как, производительность плазмотрона, а также коэффициенты использования порошка при напылении покрытия на воздухе и в аргон-азотной среде равны.

$K_З$ – коэффициент загрузки оборудования

$K_З = N \cdot T_{ШТ}/F_{ГОД}=40 \cdot 18,75/1980=0,283$

Где N=40 *шт./год*, $F_{ГОД}$=1980 *ч* - фонд времени работы оборудования за год.

$Ц_Э$ – цена 1 *кВт ·ч.* = 2,5 руб.

$T_{ШТ}$ – штучное время операции напыления.

$N=N_Д+N_У+N_{ВСП}$,

$N_Д$ - Мощность плазмотрона (*кВт)*,

$N_У$ - Мощность установки (*кВт)*,

$N_{ВСП}$ - Мощность вспомогательных устройств (*кВт)*.

$C_Э = (N_Д+N_У+N_{ВСП}) \cdot K_З \cdot Ц_Э \cdot T_{ШТ}/60$

$C_Э =(96+120+14) \cdot 0,283 \cdot 2,5 \cdot 10,75/60=50,8$ руб.

6.9. Заработанная плата оператора плазменного напыления

Заработанная плата оператора с учетом всех коэффициентов и отчислений $C_З$=118,75 руб./час, $C_З$=1,98 руб./мин

За 10 *мин*. 20 *руб.*

Заработанная плата оператора плазменного напыления в базовом и проектируемом вариантах равна.

Расходы на оплату труда производственных рабочих определяются по формуле:

$$S_{пр.} = S_{осн.} + S_{доп.} + S_{с.в.}, \quad (22)$$

где Sосн. – расходы на основную заработную плату;

Sдоп. – расходы на дополнительную заработную плату;

Sс.в. – расходы на социальное страхование.

6.10. Амортизация оборудования

Списание первоначальной стоимости основных средств осуществляется линейным методом, пропорционально объему производственных работ.

Сумма начисленной за один месяц амортизации:

$S_{1мес} = C_п \cdot K$,

где $C_п$ – первоначальная стоимость оборудования, руб; $K = 1/n$ – норма амортизации в долях к первоначальной стоимости оборудования, где

n – время полезного использования оборудования, выраженное в месяцах.

Величина амортизационных отчислений:

$S_{ам} = S_{1мес}\, T_и/F$,

где $T_и$ – фактическое время использования оборудования; F – месячный фонд времени работы оборудования (21 день).

$С_{АМ}=0{,}25 \cdot Ц \cdot к_З$, где

0,25 – норма амортизации (25*%),*

Ц – цена оборудования , используемого для напыления,

$к_З$ – коэффициент загрузки оборудования.

В базовом варианте:

$С_{АМб}=0,25 \cdot 340000 \cdot 0.283=24055$ *руб.*

В проектируемом варианте:

$С_{АМпр}=0,25 \cdot 348000 \cdot 0.283=24621$ *руб.*

Затраты на ремонт оборудования:

$С_{РЕМ}=0,05 \cdot Ц \cdot к_З$, где

0,05 – процент отчисления на ремонт (5%),

Ц – цена оборудования , используемого для напыления,

$к_З$ – коэффициент загрузки оборудования.

В базовом варианте:

$С_{РЕМб}=0,05 \cdot 340000 \cdot 0.283=4811$ *руб.*

В проектируемом варианте:

$С_{РЕМпр}=0,05 \cdot 348000 \cdot 0.283=4924$ *руб.*

6.11. Себестоимость изготовления годовой продукции по базовому и проектируемому вариантам

Себестоимость – это затраты на единицу произведенной продукции, выполненной работы или оказанной услуги. Иначе – это цена ресурсов вашего предприятия, израсходованных на то, чтобы продукт появился.

Кроме того, зачастую именно себестоимость – отправная точка при формировании продажной цены изделий, работ или услуг предприятия. Значит, она лежит в основе ценовой политики и через это влияет на выручку.

$$С_Б=С_{МБ}+С_{ЭБ}+С_{ЗОБ}+С_{ЗДБ}+С_{ЗССБ}+С_{АМБ}+С_{РЕМБ}$$

$$С_Б=(4520+50)\cdot 40+93495+15894,2+24055+32816,76+4811=353871,96$$ *руб.*

$$С_{ПР}=С_{МПР}+С_{ЭПР}+С_{ЗОПР}+С_{ЗДПР}+С_{ЗССПР}+С_{АМПР}+С_{РЕМПР}$$

$$С_{ПР}=(542+50)\cdot 40+93495+15894,2+24621+32816,76+4924=195430,96$$ *руб.*

6.12. Сравнение базового и проектируемого вариантов по статьям затрат себестоимости изготовления продукции

Таблица 14 – Сравнение базового и проектируемого вариантов

Наименование статей расхода	Стоимость расхода, *руб*.		Разница, руб
	базовый	проектируемый	
Затраты на материалы, на 40 *шт*.	180800	21680	159120
Затраты на электроэнергию, в *год*	2000	2000	0
Основная и дополнительная заработанная плата оператора плазменной установки «Киев-7», в *год*	109389,2	109389,2	0
Отчисление на соцстрах, в *год*	32816,76	32816,76	0
Амортизация оборудования	24055	24621	-566
Затраты на ремонт оборудования, в год	4811	4924	-113
Итого	353871,96	195430,96	158441

Таким образом мы видим разницу между базовым и проектируемым вариантом по статьям затрат себестоимости изготовления продукции. Уменьшаются затраты на амортизацию и ремонт оборудования.

6.13. Расчет показателей сравнительной экономической эффективности

1). Условно-годовая экономия от снижения себестоимости:

$Э_С=(С_Б–С_{ПР}) – З_{ПР}/Т_{СП}$, где

$С_Б$, $С_{ПР}$ – соответственно себестоимости изготовления единицы продукции по базовому и проектируемому вариантам;

$З_{ПР}$ – затраты на проектирование, $З_{ПР}$ = 297684 руб.;

$Т_{СП}$ – срок списания расходов на проектирование, $Т_{СП}$ = 3 г.

$Э_С=(353871 –195430) –280610/3 = 158441 – 93536 = 64905$ руб.

