

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.01 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Совершенствование технологии полной коррозионной защиты
продукто-проводов ООО «Тольяттикаучук»

Студент

Д.А. Пец

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.С.Гончаров

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

И.Ю. Усатова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Аннотация

Тема выпускной квалификационной работы – «Совершенствование технологии полной коррозионной защиты продукто-проводов ООО«Тольяттикаучук»».

Целью выпускной квалификационной работы является совершенствование технологического процесса полной коррозионной защиты продукто-проводов.

Ключевые слова: трубопровод, защита, коррозия, антикоррозионное покрытие.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 66 страницах, включающей 8 рисунков, 14 таблиц, 30 списка из источников.

В ходе работы были проанализированы основные методы и технологии защиты внутренних и внешних поверхностей труб. Большое внимание уделяется проблеме коррозии и влиянию ее на трубопроводы, являющимися немаловажным звеном в технологических процессах. Широко применяемыми являются полиэтиленовое, полипропиленовое, эпоксидные покрытия. Изучены достоинства и недостатки каждого упоминаемого в работе покрытия. С помощью патентного поиска были проанализированы варианты нанесения антикоррозионных покрытий.

В технологической части описаны способ решения проблемы коррозии металла применением антикоррозионного покрытия с помощью газопламенного напыления, а также приведен экономический расчет.

Графическая часть работы выполнена на 23 листах (8 рисунков и 14 таблиц) и включает в себя технологическую схему газопламенной установки.

Abstract

The theme of the final qualification work is “Improving the technology of complete corrosion protection of product wires at Tolyattikauchuk LLC”. The aim of the final qualification work is to improve the process of complete corrosion protection of product wires.

Key words: pipeline, protection, corrosion, anticorrosion coating.

The final qualification work consists of an explanatory note on 66 pages, including 8 figures, 14 tables, 30 lists from sources.

During the work, the basic methods and technologies for protecting the internal and external surfaces of pipes were analyzed. Much attention is paid to the problem of corrosion and its effect on pipelines, which are an important link in technological processes. Widely used are polyethylene, polypropylene, epoxy coatings. The advantages and disadvantages of each coating mentioned in the work are studied. Using a patent search, the options for applying anti-corrosion coatings were analyzed.

In the technological part, a method for solving the problem of metal corrosion using an anti-corrosion coating using flame spraying is described, as well as an economic calculation.

The graphic part of the work was performed on 23 sheets (8 figures and 14 tables) and includes a technological scheme of a gas-flame installation.

Содержание

Введение.....	5
1 Литературный обзор.....	7
1.1 Общее понятие о коррозии.....	7
1.2 Классификация коррозии.....	8
1.3 Основные методы и технологии защиты внутренних и внешних поверхностей труб.....	11
1.4 Коррозия металлов в природных и технологических средах.....	33
1.5 Отчет о патентных исследованиях.....	39
2 Исследование технологии коррозионной защиты.....	44
2.1 Выбор методов нанесения защитных покрытий.....	44
2.2 Выбор материала покрытия.....	45
2.3 Свойства покрытий.....	47
2.4 Технологические параметры газопламенного напыления.....	48
2.5 Этапы нанесения покрытия.....	50
3 Экономическое обоснование предлагаемой технологии коррозионной защиты.....	52
3.1 Экономическая эффективность.....	52
Заключение.....	66
Список используемых источников.....	67

Введение

Коррозия металлических сооружений наносит большой материальный и экономический ущерб. Она приводит к преждевременному износу агрегатов, установок, линейной части трубопроводов, сокращает межремонтные сроки оборудования, вызывает дополнительные потери транспортируемого продукта.

На ООО «Тольяттикаучук» производятся синтетические каучуки, а также мономеры, фракции и высокооктановые добавки к бензину. Изопреновый каучук получают в результате полимеризации изопрена в среде инертного растворителя в присутствии комплексного катализатора.

Из-за коррозии трубопровода возможна утечка изопрена, он чрезвычайно огнеопасен и токсичен. Утечка может привести к большой аварии на производстве.

«Успешная защита трубопроводных систем от коррозии может быть осуществлена при своевременном обнаружении коррозионных разрушений, определении их величины и выборе защитных мероприятий. В начальный период эксплуатации состояние трубопровода определяется качеством проектирования и строительства» [1].

Влияние этих факторов уменьшается во времени и доминирующее значение приобретают условия работы трубопровода. Для нейтрализации воздействия окислителей и предупреждения коррозии используются различные методы, одним из наиболее эффективных является метод газопламенного напыления.

В выпускной квалификационной работе рассматриваются различные технологии полной коррозионной защиты продукто-проводов.

Целью бакалаврской работы является совершенствование технологии коррозионной защиты.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- выяснить возможность применения различных покрытий для предупреждения возникновения коррозии трубопровода с целью увеличения ресурса его службы;
- определить целесообразность и перспективность применения антикоррозионных покрытий;
- изучить существующий опыт в организации технологии полной коррозионной защиты;
- провести расчетное обоснование применения предлагаемого покрытия.

1 Литературный обзор

1.1 Общее понятие о коррозии

Существует несколько понятий о коррозии.

Многие исследователи считают, что термин «металлическая коррозия» охватывает все взаимодействия металла или сплава (твердого или жидкого) с окружающей средой, независимо от того, является ли это преднамеренным и выгодным или нежелательным. Таким образом, это определение коррозии, которое для удобства называют термином «трансформация», включает в себя, например, преднамеренное анодное растворение цинка в катодной защите и гальваническом покрытии, а также самопроизвольное постепенное растрачивание цинкового кровельного листа в результате воздействия атмосферы.

С другой стороны, коррозия определяется как «нежелательное ухудшение» металла или сплава, т.е. взаимодействие металла с окружающей средой, отрицательно влияющее на те свойства металла, которые должны быть сохранены.

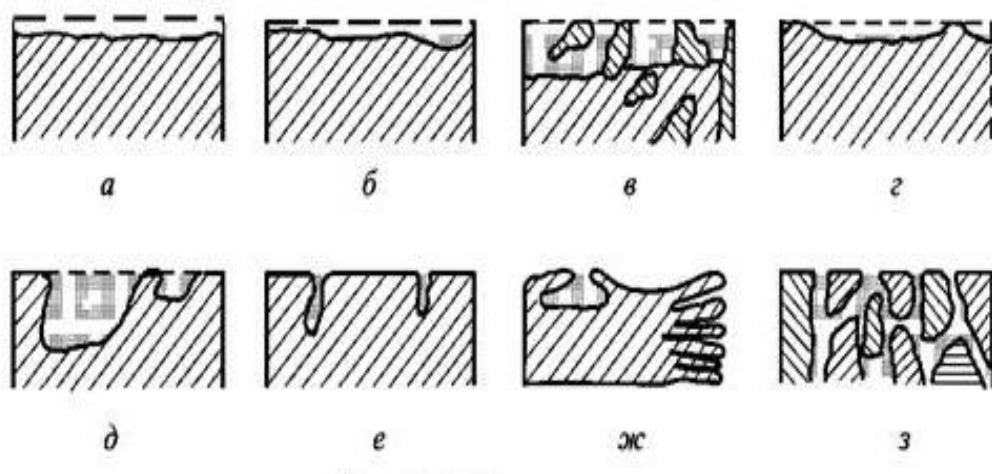
Металлические материалы в практическом использовании, как правило, подвержены коррозии в атмосферных и водных условиях.

«Современная наука о коррозии зародилась в начале XX века с моделирования локальной ячейки, предложенной Эвансом, и моделью коррозионного потенциала, доказанной Вагнером и Траудом. Эти две модели объединились в современную электрохимическую теорию коррозии, которая описывает коррозию металлов как комбинированную электрохимическую реакцию, состоящую из анодного окисления металла и катодного восстановления окислителя. Электрохимическая теория применима не только к влажной коррозии металлов при нормальной температуре, но и к сухому окислению металлов при высокой температуре» [1].

1.2 Классификация коррозии

«Существует две общие классификации коррозии, которые охватывают большинство специфических форм: прямое химическое воздействие и электрохимическое воздействие. В обоих типах коррозии металл преобразуется в металлическое соединение, такое как оксид, гидроксид или сульфат. Процесс коррозии всегда включает в себя два одновременных изменения: Металл, подвергшийся нападению или окислению, страдает от того, что можно назвать анодным изменением, а коррозионный агент восстанавливается и может рассматриваться как претерпевающий катодные изменения» [1].

Коррозия проявляется во многих формах (рисунок 1), и может находиться на поверхности, а также проникать внутрь материала; таким образом, удаление поверхностных продуктов коррозии с последующей повторной защитой не всегда может быть эффективно.



а – равномерное; б – неравномерное; в – избирательное; г – пятна;
д – язвы; е – точками (питтингами); ж – подповерхностное; з – межкристаллическое.

Рисунок 1 — Виды коррозионных разрушений

Незначительная коррозия поверхности может скрывать более значительную коррозию внутри структуры материала, такую как

внутреннюю межкристаллитную коррозию, точечную коррозию, а также коррозионное растрескивание под напряжением.

Описание основных видов коррозии представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Описание видов коррозионных разрушений

Вид коррозии	Описание
Равномерная	Эта коррозия возникает в результате постоянного смещения анодной и катодной областей поверхности металла, контактирующего с электролитом, и приводит к почти равномерному коррозионному воздействию на всю поверхность. Примером такой коррозии является ржавчина стального листа в морской воде.
Неравномерная	Некоторые участки металлической поверхности корродируют с большей скоростью, чем другие, из-за "гетерогенности" металла, окружающей среды или геометрии структуры в целом. Атака может варьироваться от слегка локализованной до точечной коррозии
Избирательная	Один компонент сплава (обычно наиболее активный) избирательно удаляется из сплава
Гальваническая	Когда два разных металла подвергаются воздействию агрессивной среды, возникает электрическая разность потенциалов. Если два металла будут электрически связаны, то более активный металл станет анодом в полученном гальваническом элементе и его коррозия увеличится
Щелевая	Щелевая коррозия - это локализованная атака, которая происходит, когда щели, образованные притертыми стыками, или участки частичного экранирования подвергаются воздействию агрессивной среды
Точечная	Питтинговая коррозия - это локализованное явление, ограниченное небольшими площадями. Это одна из самых разрушительных и коварных форм коррозии. В основном, сплавы, подверженные точечной коррозии, - это сплавы, для защиты которых используется оксидная пленка, например, нержавеющая сталь
Подповерхностная	Подповерхностная коррозия появляется с поверхности, и в основном происходит непосредственно под поверхностью металла, тем самым вызывая его вспучивание и вследствие расслоение
Межкристаллическая	Межкристаллическая коррозия наносит сосредоточенный удар по границам зерен металла или же сплава. Этот образ коррозии опасен тем, собственно что случается утрата прочности и пластичности металла

Металлоконструкции в некоторых условиях могут подвергаться локализованному нападению или перелому в результате синергетического действия механического фактора и коррозии.