2). Срок окупаемости капитальных затрат:

$$T_{ОК}=\frac{K_{ПР}-K_Б}{Э_С}=\frac{348000-340000}{64905}=\frac{8000}{64905}=0.12$$

г.

Таблица 15 – Итоговая таблица

Сравниваемые величины	Обозначение	Ед. измер.	Базовый вариант	Проектируемый вариант
Годовой объем выпуска продукции	$N_Г$	Шт/год	40	40
Себестоимость изготовления единицы продукции	$С_Б$, $С_{ПР}$	руб.	8846,8	4885,8
Капитальные затраты	$К_Б$, $К_{ПР}$	руб.	340000	348000
Срок окупаемости капитальных затрат	$Т_{ОК}$	год	0,12	

Из приведенных расчетов следует, что при использовании разработанного варианта технологии достигается более значительный экономический эффект, чем при использовании применяемой технологии. Кроме того, ликвидируется тяжелый физический труд (при перемещении баллонов со сжатым газом), увеличивается безопасность рабочего персонала, уменьшается занимаемая производственная площадь.

При расчете годового экономического эффекта мы исходили из экономии на основных материалах, в частности, процесс напыления проводили с использованием воздуха, а не аргон-азотной смеси. На самом деле экономический эффект от внедрения данной технологии гораздо

выше, если учитывать, что технологию плазменного напыления можно использовать и на других конструктивных узлах.

Заключение

В данном дипломном проекте было разработан технологический процесс повышения изностойкости шарошек бурового инструмента методом плазменного напыления. В работе было рассмотрено и доказано, что изготовление таких деталей другими методами нецелесообразно. Рассмотрены методы изготовления деталей и сделаны выводы. Также был проведен расчет для защиты окружающей среды, в частности расчет защиты от шума.

Также была рассчитана экономическая эффективность изготовления изделия, в результате чего был выбран один из вариантов плазменного напыления.

Разработанный технологический процесс удовлетворяет техническому заданию, а для более широкого внедрения данного технологического процесса и его распространения при производстве изделий различной формы из широкого класса напыляемых материалов необходимо дальнейшее исследование поведения частиц в напыляемой матрице, а также исследование возможностей использования дискретных волокон и дисперсионно-упрочняющих добавок.

Список использованных источников

1. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. Пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. 360с.: ил. (Технологии ракетно-космического машиностроения.)
2. Газотермическое напыление: учеб. Пособие / кол. авторов; под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 244с.
3. Исследования и разработки процессов плазменного напыления. Лаборатории нанесения плазменных покрытий при МГТУ им. Н.Э. Баумана.
4. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник, 1987.
5. "Исследования и разработки процессов плазменного напыления" Лаборатории нанесения плазменных покрытий при МГТУ им. Н.Э. Баумана.
6. Зурабов В.М., Пузряков А.Ф. Математическая модель для управления процессом плазменного напыления. Порошковая металургия. №11. 1985г.
7. Г.Г. Максимович, В.Ф. Шатинский, В.И. Копылов. "Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями". Киев, "Наукова думка", 1983.
8. Белов С.В. Средства защиты в машиностроении. Справочник.
9. К.А. Грачева. "Выполнение организационно-экономической части дипломных проектов технологического профиля". Ч.1.,Ч.2. Изд. МГТУ, 1992.
10. Юдин Е.Я. Охрана труда в машиностроении. 2-е изд. М. Машиностроение. 1983г.
11. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. – К.: «Экотехнология», 2003. – 64 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

В графическую часть дипломного проекта входят:

1) Нанесение покрытий на шарошки (рисунки А.1.);
2) Сборочный чертеж распылителя (рисунок А.2);
3) Сборочный чертеж бурового станка (рисунок А.3);
4) Чертежи оснастки (рисунки А.4);
5) Чертежи нанесения покрытий (рисунки А.5);
6) Общий чертеж роторного дозатора (рисунок А.6);
7) Выбор режимов нанесения покрытий (рисунок А.7, А.9);
8) Общий чертеж дробеструйной установки (рисунок А.8);
9) Операционный технологический процесс (рисунок А.10);
10) Шарошки бурового инструмента (рисунок А.11).