Помимо точечной и щелевой коррозии, локализованной коррозией являются также следующие:

- 1) Коррозия припарки - атака, которая происходит на краю влажной поверхности материала.
- 2) Осадочная коррозия - процесс коррозии, при котором более благородный металл осаждается на менее благородный металл и вызывает атаку из-за биметаллической ячейки. Это распространено в медно-алюминиевых системах.
- 3) Нитевидная коррозия - локализованное разрушение металлической поверхности под покрытием за счет наличия ячеек с повышенной концентрацией кислорода.

«Эрозия-коррозия возникает в результате высокоскоростного потока электролита, абразивное действие которого ускоряет коррозию. Эта коррозия особенно сильна, когда электролит содержит твердые частицы во взвешенном состоянии. Эффект заключается в удалении защитного оксида с поверхности пленки, в результате чего свежий сплав подвергается коррозии. Эрозионную коррозию можно считать точечной коррозией в гораздо большем масштабе. Существует, по сути, предел того, какие скорости электролита могут быть допустимы для конкретных металлов» [2].

Помимо эрозии, существуют и другие формы атаки, связанные с эффектами скорости:

- Кавитация – разрушение поверхности, вызванное внезапным образованием и обрушением пузырьков и пустот из-за турбулентности в жидкости. Обычно она характеризуется ямочкой или шероховатой металлической поверхностью.
- Ударная коррозия – локализованная коррозия, вызванная турбулентностью или ударным потоком. Как правило, существует

критическая скорость, ниже которой не происходит столкновения и выше которой атака быстро увеличивается.

Коррозионное растрескивание под действием напряжения возникает у специфических сплавов при следующих пороговых условиях:

- специфический состав раствора коррозионной среды;
- минимальные уровни растягивающих напряжений;
- температура;
- состав металла;
- структура металла.

На микроскопическом уровне металлы и их сплавы имеют небольшие, различимые участки, называемые зёрнами. Внутри индивидуального зерна ориентация атомного расположения (называемого решеткой) одинакова. Отдельные зёрна имеют различную ориентацию, а граница между ними называется границей зерна. Обычно границы зерен не такие реактивные при коррозии, чем само зерно. Однако при определенных условиях границы зерен изменяются примесями и/или обогащением (или истощением) одного из легирующих элементов. «Термическая обработка и сварка могут привести к изменению состава металла, что может спровоцировать межкристаллитную коррозию. В тяжелых случаях межкристаллитная коррозия может привести к заметному снижению механических свойств и в экстремальных случаях может превратить металл в кучу отдельных зерен» [3].

1.3 Основные методы и технологии защиты внутренних и внешних поверхностей труб

В современном мире трубопроводы используются как средство транспортировки углеводородов из устья скважин в производственные объекты, резервуары-хранилища и распределения нефтепродуктов по городам. Стальной трубопровод широко используется, так как является наиболее экономически эффективным и безопасным средством

транспортировки углеводородов и других производных. Однако одной из проблем, с которой сталкивается нефтегазовая промышленность, является коррозионная атака на технологические объекты. Количество отказов трубопроводов, вызванных внешней коррозией, увеличивается в связи с воздействием коррозионной среды после отказа покрытия. «Негативными последствиями аварий трубопроводов, вызванных коррозией, являются высокие затраты на обслуживание системы катодной защиты, остановки заводов, загрязнение окружающей среды, производственные потери, гибель людей и травмы в тех случаях, когда непреднамеренный выброс углеводородов находит источник воспламенения» [4].

1.3.1 Изоляционные покрытия технологических трубопроводов

В современном мире для защиты технологических трубопроводов больше всего применяются следующие виды заводских защитных покрытий:

- а) покрытие эпоксидное заводское;
- б) покрытие полиэтиленовое заводское;
- в) покрытие полипропиленовое заводское;
- г) покрытие комбинированное ленточно-полиэтиленовое заводское.

Все эти виды перечисленных выше покрытий отвечают актуальным техническим требованиям и могут обеспечивать в течение длительного времени действенную и эффективную защиту трубопроводов от различного вида коррозии.

1.3.1.1 Покрытие полиэтиленовое

«Полиэтилен обычно используется в качестве верхнего слоя в двух- или трехслойных системах. Он обладает превосходными антикоррозионными свойствами и относительно низкой прочностью на сдвиг в клеевом слое, особенно при высоких температурах. В трехслойной системе используется сополимерный клей, обеспечивающий отличные сдвиговые свойства, и эпоксидный слой, обеспечивающий коррозионную стойкость. Оба являются отличными покрытиями при использовании в соответствующей среде.

Основные различия между двумя системами заключаются в механических свойствах при более высоких температурах и стоимости» [5]- [6].

Двухслойное экструдированное полиэтиленовое покрытие (2LPE) означает защиту трубопровода, состоящую из двух слоев. В двухслойной структуре используются клеи на основе мастик и полиэтиленовые сополимеры. Это обеспечивает первоклассную защиту от коррозии, особенно при повышенных температурах.

Трёхслойный полиэтилен (3LPE) и двухслойный полиэтилен (2LPE) применимы для защиты стали от коррозионного воздействия. Основная разница между ними заключается в том, что первый имеет три слоя, а второй - два.

Покрытие 3LPE и покрытие 2LPE имеют общие характеристики. Они подходят для тех же самых труб, диаметр которых обычно находится между 60 и 1420 мм, и оба они могут быть применены в нефтяной промышленности и газовой промышленности.

Структура покрытия 3LPE для трубопровода приведена ниже.

Первый слой, эпоксидная смола с термопластичным соединением, толщиной более 100 мкм. Второй слой - адгезив толщиной от 170 до 250 мкм. Третий слой – полиэтилен толщиной между 2,5 и 3,7 мм.

Эти три вида материалов интегрируются в единое целое, прочно сочетаясь со стальной трубой, образуя превосходное покрытие. Труба с покрытием 3LPE обладает характеристиками высокой механической прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к воздействию тепла и холода. Он может использоваться для сред с температурой 150 °C, а также в условиях низких температур. Поэтому покрытие 3LPE является идеальным внешним защитным слоем для заглубленных труб. По данным авторитетного тестирования, срок службы заглубленных труб с антикоррозийным покрытием 3LPE может составлять до 50 лет.

Структура покрытия 2LPE для трубопровода: первый слой - адгезив (AD); второй слой - полиэтилен (PE). Оба материала смешиваются друг с другом, и толщина каждого слоя совпадает с толщиной покрытия 3LPE.

Из того, о чем говорилось выше, мы легко можем сделать вывод, что покрытие 3LPE имеет эпоксидную смолу, а покрытие 2LPE - нет. Эпоксидная смола с термопластичным покрытием обладает преимуществами хорошей коррозионной стойкости и отличными механическими свойствами. «Несмотря на то, что эпоксидная смола с термопластичным соединением) имеет строгие требования к обработке поверхности покрытия, плохую устойчивость к изменению климата и высокую скорость водопоглощения, она делает покрытие 3LPE применимым к морским и заглубленным трубам, а толщина покрытия 3LPE обычно составляет от 0,3 мм до 0,5 мм» [7].

1.3.1.2 Покрытие полипропиленовое

С восьмидесятых годов прошлого века полипропиленовые покрытия применяются для защиты наружной поверхности наземных и морских трубопроводов. Полипропилен является одним из наиболее подходящих покрытий, когда требуются высокие механические свойства (ударопрочность, сопротивление проникновению и т.д.) и/или термическая стойкость. Полипропилен также используется в обычных трубопроводах, что дает преимущества по сравнению со стандартными покрытиями

3-слойный полипропилен (3LPP) представляет собой многослойное покрытие, состоящее из трех функциональных компонентов; высокоэффективной эпоксидной смолы с термопластичной связью, за которой следует сополимерный клей, и внешнего слоя полипропилена, который обеспечивает одно из самых жестких и долговечных решений для покрытия труб.

Системы 3LPP обеспечивают превосходную защиту трубопроводов малого и большого диаметра при высоких рабочих температурах.

Это антикоррозионное покрытие состоит из следующих слоев:

– слой эпоксиды минимальной толщины 60 мкм,

- слой полипропилена минимальной толщины 140 мкм,
- полипропиленовый слой минимальной толщины от 1,8 до 2,5 мм.

«Компонент высокоэффективной эпоксидной смолы системы 3LPP обеспечивает отличную адгезию к стали, обеспечивая превосходную долгосрочную коррозионную стойкость и защиту трубопроводов, работающих при высоких температурах» [8]- [9].

Превосходные адгезионные свойства также приводят к отличной устойчивости к катодному дисбалансу, снижая общие затраты на катодную защиту в течение срока службы трубопровода.

3LPP может применяться в широком диапазоне толщин для экономически эффективного соответствия уникальным проектным спецификациям и эксплуатационным требованиям.

«Прочный наружный слой полипропилена защищает трубопроводы при транспортировке и монтаже, тем самым снижая затраты на ремонт и обеспечивая дополнительную наземную защиту от поперечных сил, химикатов и абразивных почв» [10].

Увеличивая толщину наружного слоя полипропилена, 3LPP может обеспечить наивысший уровень механической защиты во многих разнообразных средах, не требуя использования дорогостоящей выборочной засыпки.

Преимущества покрытия:

- высокая устойчивость к механическим повреждениям;
- устойчивость к химическим веществам, влажности, пробоям, высокой температуре и УФ-излучению;
- хорошая адгезия покрытия к поверхности стальной трубы;
- антикоррозионная защита подземных трубопроводов в течение примерно 50 лет;
- полная защита сварных швов стальных труб;
- покрытие нейтрально к природной среде.

1.3.1.3 Покрывтия эпоксидные

Покрывтие из эпоксидной смолы с термопластичной связью (FBE) защищает поверхности труб от коррозии. Двойной или тройной слой FBE может даже повысить устойчивость к трению и истиранию. Покрывтие FBE также используется в качестве грунтовочного слоя в 3-слойных системах покрывтия PE/PP.

«Электростатический эпоксидный порошок распыляется на трубу при температуре, как правило, около 220 - 235 °С. Достигнув поверхности горячей трубы, эпоксидный порошок расплавляется и образует на ней равномерный слой эпоксидного покрывтия» [11].

«Эпоксидная футеровка труб часто рассматривается как альтернатива замене старого трубопровода на совершенно новую систему. Теоретически, процесс футеровки включает в себя покрывтие внутренней поверхности труб эпоксидной смолой для герметизации отверстий и коррозии, создавая долгосрочное решение для решения проблем с трубами. Такова теория. На практике проблемы с эпоксидной смолой многочисленны:

Например, невозможно узнать, насколько хорошо эпоксидная смола прилипла к внутренней стороне трубы, и если было достигнуто ровное покрывтие, то без разрезания в трубе» [12].