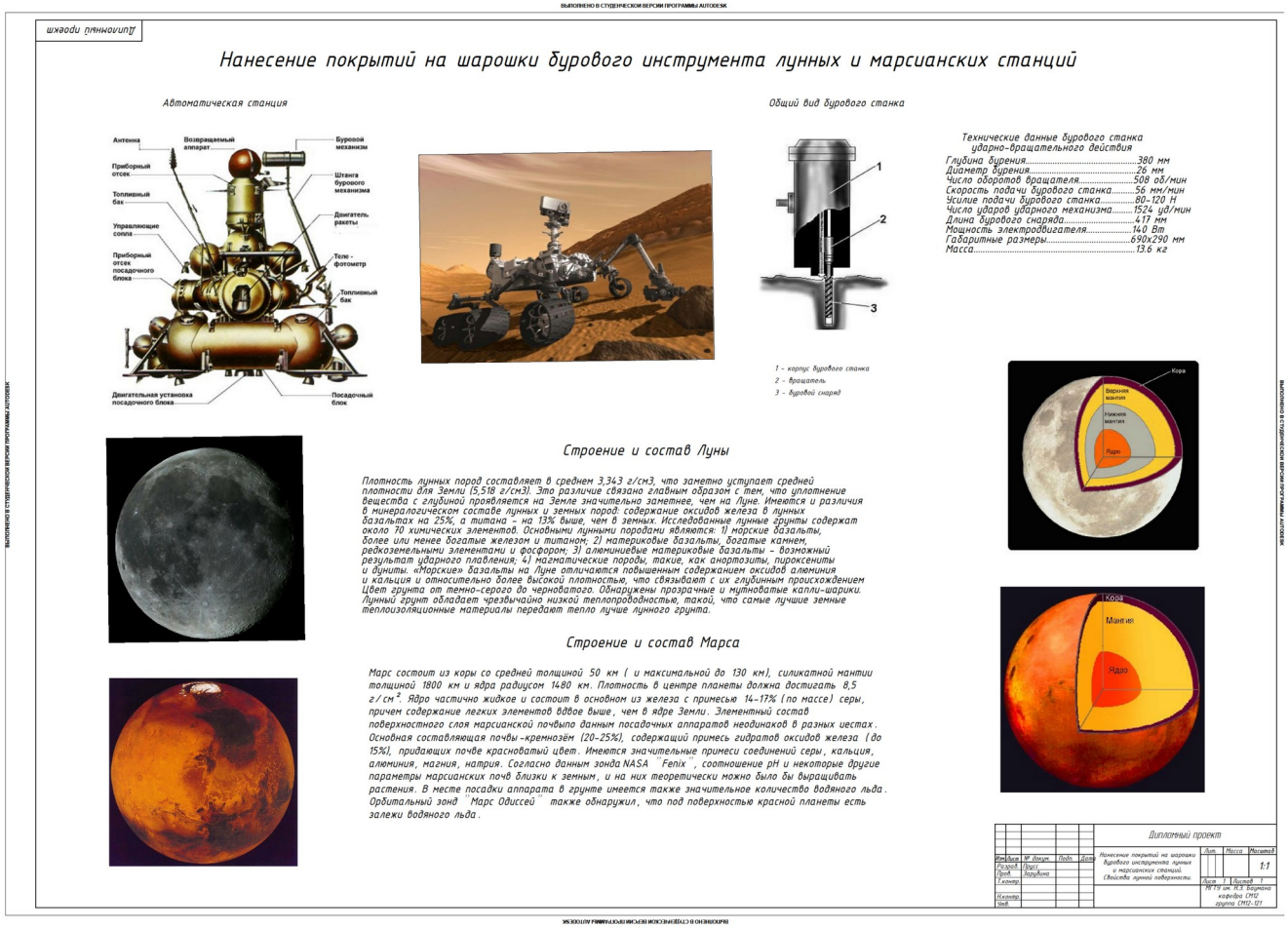


Рисунок А.1 – Нанесение покрытий на шарошки

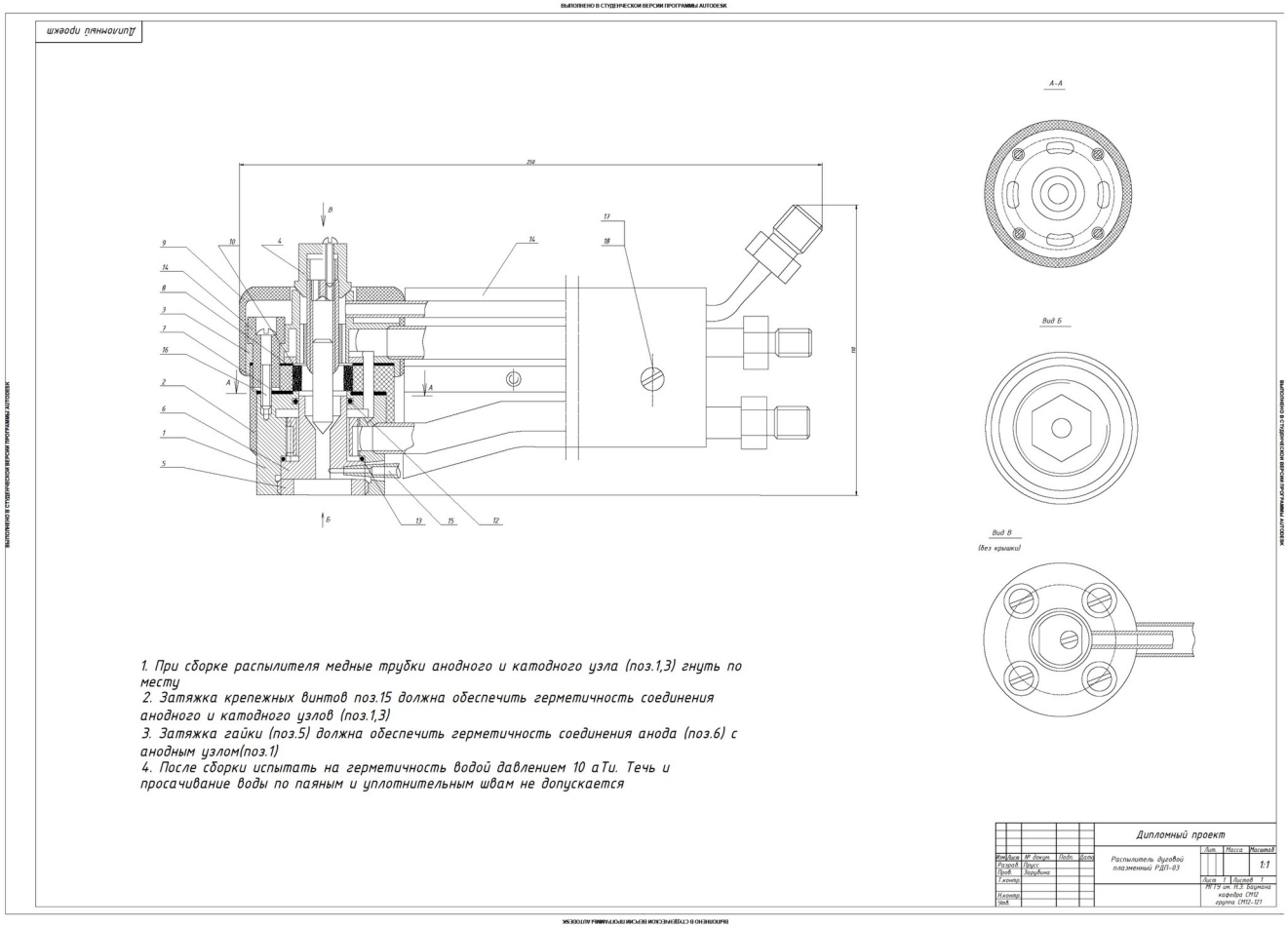


Рисунок А.2 – Распылитель дуговой плазменный

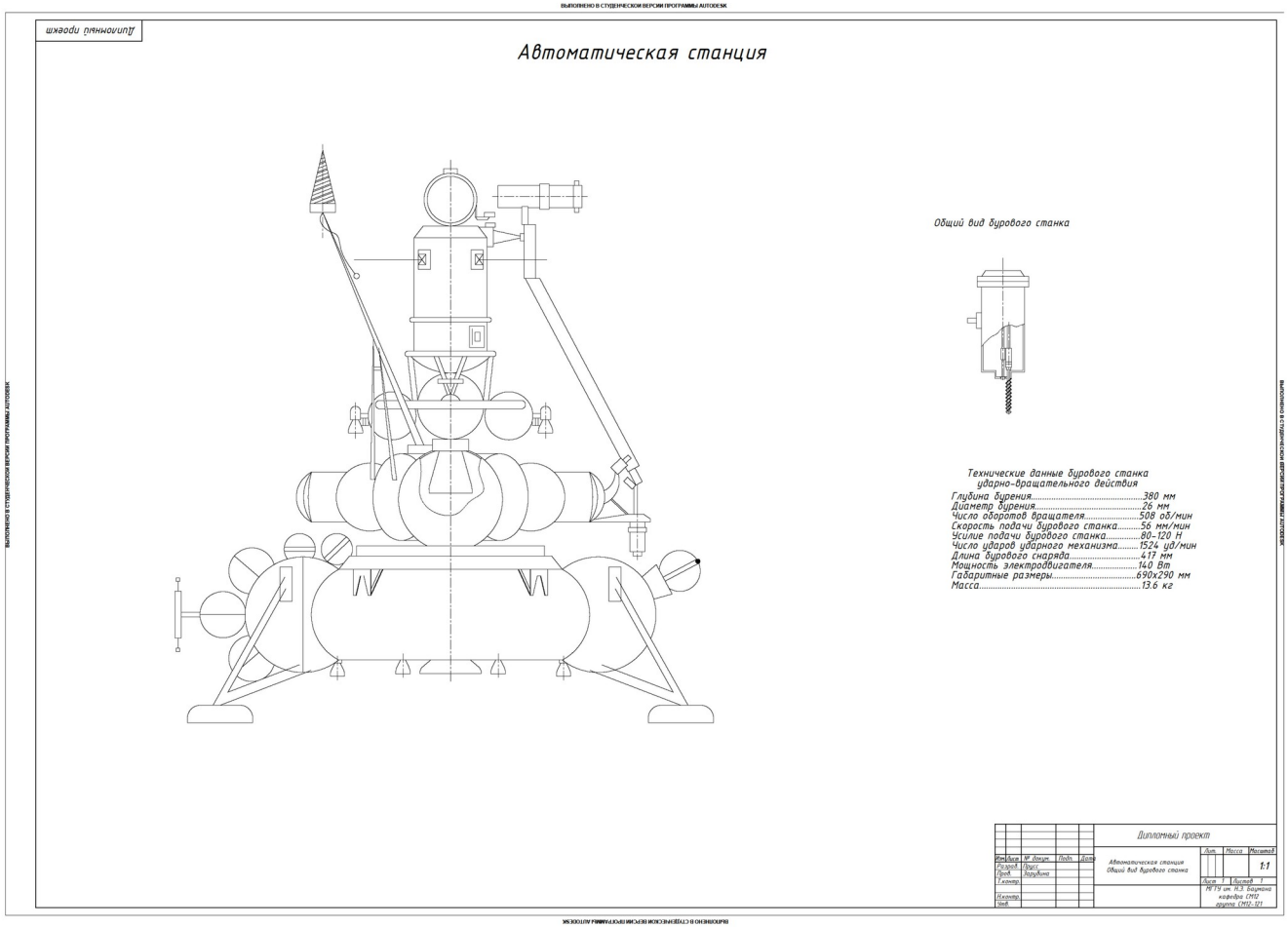


Рисунок А.3 – Общий вид бурового станка

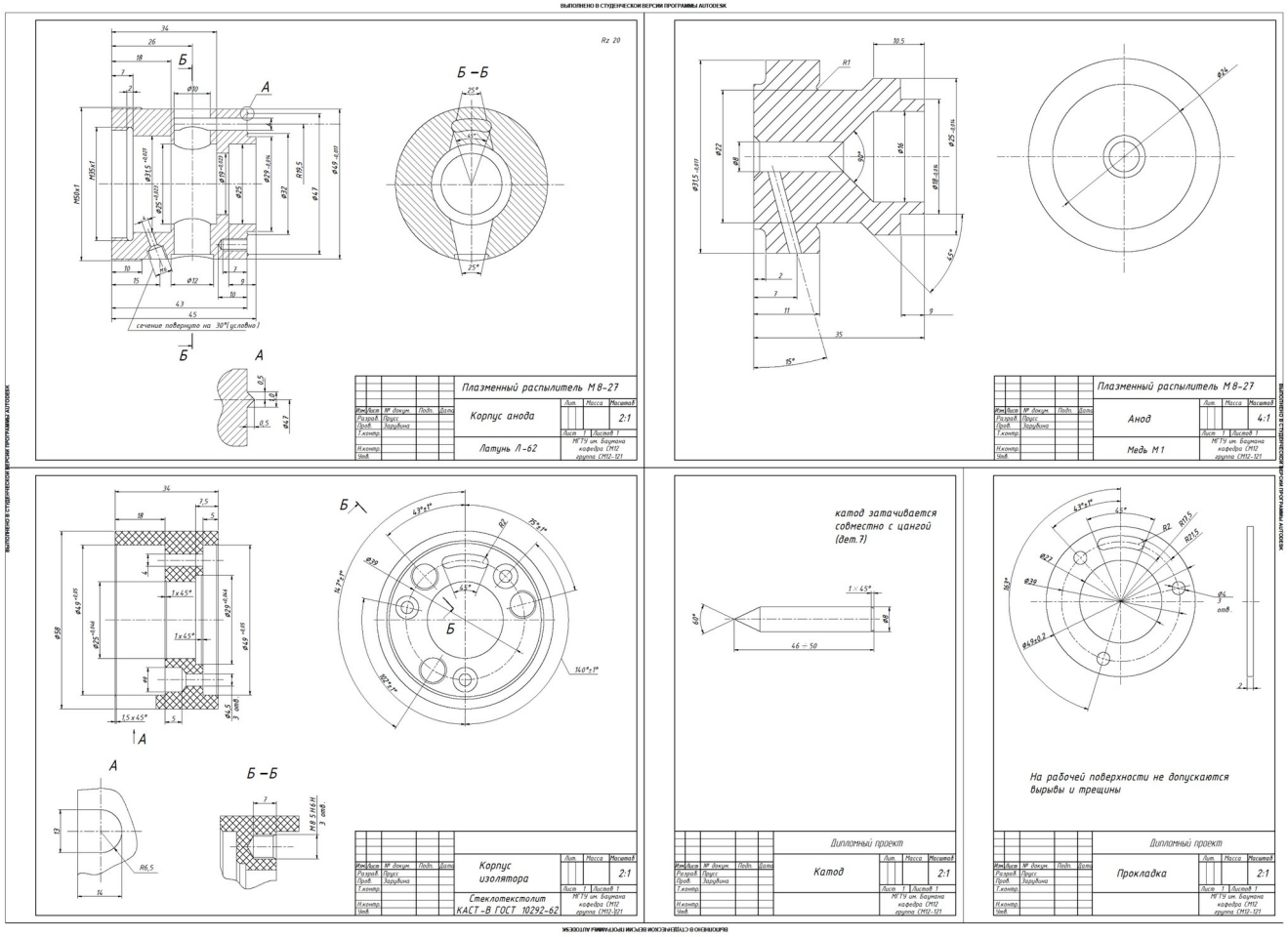


Рисунок А.4 – Оснастка для нанесения покрытия

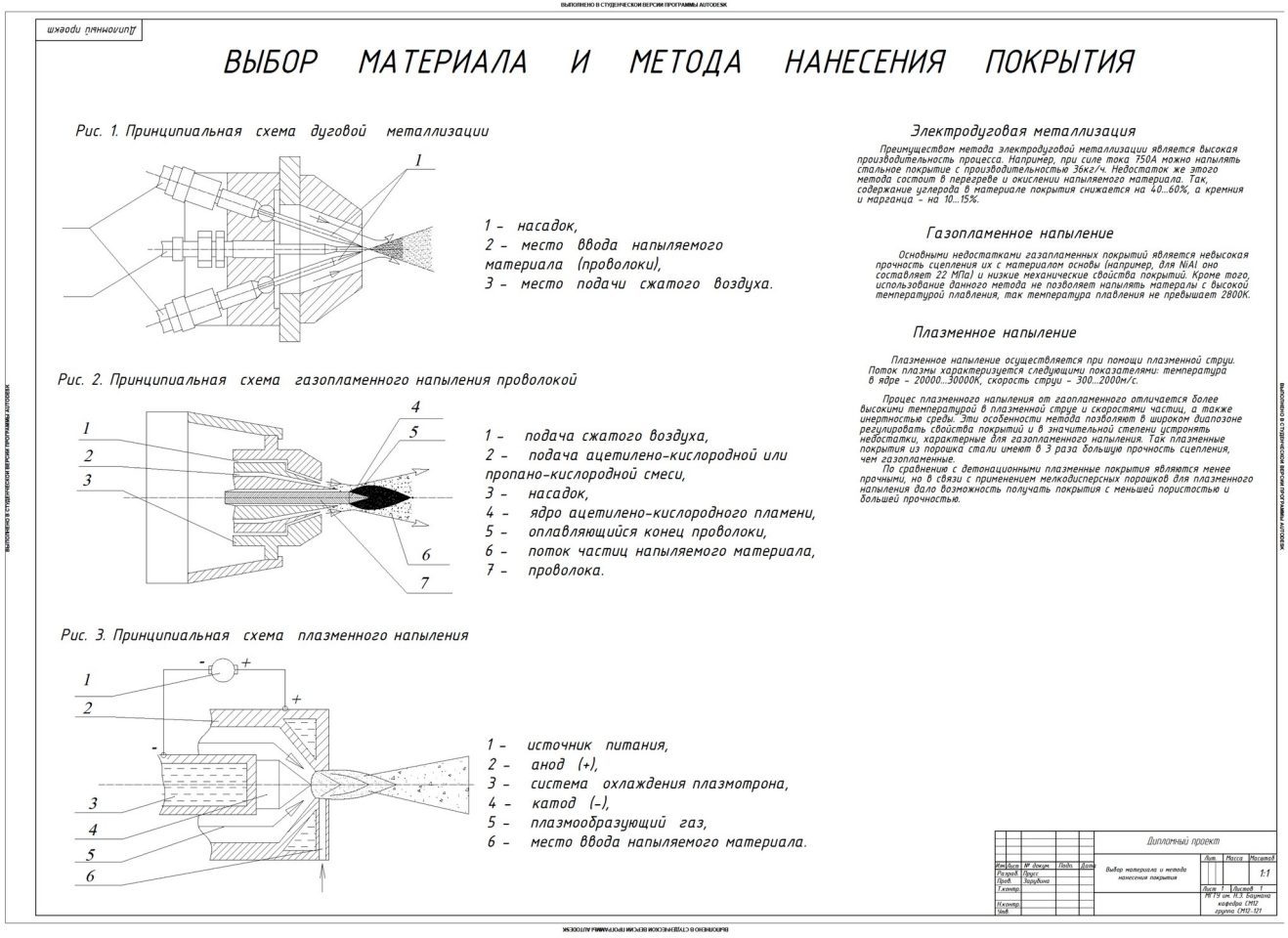