Во-вторых, если утечка произойдет в будущем, ремонт эпоксидной оболочки трубы будет очень сложным. Смола не может нагреваться, а применение горелки для пайки в новой трубе или фитинге разрушает целостность футеровки в этом месте.

Сам процесс эпоксидной футеровки создает определенное давление на стенки трубы и может выдуться в слабых местах или местах с резьбой.

И, наконец, критические элементы трубопроводной системы часто исключаются при выполнении работ по эпоксидной футеровке.

1.3.2 Электрохимическая защита трубопроводов

В случае электрохимической защиты от коррозии материал может быть защищен при помощи контрэлектрода, так называемого жертвенного

электрода. Жертвенный электрод для защищаемого металла состоит из менее благородного металла, который предпочтительно атакуется вместо более благородного металла. Одним из возможных изменений является электрохимическая защита от коррозии путем подачи постоянного тока.

1.3.2.1 Катодная защита трубопроводов

«Катодная защита – это электрический метод контроля или предотвращения внешней коррозии трубопроводных сталей и других металлических конструкций, погребенных в почве или погруженных в воду. . Этот метод обычно требует наличия связанного покрытия на трубе. Требуется также система соединения для обеспечения электрической непрерывности и некоторые средства подачи электрического тока к трубопроводу, чтобы он играл роль катода. Ток подается одним из двух способов: под действием тока от внешнего источника питания или с помощью заглубленных анодов» [13]- [14].

Стоимость установки системы катодной защиты, хотя и значительная сама по себе, но не является единственным фактором стоимости, который следует учитывать. Сама система активна, что означает, что она должна регулярно проверяться и обслуживаться. Эти затраты после установки могут стать значительно больше, чем первоначальные затраты на установку.

Промышленность труб из ковкого чугуна признает, что правильно спроектированная, установленная и обслуживаемая система катодной защиты может быть эффективным средством уменьшения коррозии. Однако метод, наиболее часто рекомендуемый этой отраслью, когда указывается необходимость антикоррозионной защиты, представляет собой полиэтиленовую оболочку со свободной пленкой, изготовленную и установленную в соответствии со стандартом ANSI / AWWA, указанным выше. Это единственный метод защиты труб из ковкого чугуна в коррозионных почвах, который получил одобрение стандарта AWWA.

«Материал оболочки доступен либо из перекрестно ламинированного полиэтилена высокой плотности толщиной 4 мил, либо из полиэтилена

низкой плотности толщиной 8 мил. Это обычно поставляется в трубчатой форме в рулонах. Эта труба разрезается по длине, надевается на каждую секцию трубы во время установки и закрепляется на месте с помощью пластиковой клейкой ленты или пластиковой ленты. Это пассивная система, которая проста в установке и, как было показано, защищает трубу без дорогостоящего обслуживания» [16]-[17].

Сто лет, как правило, считается полезным сроком службы для изделий, предлагаемых трубной промышленностью из ковкого чугуна. Для достижения этой долговечности в коррозионной среде, какой бы метод контроля коррозии не был указан во время установки, он должен оставаться эффективным в течение всего этого периода.

Принцип катодной защиты заключается в подключении внешнего анода к защищаемому металлу и прохождении электрического постоянного тока таким образом, чтобы все участки металлической поверхности стали катодными и поэтому не подвергались коррозии.

Внешний анод может быть гальваническим анодом, где ток является результатом разницы потенциалов между двумя металлами, или это может быть работающий от внешнего источника постоянного тока анод, где ток от внешнего источника постоянного тока [18].

В электрохимическом отношении электрический потенциал между металлом и раствором электролита, с которым он соприкасается, становится более отрицательным, за счет подачи отрицательно заряженных электронов, до величины, при которой происходит подавление коррозионных (анодных) реакций и могут происходить только катодные реакции.

1.3.2.2 Анодная защита трубопровода от коррозии

«В отличие от катодной защиты, анодная защита является относительно новой. Впервые компания Edeleanu продемонстрировала возможность анодной защиты в 1954 году и испытала ее на небольших котлах из нержавеющей стали, используемых для производства растворов

серной кислоты. Вероятно, это было первое промышленное применение, хотя другие экспериментальные работы проводились в других местах» [19]- [20].

Анодная защита обладает уникальными преимуществами. Например, подаваемый ток обычно равен скорости коррозии системы защиты. Таким образом, анодная защита не только защищает, но и является прямым средством контроля скорости коррозии системы.

«Анодная защита может значительно снизить скорость коррозии. Основными преимуществами анодной защиты являются ее применимость в экстремально агрессивной среде и низкая потребность в токе» [21]. Анодная защита наиболее широко применяется для защиты оборудования, используемого для хранения и обработки серной кислоты. «Теплообменники с анодной защитой, используемые для охлаждения заводов по производству серной кислоты, представляют собой одно из наиболее успешных предприятий для этой технологии. Эти теплообменники продаются в комплекте с установленными системами анодной защиты и имеют коммерческую выгоду в том, что могут использоваться менее дорогостоящие материалы» [22]-[24].

Это в основном связано с ограничениями на металлохимические системы, для которых анодная защита уменьшит коррозию. Кроме того, можно ускорить процесс коррозии оборудования, если не внедрить соответствующие средства управления. Тем не менее, анодная защита имеет свое место в области контроля коррозии, при условии, что некоторые важные основы удовлетворены.

Анодная защита (АЗ) – это метод контроля коррозии металлической поверхности путем превращения ее в анод электрохимической ячейки и управления потенциалом электрода в зоне, где металл является пассивным.

Анодная защита используется для защиты металлов, проявляющих пассивацию в средах, в которых плотность тока в свободно корродирующем состоянии значительно выше, чем плотность тока в пассивном состоянии в широком диапазоне потенциалов.

«Анодная защита используется для резервуаров из углеродистой стали, содержащих экстремальные условия pH, включая концентрированную серную кислоту и 50-процентную каустическую соду, где катодная защита не подходит из-за очень высоких текущих требований» [24].

Система анодной защиты включает в себя внешний источник питания, подключенный к вспомогательным катодам и управляемый сигналом обратной связи от одного или нескольких эталонных электродов [25]. При использовании анодной защиты по нескольким причинам, включая избыточный ток при потере или нестабильности пассивации, что приводит к возможной ускоренной коррозии, требуется тщательное проектирование и управление.

1.3.2.3 Протекторная защита трубопроводов

Защита от коррозии подземных трубопроводов, патронов на переходах трубопроводов через железные и шоссейные дороги, подземных металлических емкостей, кабелей протекторными установками заключается в том, что токи коррозионных элементов подавляются токами гальванических элементов, образованных металлом сооружения и электрохимически более активным электродом, находящимся в том же почвенном электролите. «При протекторной защите компенсационные токи создаются за счет более активного электрохимического растворения протектора по сравнению со скоростью растворения металла защищаемого сооружения» [26].

1.3.3 Гальванический метод

Гальванические покрытия богаты содержанием цинка, что обеспечивает жертвенное покрытие и катодную защиту черных металлов. Это грунтовочное покрытие, которое должно быть нанесено непосредственно на подложку.

Это покрытие используется для предотвращения разрушительного воздействия коррозии. Для изделий из железа и стали гальванические покрытия обычно выбираются за их низкую стоимость, низкие

эксплуатационные расходы, длительный срок службы, экологичность и эстетичность.

Цинк и цинковые сплавы используются в качестве металлического покрытия, защищающего основной материал - сталь - от коррозии. Цинк, контактируя с подложкой, действует как анод - он полностью растворяется и покрывается слоем оксидов, что ингибирует дальнейшую коррозию.

«Гальваническое покрытие представляет собой металлические частицы, которые не являются подвижными относительно металлической подложки. При воздействии эти частицы (цинковая пыль на стали) корродируют преимущественно, в то время как на исходной металлической поверхности происходит только катодная реакция» [27].

«Например, цинковые покрытия предотвращают коррозию защищаемого металла, создавая физический барьер и действуя в качестве жертвенного анода даже при повреждении этого барьера. При воздействии кислорода цинк вступает в реакцию с образованием окиси цинка, которая в дальнейшем вступает в реакцию с молекулами воды на воздухе с образованием гидроксида цинка» [28]. В свою очередь, гидроксид цинка реагирует с углекислым газом в атмосфере, образуя тонкий, непроницаемый, долговечный и нерастворимый тусклый серый слой карбоната цинка, который очень сильно прилипает к подстилающему цинку, защищая его от дальнейшей коррозии.

Гальванические покрытия могут наноситься:

- Горячим цинкованием - наносится толстый, прочный слой, который защищает металл подложки в таких областях применения, как автомобильные кузова.
- Термическим диффузионным цинкованием - предпочитаемый метод для нанесения покрытия на мелкие металлы сложной формы, а также для выравнивания шероховатых поверхностей на изделиях, сформированных порошковым металлом.

– Гальваническое оцинкование (Гальванизация) - подходит только для внутреннего применения, в противном случае может быстро истощиться.

Оцинкованная сталь может продержаться дольше при использовании других средств, таких как лакокрасочные покрытия и дополнительные жертвенные аноды.

На рисунке 2 приведена схема гальванического метода нанесения покрытий.