Рисунок А.5 – Выбор материала и метода нанесения покрытий

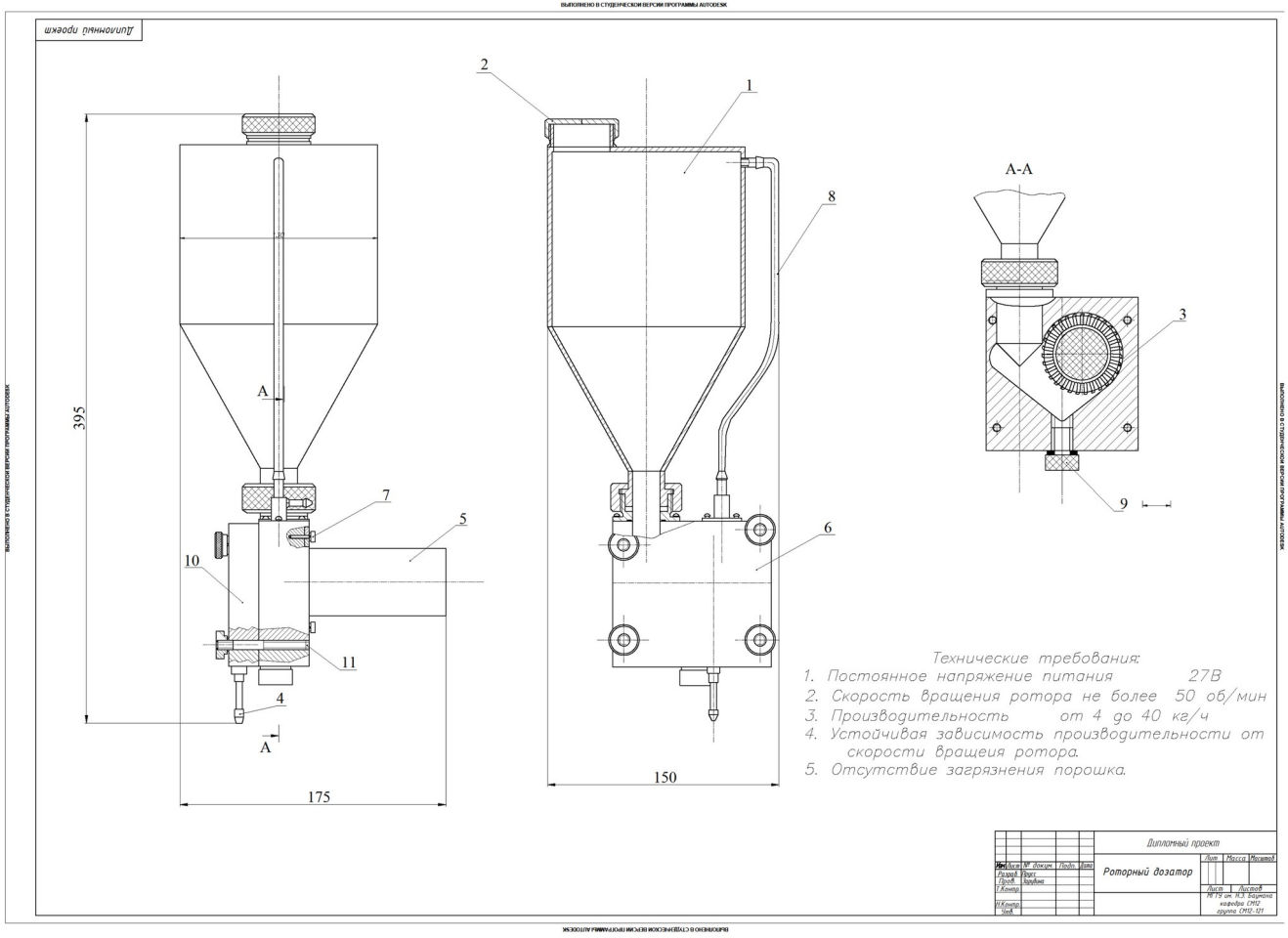


Рисунок А.6 – Роторный дозатор

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

Дипломный проект

ВЫБОР РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

Удельная энтальпия плазмообразующего газа (воздуха)

$$H_{уд.о} = \frac{UI - Q}{G}\left[{}^{кДж}/_{г}\right]$$

Скорость на срезе сопла плазмотрона:

$$v_0 = \frac{4GR_0T_0}{P\pi d_c^2}\ [м/с]$$

Среднемассовая температура на срезе сопла плазмотрона
Расчитывается по программе “Астра”:

$$T_0 = f\left(H_{уд.о}\right)$$
$$U = \left(al^2 + bl + c\right)G^n$$
$$Q = d + k\left(l - 200\right)$$

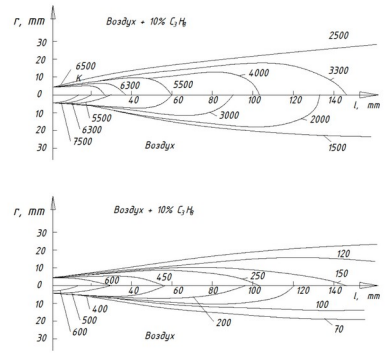
Длина начального участка плазменной струи:

$$X_н = R_c\left(7.61/Q_0^{0.142}\left(8.22/Q_0^{0.194} - 7.61/Q_0^{0.142}\right)\right)C/0.3$$

Температура и скорость основного участка плазменной струи:

$$T_{д(x)} = \frac{0.745T_0}{\left[\frac{\left(0.55C_0\left(x - 1.5x_н\right)\right)T_0}{R_cT^{\infty}} + 1\right]^{2/3}}$$

$$v_{д(x)} = \frac{v}{\left[\frac{\left(0.55C_0\left(x - 1.5x_н\right)\right)T_0}{R_cT^{\infty}} + 1\right]^{2/3}}$$



Распределение температур (а) и скоростей (б) в плазменной струе плазмотрона П-1 и установки УВП-98.