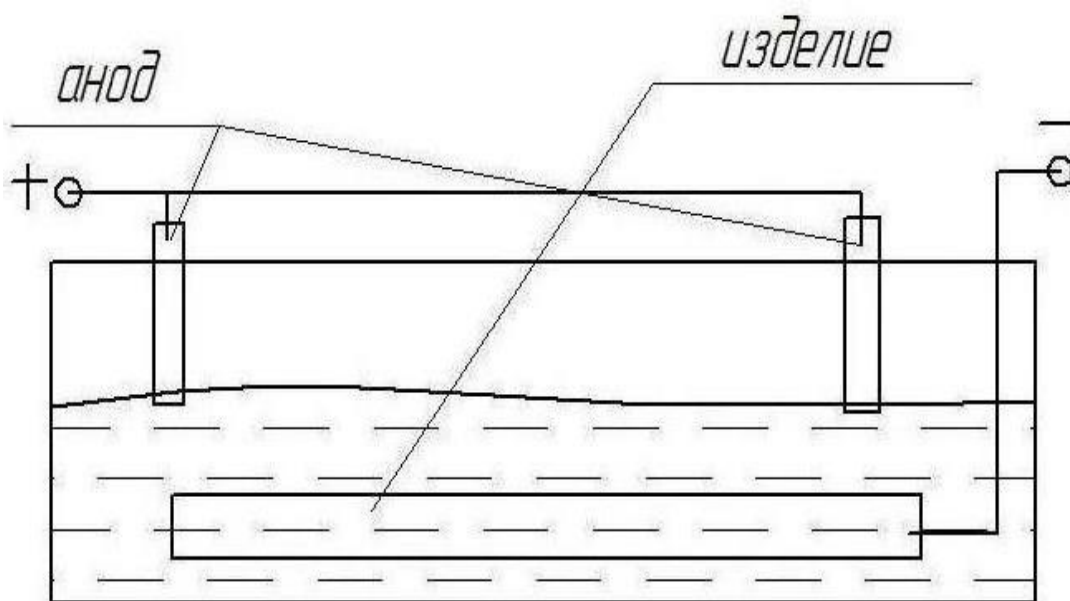


Рисунок 2 — Схема гальванического метода нанесения покрытий

1.3.4 Металлизационные методы

«Металлизация – это антикоррозийная обработка, которая заключается в распылении расплавленного металла, обычно на 99,9% чистого цинка, с высокой скоростью на защищаемую поверхность. Цинк мгновенно затвердевает при контакте с поверхностью и создает покрытие, защищающее сталь с помощью изоляции и жертвенного действия» [28]. В результате этого электрохимического процесса менее благородный металл, в данном случае цинк, будет корродировать вместо стали. Основные достоинства и недостатки металлизационных покрытий представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Достоинства и недостатки металлизационных покрытий

Показатель	Примечание
Достоинства	
Широкий ассортимент материалов для покрытий	Существует огромное количество различных материалов, которые могут быть превращены в высококачественные покрытия с помощью процесса термического напыления. Они могут включать в себя: металл, сплав, керамику, пластик и полимер, и могут быть в виде порошка, прутка или проволоки. Материал покрытия может быть специально подобран для каждой отдельной подложки
Продление срока службы материала	Сильное и эффективное напыление продлит срок службы субстрата, обеспечивая эффективную защиту от эрозии, разложения и других форм повреждения поверхности. Напыление позволяет наносить гораздо более Толстые покрытия (часто до 10 мм) с более высокой скоростью осаждения, чем другие методы нанесения покрытий, которые обеспечивают гораздо более эффективную защиту от износа.
Снижение стоимости	Во многих случаях ремонт объекта путем нанесения на него термического аэрозольного покрытия обходится гораздо дешевле, чем его полная замена. Кроме того, покрытия термическим напылением, как правило, гораздо более эффективны и тратят меньше материала покрытия, чем при использовании других методов, поэтому они являются гораздо более жизнеспособным вариантом, когда речь идет о более дорогих материалах покрытия.

Так же к многочисленным преимуществам процесса металлизации, включают:

Улучшенная защита от коррозии - ржавчина является распространенной проблемой при работе с большинством металлов, особенно со сталью. Металлизация может создать защитное покрытие, которое препятствует развитию красной и белой ржавчины, увеличивая срок службы продукта на целых 20 и более лет.

Повышенная долговечность - большинство металлизированных покрытий известны своей способностью прилипать к поверхности базовой заготовки или подложки. Они менее склонны к отслаиванию, образованию пузырей, растрескиванию или отслаиванию, чем другие виды отделки, что увеличивает долговечность основания.

Обеспечение электропроводности. Проблема при работе с пластиковыми материалами заключается в том, что они не проводят электричество. Металлизация пластиковой поверхности позволит передавать

электрический ток, что является жизненно важным производственным шагом в электронной промышленности.

Повышенная устойчивость к атмосферным воздействиям. Сталь на наружных конструкциях со временем подвержена воздействию снега, дождя, ветра и солнца. Металлизация обеспечивает защитное покрытие, которое создает барьер между базовой структурой и элементами, что может продлить срок службы конструкции и сохранить ее внешний вид.

«Снижение затрат на техническое обслуживание. Окрашенные поверхности необходимо периодически перекрашивать для сохранения отделки. Металлизированная поверхность не требует перекраски или ухода, что приводит к снижению затрат на техническое обслуживание. Как и краски, металлизированные покрытия доступны в широком ассортименте привлекательных цветов для удовлетворения эстетических требований» [28].

В общем, процесс металлизации влечет за собой подготовку поверхности с помощью абразивоструйной обработки для устранения дефектов и дефектов с последующим применением тепла для получения расплавленных частиц, которые распыляются на поверхность. Контакт с поверхностью вызывает выравнивание и замерзание частиц, что создает адгезию к поверхности и между отдельными частицами.

Вакуумная металлизация - эта форма металлизации включает кипение металла покрытия в специально сконструированной вакуумной камере и последующее образование конденсата с образованием осадка на поверхности подложки. Металл покрытия может быть испарен с помощью таких технологий, как плазменный или резистивный нагрев.

Горячее цинкование - погружение стальной подложки в ванну с расплавленным цинком. Цинк реагирует с железом в стали, образуя покрытие из сплава, что обеспечивает отличную защиту от коррозии. При удалении субстрата из цинковой ванны субстрат затем подвергается дренированию или вибрации для удаления избытка цинка. Гальванизация будет продолжаться после удаления подложки, пока она не остынет.

Распыление цинка - Цинк - это универсальный, экономичный материал, который действует как жертвенный барьер, который может предотвратить попадание коррозии на поверхность подложки. Цинковый спрей дает слегка пористое покрытие, которое менее плотное, чем горячее цинкование. Цинковый спрей можно наносить на любой тип стали, хотя он может не всегда достигать углубленных участков или щелей.

Термическое распыление - этот процесс включает распыление нагретых или расплавленных металлов на поверхность подложки. Металл подают в виде порошка или проволоки, нагревают до расплавленного или полурасплавленного состояния и распыляют в виде частиц микроразмера. Термическое напыление позволяет наносить толстые покрытия и высокую скорость осаждения металла.

Холодное распыление. Техника холодного распыления обычно используется в тех случаях, когда требуется длительная защита от коррозии. Процесс включает распыление композита, состоящего из металлического порошка, связующего на водной основе и отвердителя. Смесь распыляют на подложку при комнатной температуре. Заготовке дают возможность «отдохнуть» в течение примерно часа, а затем сушат при температуре от приблизительно 70 °C до 150 °C в течение 7-10 часов.

1.3.4.1 Электродуговая металлизация

Электрическое дуговое напыление является одним из старейших и наиболее эффективных процессов термического напыления. Разработанный в начале 20 века, электродуговой распылитель использует выпрямитель для дуговой дуги, которая производит тепло/энергию вместе с азотом в качестве топлива. Эта дуга приводит к экономически эффективному процессу распыления, при этом очень малое количество тепла передается на заготовку. Кроме того, электродуговое напыление проволоки производит распыление с более высокими показателями, чем другие термические процессы распыления, создавая одни из самых быстрых показателей любого метода покрытия.

На рисунке 3 приведена схема работы металлизатора.

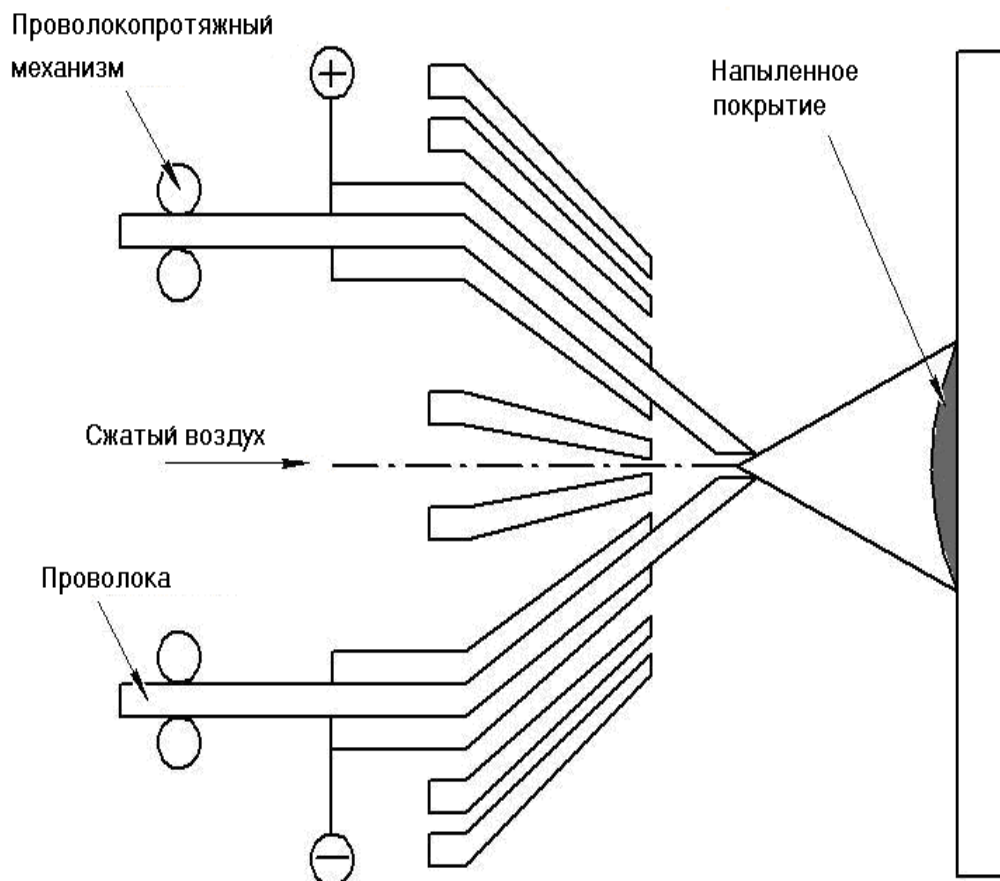


Рисунок 3 — Схема работы металлизатора

Процесс распыления электрической дуги протекает следующим образом: два расходных проводных электродов, подключенных к сильноточному источнику постоянного тока, подаются в пистолет, соединяются, устанавливая дугу между собой, которая плавит наконечники проводов. Затем расплавленный металл распыляется и струей воздуха на поверхность материала.

Скорость распыления обусловлена в первую очередь рабочим током и изменяется как функция от температуры плавления или от проводимости. Как правило, матовая поверхность, такая как сплавы на медной и железной основе, распыляется при 4,5кг/100А/ч. Цинковые спреи по 11кг/100А/ч. Температура поверхности может быть очень низкой, потому что ни одна

горячая струя газа не направлена за поверхность. Электрическое дуговое напыление может также осуществляться с использованием инертных газов или в камере с регулируемой атмосферой.