Свойства газа.	Температура, Т,К									
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Удельная энтальпия, кДж/кг	773,15	2000	3316	2678,9	6569	11555	24823	40593	48031	52953
Плотность, кг/м.	0,33	0,165	0,11	0,0825	0,065	0,0492	0,0336	0,0225	0,0185	0,0162
Теплоемкость, кДж/кгК	1163,4	1285	1328	1446	2724	8215	17610	11252	5149	5280
Число грамм-молей в 1кг газа	35,686	35,686	35,681	35,718	26,282	39,926	51,083	65,463	70,619	72,796
Вязкость, 10 Па С.	4,01	6,03	8	9,4	12,6	14,8	19	21	23,2	22,1
Теплопроводность, вт/м град	0,15	0,16	0,2	0,3	0,7	2,2	4,5	2,7	1,4	1,3

Дипломный проект

Выбор режимов нанесения покрытий (начало)

Лит. | Масса | Масштаб 1:1

Лист 1 | Листов 2

МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедра СМ12 группа СМ12-121

ВЫПОЛНЕНО В СТУДЕНЧЕСКОЙ ВЕРСИИ ПРОГРАММЫ AUTODESK

Рисунок А.7 – Выбор режимов нанесения покрытий

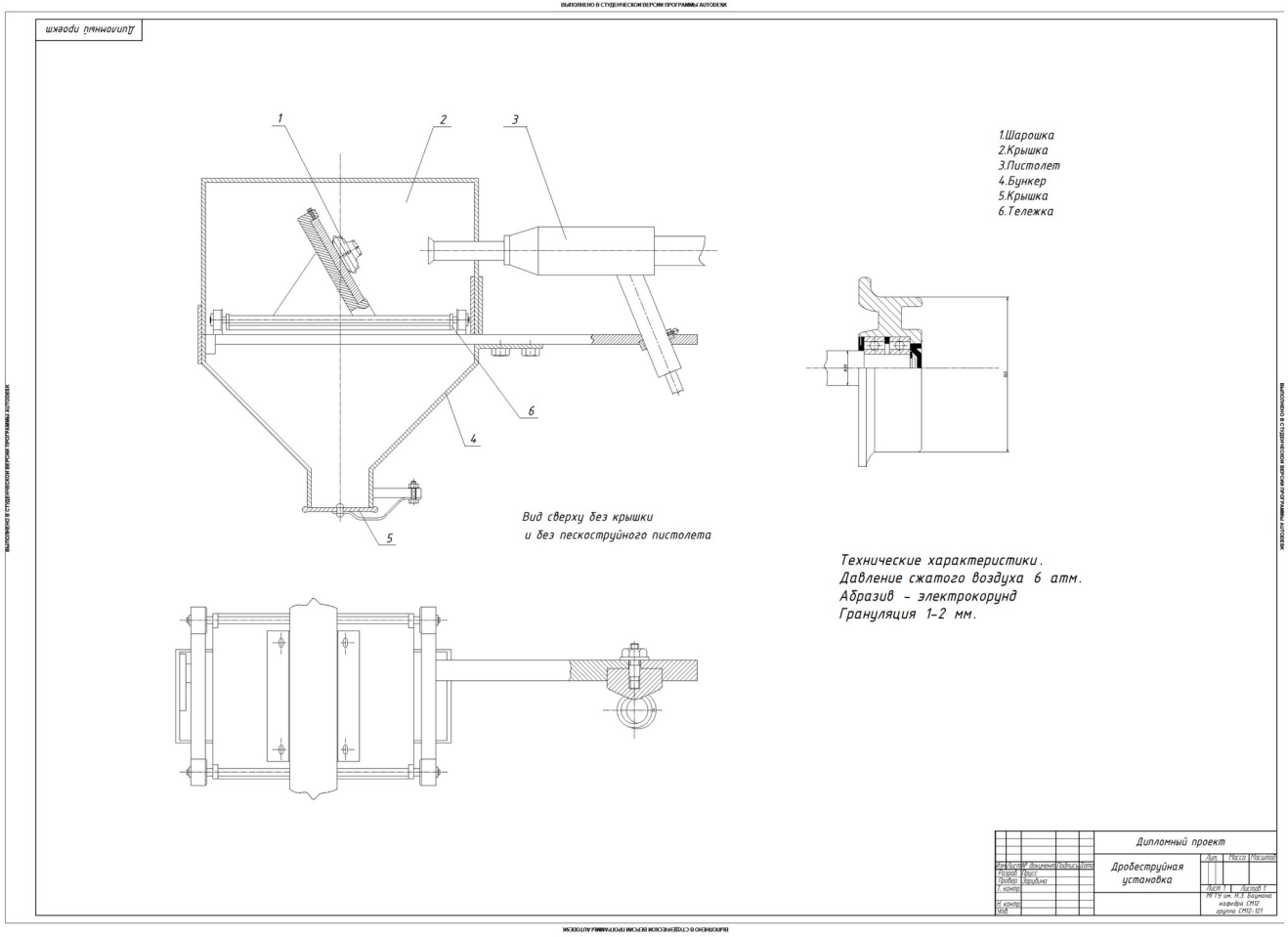


Рисунок А.8 – Дробеструйная установка

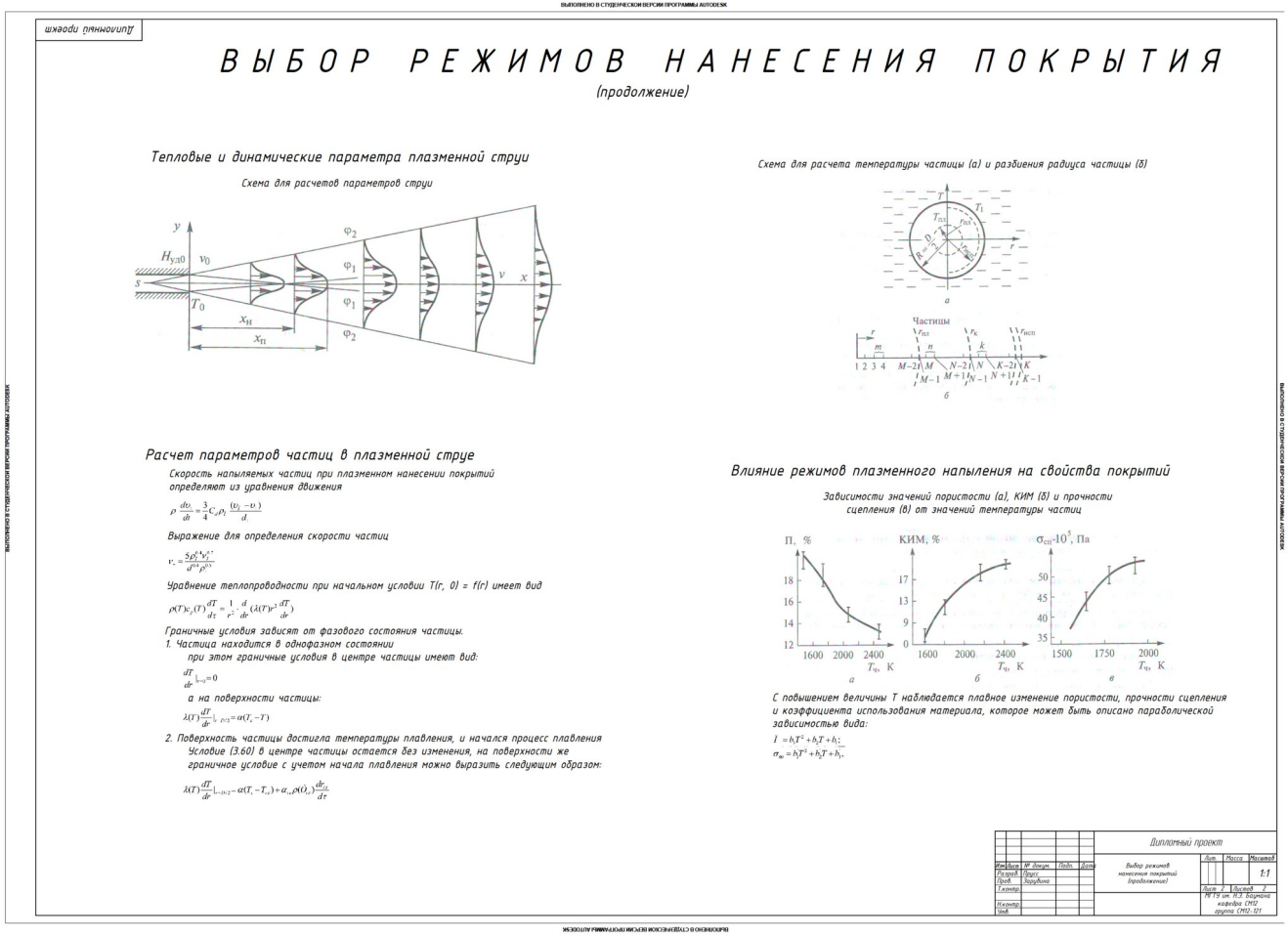


Рисунок А.9 – Выбор режимов нанесения покрытий

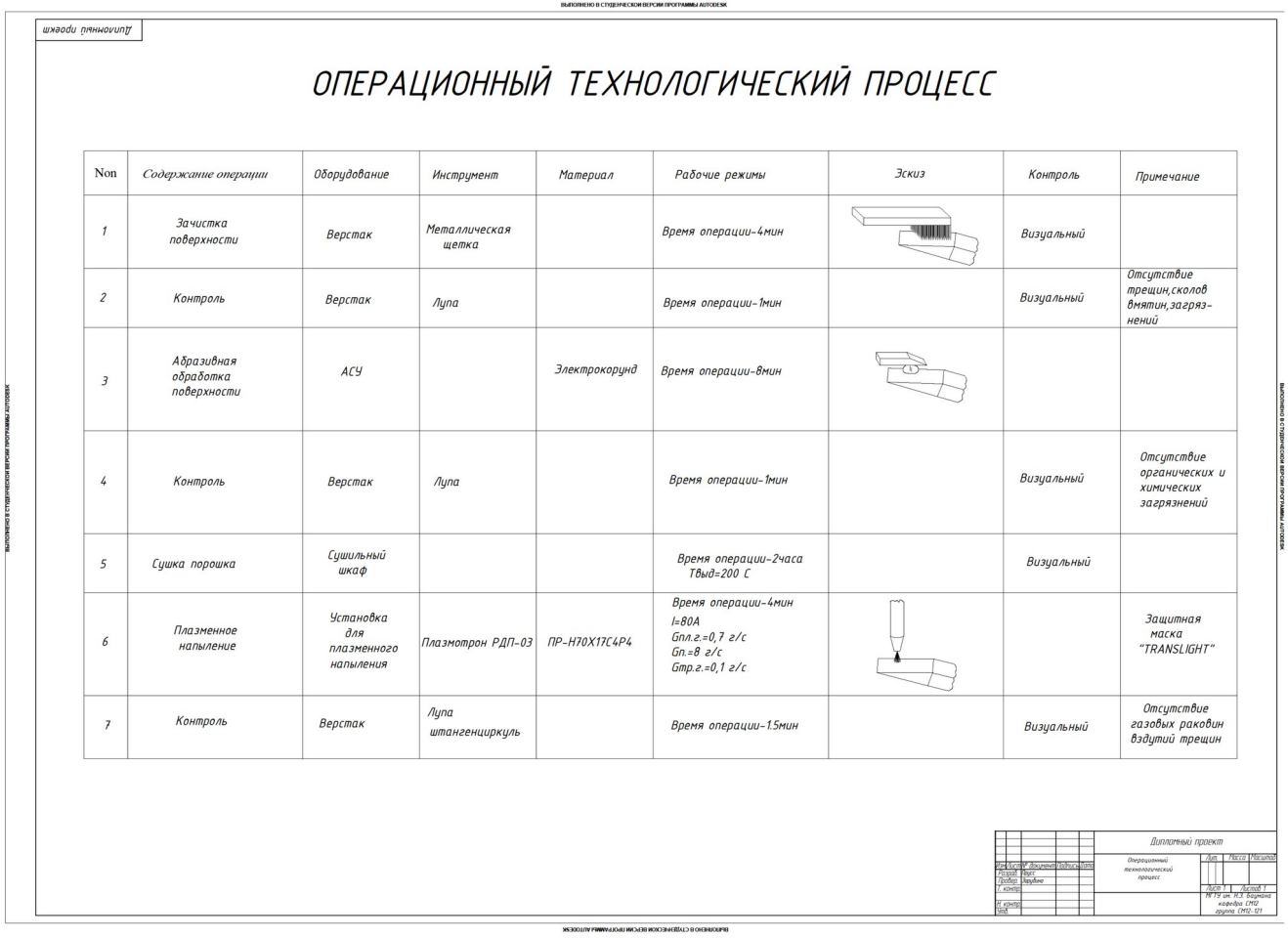


Рисунок А.10 – Операционный технологический процесс



Рисунок А.11 – Шарошки бурового инструмента