«Основные преимущества дугового напыления связаны с его простотой в использовании и высокой скоростью нанесения покрытия:

- Дуговое напыление имеет самую высокую скорость осаждения в процессах термического напыления, со скоростью 15 кг/час и выше.
- По сравнению с плазменным напылением этот процесс обеспечивает более низкую стоимость покрытий. Это связано с более низкими затратами на электроэнергию, высокими показателями осаждения и эффективностью, а также с более низкими материальными затратами, связанными с расходными материалами для проволоки.
- Входная мощность при 5-10 кВт очень мала по сравнению с более чем 50 кВт для других распылительных систем.
- Низкий нагрев подложки делает дуговое напыление применимым при металлизации термочувствительных подложек, таких как конденсаторы и аналогичные электронные компоненты.
- Можно распылить два разнородных провода и получить смешанное покрытие. Примерами могут служить композиты из меди и стали на тормозных дисках и колодках сцепления, а также композиты из стали и бронзы на поверхностях подшипников и скользящих поверхностях станков.
- Более высокая прочность сцепления, чем при пламенном напылении, даже при более толстых покрытиях. Прочность связи аналогична в широком диапазоне углов распыления.
- Более низкий уровень пористости, чем может быть достигнут при пламенном напылении.
- Дуговое напыление не требует использования газов сгорания или производства высокоэнергетической плазмы, и, следовательно,

представляет меньше рисков для здоровья и безопасности по сравнению с другими процессами термического напыления.

К основным недостаткам, связанным с дуговым напылением, относятся:

- Процесс может быть использован для распыления только электропроводящих материалов, которые доступны в соответствующей форме провода. Не подходит для распыления керамики или керамики.
- В результате образуется большое количество дыма и пыли, что требует от оператора ношения соответствующего дыхательного аппарата и защитной одежды.
- В целом качество покрытия не соответствует качеству, достигнутому при использовании процессов плазменного и газоплазменного напыления.
- Покрытия, наносимые дуговым напылением, обычно содержат больше пористости и больше оксидов и имеют меньшую прочность связи по сравнению с покрытиями, осажденными плазмой и газоплазменным распылением» [28].

1.3.4.2 Плазменное напыление

Плазменное напыление является одним из процессов термического напыления, использующим высокоэнергетический источник тепла для расплавления и ускорения мелких частиц на подготовленную поверхность. При ударе эти расплавленные частицы («капли») охлаждаются и мгновенно затвердевают путем теплопередачи на подложку и, таким образом, путем накопления образуют покрытие, состоящее из ламелей [28].

В процессе плазменного напыления создание и использование плазмы в качестве высокотемпературного источника реализуется в плазменной горелке. Плазменная горелка состоит из конусообразного торированного катода (вольфрам) и цилиндрического анода (медь). Поток газов (для формирования плазмы) через кольцевое пространство между двумя электродами и дугой инициируется высокочастотным разрядом. Поток газа,

который течет между двумя электродами, растягивает дугу так, что в ее течении от одного электрода к другому дуга выходит из сопла горелки в виде плазменного пламени. В качестве дуговых газов (плазмообразующих газов) в основном используются такие газы, как Ar, He, H₂ и N₂. Температура пламени обычно составляет 10000-15000 °С. Поэтому, в принципе, практически любой металл или керамика, включая тугоплавкие металлы или оксиды, могут быть расплавлены и осаждены для формирования покрытия методом плазменного напыления.

Схема плазменного напыления представлена на рисунке 4.

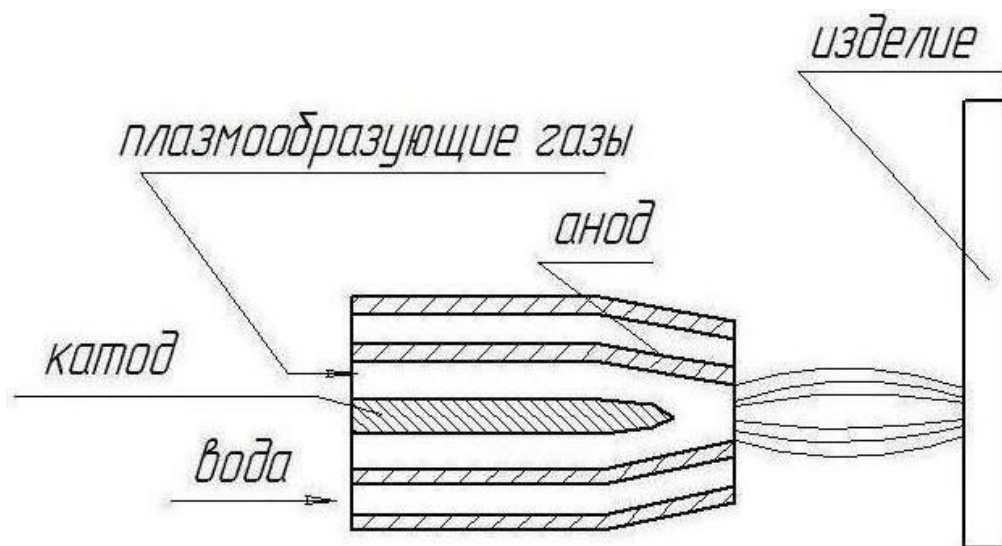


Рисунок 4 — Схема плазменного напыления

Во время плазменного напыления сырьевые материалы (в виде порошка, прутка или проволоки) вводятся в пламенное пламя для расплавления. Расплавленные материалы поступают на поверхность мишени (металлическую подложку) после достаточного нагревания и ускорения струей плазмы. Когда капли соударяются с мишенью, они сплющиваются и рассредоточиваются по поверхности подложки и образуют покрытие путем последовательного напыления (рисунок 6.2). Скорость и температура частиц или капель порошка напрямую связаны с типом плазмообразующего газа.

Большинство порошков, используемых для плазменного напыления, имеют размер частиц 10-90 мкм в диаметре. Порошки с таким узким распределением размеров предпочтительны для достижения равномерного нагрева и ускорения однокомпонентного порошка. Постоянная подача порошка является основным условием для достижения равномерной толщины покрытия и хорошего качества покрытия. Порошки, вводимые в плазму, также должны обладать хорошими текучими свойствами, что опять же связано с их морфологией (предпочитаемая форма: сферическая) и размерами.

Достоинства и недостатки плазменного напыления представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Достоинства и недостатки плазменного напыления

Достоинства	Недостатки
Широкий ассортимент лакокрасочных материалов для удовлетворения различных потребностей, при этом практически все материалы доступны в подходящей порошковой форме.	Высокие тепловые остаточные напряжения в покрытии
Более высококачественные покрытия по сравнению с другими более традиционными термическими процессами, такими как пламя или электродуговое напыление.	Наличие дефектов, таких как неоплавленные частицы, пустоты и трещины, если параметры напыления не оптимизированы
Высокая температура плазменной струи делает его особенно подходящим для напыления покрытий из тугоплавких металлов и керамики, в том числе ZrO_2 , B_4C и вольфрама.	Оборудование для воздушного плазменного напыления, как правило, требует больших инвестиций, чем дуговое и пламенное напыление.
—	Плазменный пистолет обычно испытывает быстрое разрушение внутренних электродов пистолета и других внутренних компонентов. Это приводит к частой замене электродов пистолета, а также к необходимости контроля качества для поддержания постоянства покрытия.
—	Оборудование не подходит для ручного управления и требует использования автоматических манипуляторов пистолетом.

1.3.4.3 Газопламенное напыление

В данном топливный газ (например, пропан или пропилен) и кислород используются для создания струи сгорания при температуре от 2500 до 3100 °С.

«Распыление пламенем представляет собой процесс нанесения покрытия методом термического напыления, при котором получают высококачественные покрытия поверхности с использованием тепла от сжигания топливного газа с кислородом для расплавления материала распыляемого покрытия, который наносится на подложку.

Пламя распыления предлагает экономически эффективную альтернативу для нанесения металлических и керамических покрытий в менее требовательных условиях.

Использование обработки поверхности пламенным распылением позволяет распылять широкий спектр металлических или керамических покрытий на широкий спектр материалов компонентов, где требуется хорошая износостойкость и превосходная ударопрочность» [28].

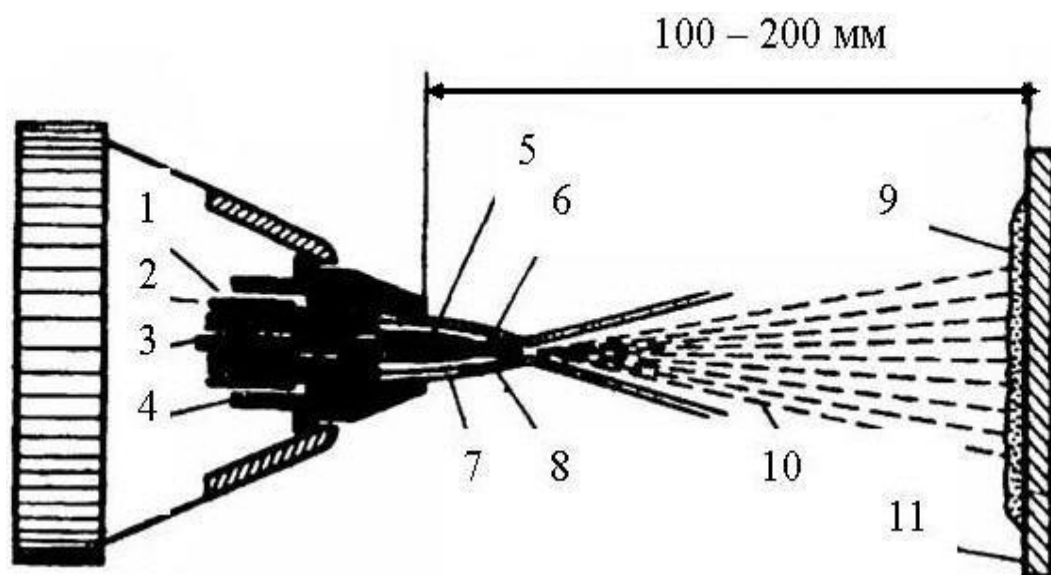
Сжигание происходит внутри камеры при очень высоком давлении, выход смеси осуществляется через цилиндр малого диаметра (8-9 мм), чтобы создать сверхзвуковую газовую струю с очень высокими скоростями твердых частиц.

В результате процесса получают чрезвычайно плотные, хорошо скрепленные покрытия, что делает метод привлекательным для многих применений. Либо порошок, либо проволоочное сырье могут быть распылены с типичной скоростью от 2,3 до 14 кг/ч.

В процессе работы детонационного пистолета порошок вместе с кислородом и топливным газом, как правило, ацетиленом. Смесь под давлением производит управляемый взрыв, который проталкивает смесь вниз по длине ствола.

С помощью этого процесса можно достичь очень высокой прочности и плотности сцепления, а также низкого содержания оксидов.

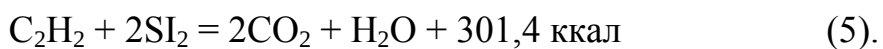
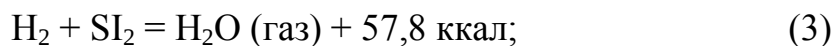
Газопламенное напыление проволокой представлено на рисунке 5.



1 - сжатый воздух; 2 - ацетиленокислородная или пропано-кислородная горючая смесь; 3 - проволока; 4 - насадок; 5 - ядро ацетиленокислородного пламени; 6 - оплавливающийся конец проволоки; 7 - факел пламени; 8 - воздушный поток; 9 - покрытие; 10 - поток частиц напыляемого материала; 11 - основной материал

Рисунок 5 — Газопламенное напыление проволокой

При полном сгорании ацетилена протекают следующие химические реакции:



Достоинства и недостатки представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Достоинства и недостатки газоплазменного напыления

Достоинства	Недостатки
Более высокая плотность (меньшая пористость) из-за больших скоростей удара частиц.	Покрытия быть чрезвычайно сложными, с их свойствами и микроструктурой, зависящей от многочисленных технологических переменных.
Улучшенная износостойкость за счет более твердых и прочных покрытий.	Размеры порошка ограничены диапазоном около 5 - 60 мкм, при этом требуется узкое распределение размеров.
Более высокая твердость за счет меньшей деградации карбидных фаз.	Нанесение требует опытного, квалифицированного персонала для обеспечения безопасной эксплуатации и достижения стабильного качества покрытия.
Улучшенная защита от коррозии за счет уменьшения пористости.	Нанесение необходимо проводить в специализированной кабине термического напыления, с соответствующим оборудованием для ослабления шума и удаления пыли.
Более высокая прочность связи с подложкой и улучшенная когезионная прочность внутри покрытия.	Требуется больше инвестиций, чем другие процессы термического напыления, например, пламя и дуговое напыление.
Более низкое содержание оксидов из-за меньшего времени экспозиции в полете.	Осаждение покрытий трудно или невозможно осуществить на внутренние поверхности небольших цилиндрических деталей, или на другие поверхности с ограниченным доступом,
Сохранение химии порошка за счет сокращения времени при температуре.	—
Более толстое покрытие за счет меньших остаточных напряжений.	—
Более гладкая поверхность, на которую наносится напыление, благодаря более высокой скорости удара и меньшему размеру порошка.	—

1.4 Коррозия металлов в природных и технологических средах

«Машины, аппараты, металлоконструкции в зависимости от своего назначения работают в природных или промышленных средах.

Характер технологической среды оказывает значительное влияние на закономерности коррозионных процессов и требует принятия различных решений для осуществления основной инженерной задачи – защите металлов от коррозии» [29].

В соответствие с принятой классификацией будут рассмотрены основные закономерности протекания коррозионных процессов в природных условиях. Это атмосферная, почвенная и морская коррозия.

«Технологические среды химических производств отличаются большим многообразием, различным и сочетанием коррозионно-активных компонентов, и в каждом конкретном случае требуют своего решения. Поэтому будут рассмотрены общие вопросы – влияние конструктивных факторов на развитие коррозионных разрушений машин и аппаратов и некоторые виды газовой коррозии, которые приводят к специфическим деструктивным изменениям металлов и сплавов» [29].

1.4.1 Атмосферная коррозия металлов

Атмосферная коррозия – это коррозия сооружений и оборудования, эксплуатирующихся в нормальной земной атмосфере.

Железо в его различных формах подвергается воздействию любых сред, оно очень интенсивно реагирует с атмосферным кислородом и другими веществами из-за его естественной тенденции сформировать оксид железа. «Сопротивление коррозии происходит из-за образования тонкой пленки защитного оксида железа на его поверхности в результате реакции с кислородом воздуха. Эта пленка может предотвратить ржавление на воздухе при относительной влажности 99%, но загрязняющие вещества, такие как кислотные дожди, могут снизить эффективность пленки и привести к продолжительной коррозии. Более толстые пленки оксида железа могут выступать в качестве защитных покрытий и после первого года или около того могут значительно снизить скорость коррозии» [28].

«Скорость коррозии и её вид коррозионного разрушения зависят от природы металла, влажности, загрязненности атмосферы (ГОСТ 16350-80). В среднем скорость коррозии металлов в атмосфере ниже, чем в почве, так и в морской воде. Основным стимулирующим фактором атмосферной коррозии является вода. При относительной влажности воздуха до 60 % следы влаги на поверхности металла отсутствуют. В этом случае коррозия протекает по

химическому механизму. Образующиеся на поверхности оксидные пленки обладают специальными защитными свойствами и тормозят развитие коррозионных разрушений.

При относительной влажности воздуха, равной примерно 60-70 %, начинается выделение влаги (конденат) и на поверхности металла появляется адсорбционная пленка воды. Относительная влажность, при которой начинается конденсация влаги на поверхности металла, называется критической влажностью. Она зависит от состояния металла и от степени загрязнения воздуха. При относительной влажности, близкой к 100 %, или при непосредственном увлажнении металла (дождь, туман, снег), на поверхности происходит образование видимых фазовых слоев воды.

Указанные три типа состояний значительно отличаются по механизму протекания процесса коррозии» [28].

«В области сухой коррозии, как указывалось выше, реализуется химический механизм процесса и скорость разрушения металлов невелика. Рост оксидной пленки происходит в первые секунды и минуты. После двух-трех часов дальнейшее утолщение пленки прекращается. Предельная толщина пленок на железе – 30-40 А, на нержавеющих сталях – 10-20 А.

При образовании адсорбционного слоя влаги (толщиной порядка нескольких молекулярных слоев) на поверхности металла появляется электролит. В таких условиях реализуется электрохимический механизм и скорость коррозии значительно возрастает. Пленка влаги имеет небольшую толщину, кислород проникает через нее беспрепятственно и катодный процесс не затруднен. Анодный процесс осложняется тем, что продукты коррозии экранируют поверхность металла. Так как пленка влаги очень тонкая, то возможны и даже весьма существенные омические потери, но, в целом, процесс контролируется анодным торможением» [28].

При образовании фазовых пленок в области мокрой коррозии затрудняется доставка кислорода и можно наблюдать катодное торможение процесса. Железо и сталь в обычных условиях подвергаются общей

равномерной коррозии. Характер протекания атмосферной коррозии существенно зависит от конструктивных особенностей изделия. Наличие узких щелей и зазоров, в которых возможны капиллярная конденсация и застой влаги, усугубляют атмосферную коррозию и могут привести к образованию коррозионных язв.

Загрязнение атмосферы газами, пылью резко ускоряет коррозию. Это явление наблюдают в промышленных центрах, особенно в присутствии в воздухе SO_2 , NH_3 , H_2S , Cl_2 , HCl . Обнаружено резко стимулирующее коррозию влияние низких концентраций SO_2 . Так, присутствие в атмосфере SO_2 в концентрациях 15-35 мкг/м³ увеличивает скорость коррозии в десятки и сотни раз. В это же время высокие концентрации SO_2 увеличивают скорость коррозионных разрушений только примерно в 5-7 раз.

Стойкость металлов к атмосферной коррозии зависит от их химической природы и состояния поверхности. В таблице 5 приведены приближенные данные по стойкости некоторых металлов в городской атмосфере.

Таблица 5 — Приближенные данные по стойкости некоторых металлов

Металл	Pb	Al	Sn	Cu	Ni	Zn	Fe
Скорость коррозии, мкм/год	4	8	12	12	32	50	100

1.4.2 Влияние конструктивных факторов на развитие коррозионных разрушений

«При проектировании химического производства, как правило, уделяют основное внимание анализу характера агрессивной среды и условиям протекания процесса. Руководствуясь этими данными, выбирают материал, обладающий достаточным химическим сопротивлением» [29].

Столь же пристального внимания заслуживает рациональное конструирование отдельных узлов и аппаратов. Неудачное конструирование во многих случаях может явиться причиной образования застойных зон,

зазоров, концентрации напряжений и других явлений, способствующих возникновению и протеканию коррозии.

Вместе с тем уже на стадии проектирования можно предусмотреть такие конструктивные решения отдельных узлов аппарата, которые значительно снизят или устранят возможность возникновения процесса коррозии.

«При конструировании оборудования следует обращать внимание на характер обработки поверхности металла, контакт соединительных элементов из различных материалов, режим распределения потоков теплоносителя, наличие щелей и зазоров, возможность образования застойных зон. Гладкая поверхность металла имеет меньше различных дефектов в виде царапин, неровностей и т.д. На шероховатой поверхности легче скапливается грязь, пыль и другие вещества. Металлическое оборудование и конструкции с шероховатой поверхностью в этом случае покрываются различными веществами. Если эти вещества гигроскопичны и легко впитывают влагу, то они прилипают к поверхности металла, создаются местные очаги с высокой концентрацией электролита, что способствует усиленной коррозии» [29]. «Если в конструируемом аппарате есть детали, выполненные из различных металлических материалов, то возникает опасность проявления контактной коррозии. В этом случае еще на стадии проектирования обязательно должны быть приняты меры по предотвращению или ослаблению этого явления. Обычно применяют один из двух возможных приемов» [30].

Контактирующие детали из разнородных металлов изготавливают с различной величиной поверхности. При этом деталь с наименьшей поверхностью должна быть выполнена из более благородного металла (штулки вентилей, поршневые кольца насосов и т.д.).

Если такой способ оказывается невозможным, то детали из разных материалов должны быть изолированы друг от друга. Этот способ предотвращения электрохимической контактной коррозии часто применяют

при проектировании трубопроводов, в строительных конструкциях. Особое внимание при этом надо уделить свойствам прокладочного материала. Он должен быть инертным по отношению к рабочей среде, способным выдерживать температурные и механические нагрузки, иметь высокую износостойкость. Особое внимание следует уделить монтажу контактных узлов. Если монтаж выполнен неаккуратно, то возможно возникновение застойных зон, щелей и других очагов усиленного развития коррозии.

«Многие химические и нефтехимические процессы протекают при повышенных температурах. Коррозионные процессы в этих условиях имеют свои особенности» [29].

«Чем выше температура, тем интенсивнее происходит разрушение металла. Скорость коррозии в условиях теплопереноса может изменяться до двух порядков.

Поверхность металла, соприкасающаяся с теплоносителями и хладагентами, подвергается дополнительному коррозионному воздействию. Например, теплообменники являются одним из наименее стойких видов оборудования. В 92 % случаев причиной отказа в работе теплообменника является коррозия теплопередающих поверхностей. В изотермических условиях при равенстве температур металла и технологической среды в определенном интервале температур наблюдается эффект резкого увеличения скорости коррозии пассивирующихся металлов и снижение потенциала свободной коррозии. Металл из пассивного состояния переходит в активное. Очевидно, что в реальных условиях надо стремиться работать при таких температурах, при которых металл еще сохраняет способность к самостоятельному переходу в пассивное состояние» [28].

При конструировании аппаратов следует предусмотреть равномерное распределение теплового потока, исключить возможность локального перегрева. Во многих промышленных аппаратах, в которых протекают высокотемпературные процессы, такие меры предусмотрены. Для теплообменного оборудования наиболее распространенными являются

локальные виды коррозии, такие как питтинговая, щелевая и межкристаллитная.

При проектировании конструкций должны быть обозначены места и способы сварки. При сварке металлов в зоне шва и в околошовной зоне создаются большие растягивающие напряжения. В зонах, расположенных вдоль шва, где металл нагревается выше критических температур, меняется структура металла. Это может привести к растрескиванию металла.

При конструировании сварных узлов и деталей следует предусматривать ряд мер: избегать скопления швов, исключить точечную сварку, при которой особенно велика концентрация напряжений, применять местный отжиг и т.д.

«Очень опасными в коррозионном отношении зонами в аппаратуре являются зазоры и щели. В них может происходить концентрирование рабочего раствора, нарушаться аэрация, что неизбежно приведет к развитию местной коррозии. С этой точки зрения опасны прерывистые сварные швы, в которых вследствие неплотного прилегания материала друг к другу образуются щели и зазоры, являющиеся причиной возникновения щелевой коррозии. Образование застойных зон жидкости в аппаратах и трубопроводах сильно увеличивает возможность возникновения коррозии за счет образования микропар неравномерной аэрации. Этому способствует и отложение различных осадков в застойной зоне. Предупредительными мерами являются рациональное конструирование. В рационально сконструированных узлах устранена возможность скапливания влаги и продуктов коррозии, предусмотрена возможность удаления осадка» [29].

1.5 Отчет о патентных исследованиях

Проведен поиск патентной информации о различных способах нанесения антикоррозионного покрытия. Анализ патентов приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Анализ патентной информации о различных способах нанесения антикоррозионного покрытия

Автор патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
Бойко Сергей Иванович, Лещенко Виктор Викторович, Винокуров Валерий Иванович	«Таким образом, сущность изобретения заключается в том, что возникающие в трубопроводе индукционные токи, обусловленные наведенным переменным электрическим полем, взаимодействуют с коррозионными токами гальванических пар на поверхности трубопровода. Результатом такого взаимодействия является предупреждение образования новых коррозионных пар (анод-катод) и прекращение активности действующих» [7].	«Повышение устойчивости металлического трубопровода к внутренней коррозии достигается тем, что наведенные в трубопроводе знакопеременные индукционные токи, создавая в определенные моменты времени суперпозицию постоянным коррозионным токам отдельных макро - и микропар, приводят к нарушению физико-химических условий образования гальванических пар, требующих после электромагнитного воздействия длительного времени релаксации» [7].
Созонов Петр Михайлович, Рябов Виктор Михайлович, Гольдфарб Анатолий Яковлевич, Скаковский Евгений Анатольевич, Бухарин Игорь Александрович, Кунгурцева Светлана Александровна, Нуриев Гаптыльмажит Назипович	«Нанесение полимерной ленты с мастичным слоем поверх армированного мастичного материала при одновременном осуществлении прикатки эластичными роликами образующегося двойного изоляционного мастично-полимерного слоя позволяет перераспределить мастику по поверхности трубы, заполняя все неровности рельефа и пустоты, в том числе в зоне валиков сварных швов. Нанесение обертки из термоусаживающейся ленты с твердым термоплавким клеевым слоем и последующая ее термообработка позволяют сформировать жесткий монолитный, плотно обжимающий покрытие кожух, не подверженный гофрообразованию и смещениям в процессе эксплуатации трубопровода. Твердый термоплавкий клей, расплавляясь при термообработке, обеспечивает после охлаждения прочное сцепление витков обертки в местах нахлестов между собой, увеличивает жесткость оболочки	«Предлагаемый способ обеспечивает высокотехнологичную, надежную и долговременную защиту трубопроводов от коррозии. Способ антикоррозионной защиты наружной поверхности трубопровода, заключающийся в очистке поверхности, нанесении на нее грунтовки, последовательной спиральной намотке с нахлестом рулонного мастичного армированного материала на основе битумно-полимерной либо асфальтосмолистой мастики и термоусаживающейся обертки с последующей ее термообработкой, отличающийся тем, что перед нанесением обертки дополнительно проводят намотку полимерной ленты со слоем той же мастики по всей ее поверхности, обращенной к трубопроводу, и одновременно осуществляют ее прикатку эластичными роликами, а в качестве обертки применяют двухслойную полимерную термоусаживающуюся ленту с твердым термоплавким клеевым слоем» [8].

Продолжение таблицы 6

Автор патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
	Термообработка обертки, в частности, излучением галогенных ламп накаливания по сравнению с другими видами нагрева (например, газовым нагревом или нагревом ТЭНами) позволяет осуществлять неглубокий поверхностный нагрев полимерной термоусаживающейся обертки, а также подплавлять клеевой слой на ее кромках в зонах нахлеста, исключает сплавление оберточного и изоляционного слоев, практически не затрагивая внутренней мастичной основы, и тем самым провести достаточную усадку, обеспечивая образование монолитного кожуха и не допуская стекания мастичного слоя» [8].	
Гедзь Андрей Джонович, Коберниченко Анатолий Борисович, Ефремов Владимир Владимирович, Шульчевский Юрий Геннадьевич, Ухалин Александр Сергеевич	«Известен способ газопламенного напыления металлических порошков, включающий введение в пламя, образованное при сгорании ацетилена и кислорода, струи, состоящей из транспортирующего газа аммиака и напыляемого порошка. В результате диссоциации аммиака ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3\text{H}$) в ядре основного пламени и внешнего бескамерного горения смеси атомарного водорода с воздухом происходит удлинение факела, выравнивание профилей температур, интенсификация процесса передачи тепла от струи к порошку, а также его защита от окисления» [10].	«Технический результат достигается тем, что в предлагаемом способе газопламенного напыления порошковых материалов, включающем введение в пламя, образованное при сгорании ацетилена и кислорода, струи, состоящей из транспортирующего газа и напыляемого порошка, струю защищают инертным газом, который подают на расстоянии 30-90 мм от среза сопла газопламенной горелки по периферии напыляемого потока с углом наклона образующей потока защитного газа к оси струи 10-35° и с расходом 0,3-0,5 м ³ /ч» [10].
Бекренев Николай Валерьевич, Лясников Владимир Николаевич, Трофимов Дмитрий Викторович	«Сущность изобретения заключается в следующем. Плазменное напыление осуществляют путем формирования потока частиц ультразвуковым распылением тонкого слоя расплава на торце металлического прутка, помещенного в струю плазмы на расстояние $l=10-15$ мм от среза сопла плазмотрона. Ток дуги выбирают из соотношения 120-150 А, а скорость подачи пруткового материала определяют из условия обратной пропорциональности скорости распространения фронта расплава и сохранения толщины его слоя равной не более половины длины стоячей волны ультразвуковых колебаний» [9].	«Технический результат, на обеспечение которого направлено изобретение, заключается в повышении однородности физико-механических свойств покрытий по площади и толщине, что улучшает их технологические и эксплуатационные свойства. Задачей изобретения является формирование покрытий с повышенной адгезией, высокой однородностью структуры и сглаженным однородным микрорельефом» [9].

Продолжение таблицы 6

Автор патента	Сущность предлагаемого решения	Результативность предлагаемых решений
Синолицын Эммануил Константинович, Приходько Виктор Маркович, Рубанов Владилен Васильевич, Шевченко Анатолий Иванович, Чуларис Александр Александрович, Шевченко Алексей Анатольевич	«Изобретение относится к газотермическим технологиям и может быть использовано при нанесении покрытий методом газопламенного напыления. Способ включает введение в пламя, образованное при сгорании ацетилена и кислорода, струи, состоящей из транспортирующего газа-аммиака и напыляемого порошка. Изобретение направлено на увеличение длины газового пламени, повышение времени пребывания частиц порошка в зоне горения и повышение прочности сцепления расплавленных частиц с основой. Цель в предполагаемом техническом решении - повысить в полтора и более раз прочность сцепления металлических покрытий с основой»[11].	«В результате диссоциации аммиака ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3\text{H}$) в ядре основного пламени и внешнего бескамерного горения смеси атомарного водорода с воздухом происходит удлинение факела, выравнивание профилей температур, интенсификация процесса передачи тепла от струи к порошку, а также его защита от окисления. Прочность сцепления напыленных покрытий ряда конструкционных металлов и сплавов на никелевой основе, установленная по клеевой методике, превышает 20 МПа» [11].

Выводы к разделу 1:

В представленном разделе был рассмотрен литературный обзор, который представляет собой детальный анализ использованной литературы. С его помощью рассмотрена проблема коррозионного воздействия на металлические поверхности и трубопроводы.

Также был проведен патентный поиск, в котором представлена информация о различных способах нанесения антикоррозионного покрытия, сущность предлагаемых решений и результативность предлагаемых решений.

Определена сущность предлагаемого решения и результативность предлагаемых решений.

С его помощью было возможно показать опыт учёных в изучении данной темы, привести теоретическую базу исследования и обосновать тему выпускной квалификационной работы.

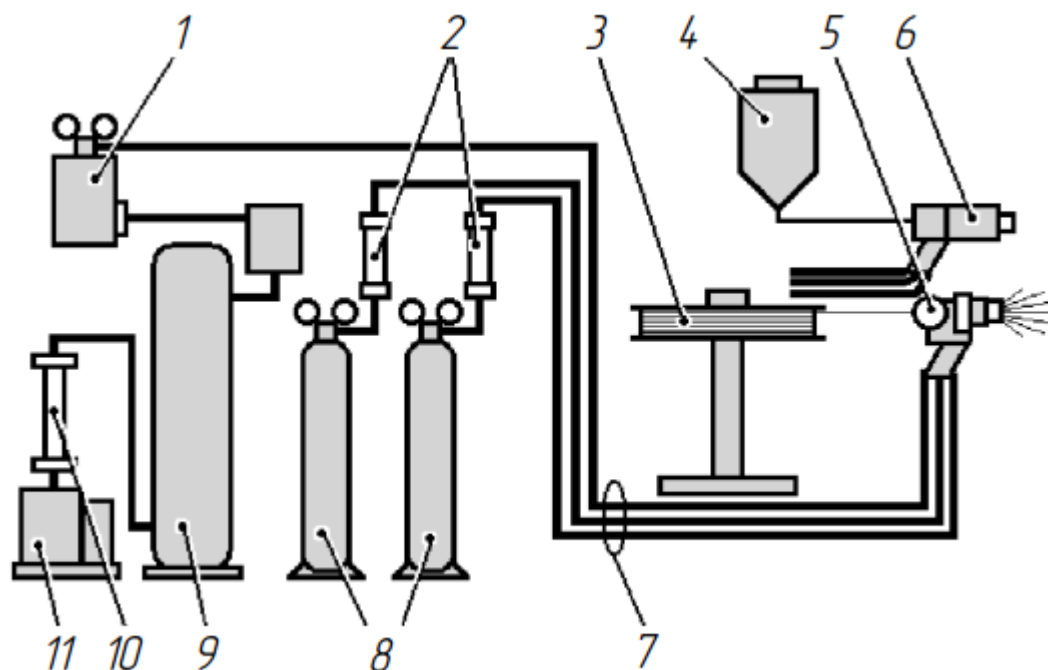
2. Исследование технологии коррозионной защиты

2.1 Выбор методов нанесения защитных покрытий

Выбор метода нанесения покрытий основывается на учете многих особенностей технологического процесса производства изделий с нанесенными покрытиями. Наиболее важными из них являются: конструктивные особенности изделий, условия эксплуатации, требования к свойствам покрытия и его толщине, требования к материалу покрытия, влияние физико-химических свойств материала изделия, энергоемкость процесса нанесения, коэффициент использования материала покрытия, требования к подготовке поверхности, необходимость последующей обработки покрытий, объемы производства (единичные и серийные), экологическая приемлемость, условия труда и техники безопасности.

Оптимальным вариантом выбора должен быть метод нанесения, обеспечивающий требуемые эксплуатационные свойства покрытий при минимальных экономических затратах, с соблюдением экологических норм, благоприятные и безопасные условия труда.

В данной работе для защиты трубопровода от коррозии была выбрана технология газопламенного нанесения. Схема установки представлена на рисунке 6.



1 — устройство подготовки воздуха; 2 — ротаметры для рабочих газов; 3 — бухта проволоки для наплавки; 4 — порошковый питатель; 5 — пистолет распыления проволоки; 6 — пистолет распыления порошка; 7 — газоподводящие шланги; 8 — баллоны с рабочими газами; 9 — воздушный ресивер; 10 — воздушный ротаметр; 11 — компрессор ТСЗп-MDP-115

Рисунок 6 — Схема универсальной установки газопламенного напыления

2.2 Выбор материала покрытия

Подходящий выбор материала покрытия гарантирует получение важных характеристик эксплуатации изделия. Цинк, алюминий, хром и никель считаются ведущими материалами применяемыми в металлизационных способах нанесения покрытий, для увеличения коррозионной стойкости подложки [30].

Основные материалы для покрытий:

1. Алюминий — очень деятельный металл. Защитные качества дюралевых покрытий обоснована образованием стойкой и сплошной оксидной пленки на его плоскости. Она владеет неплохой стабильностью к влиянию атмосферы, воды, кое-каких нейтральных и кислых смесей. Потенциал алюминия довольно

отрицателен, в следствие этого коррозия его в контакте с металлами (с больше позитивным потенциалом – Cu, Fe, Ni и др.) важно увеличивается.

2. Цинк считается интенсивным составляющим. В ряду напряжения металлов он стоит левее железа, имея больше негативный обычный электродный потенциал. Нанесенный на металлическую или же железную базу цинк отстаивает ее от коррозии, при данном принципным считается единство цинковой пленки.
3. Никель располагается в ряду напряжения левее железа, хрома, цинка и алюминия. Никель довольно инертный металл. Пассивированные пленки на 47 плоскости никеля довольно устойчивы. Никель стоек в смесях щелочей всякий сосредоточении. Его ведущее использование – защитнодекоративные гальванические покрытия железа и стали. Никель отстаивает металл почвы по катодному механизму. В следствие этого нужно создавать никелевые покрытия с малой пористостью.
4. Хром деятельнее чем железо, но довольно склонен к пассивированию, как и алюминий. Особой особенностью хрома считается его высочайшая дееспособность окислению. Он сформирует оксидную пленку как под воздействием окислителей, например, и под воздействием воздуха, растворенного в воде или же смесях.

В критериях установленных задач, в зависимости от номенклатуры упрочняемого изделия и с точки зрения финансовой необходимости более правильно использование покрытия на базе хрома, никеля и железа.

2.3 Свойства покрытий

Работоспособность изделий в агрессивных средах зависит от физико-механических свойств их поверхностных слоев, поэтому важно изучить свойства покрытий, полученных по предложенной технологии. Для этой цели в работе были проведены исследования данных, полученных в ЦВТ ФГБОУ ТГУ по коррозионной и жаростойкости ГПН покрытий на образцах (сталь 10), с нанесенным газопламенным покрытием:

- 1) подслоу ПВ-Н85Ю15 (0,1 мм)
- 2) 20% ПР-НХ17СР4 + 80% ПН-85Ю15 (0,2 мм)
- 3) 50% ПР-НХ17СР4 + 50% ПВ-Н85Ю15 (0,3 мм)
- 4) 80% ПР-НХ17СР4 + 20% ПВ-Н85Ю15 (0,4 мм)

На графике 7 показано влияние содержания хрома в поверхностном слое газопламенного покрытия (образец – сталь 10) на коррозию при 650 °С в течение 1300 ч.

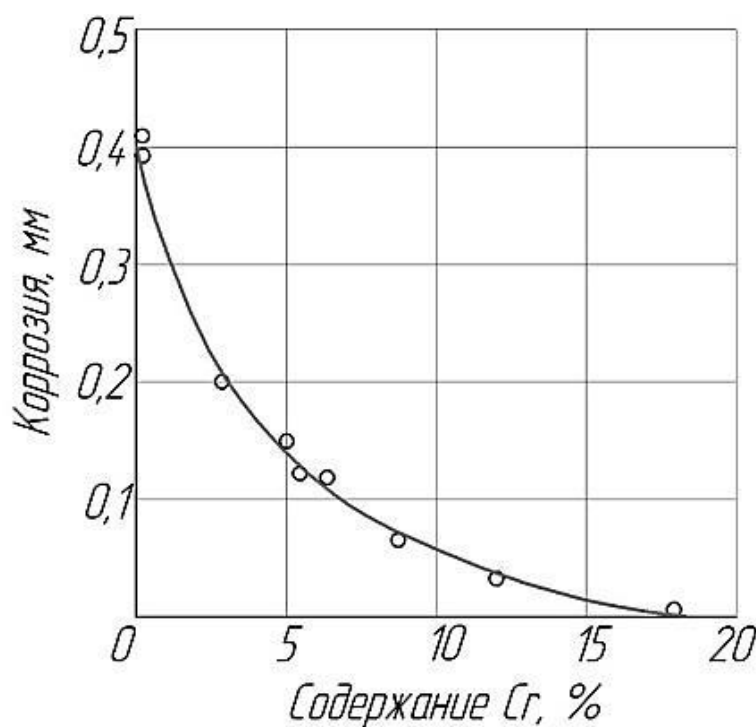


Рисунок 7 – Влияние содержания хрома в покрытии на коррозию образцов при 650 °С в течение 1300 ч

Также исследования показали увеличение жаростойкости образцов (при температуре 800 °С) с покрытиями в 18 раз, по сравнению с непокрытыми образцами (рисунок 8), из чего можно сделать вывод о применимости данных покрытий при жестких условиях эксплуатации (нефть, вода, попутный газ, продукты сгорания), наиболее оптимальное применение – защита внешних поверхностей жаровых труб.

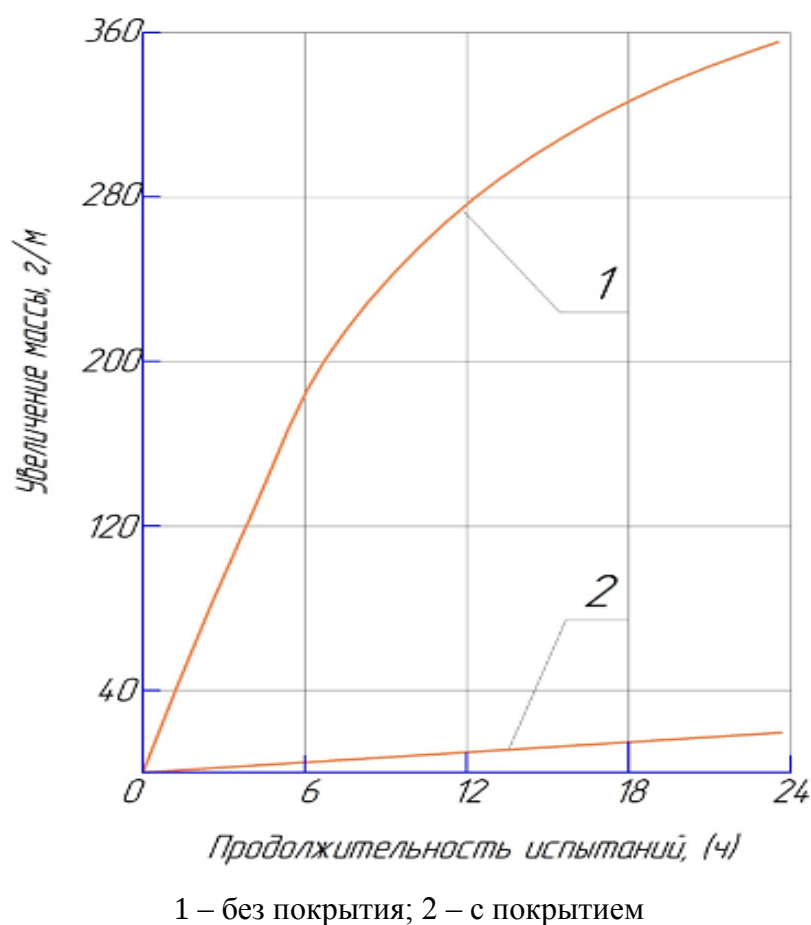


Рисунок 8 – Жаростойкость образцов из стали 10 при температуре 800 °С

2.4 Технологические параметры газопламенного напыления

При газопламенных методах газотермического напыления для формирования потока частиц используют энергию сгорания горючих газов или жидкостей в смеси с кислородом или реже воздухом. Наибольшее

применение связано с использованием углеводородных газов или их смесей: ацетилена C_2H_2 , метана CH_4 , пропана C_3H_8 , бутана C_4H_{10} , пропилена $CH_3-CH=CH_2$, этилена $H_2C=CH_2$. Кроме того, возможно применение нефтегаза, природного газа и др. В перспективе большую роль будет играть водород H_2 . Из большого числа жидких углеводородов в основном применяют продукт переработки нефти керосин, обладающий высокой способностью к воспламенению. Физико-химические свойства горючих газов, наиболее часто применяемых в процессах газотермического напыления покрытий, приведены в таблице 7. Наиболее высокая температура пламени характерна для ацетилена, а теплотворная способность — для пропана и бутана.

Таблица 7 — Физико-химические свойства горючих газов

Параметр	C_2H_2	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}	H_2
Относительная плотность по воздуху	0,91	0,56	1,57	2,10	0,07
Теплотворная способность при 293 К и 0,1 МПа, МДж/м ³	56,5	35,8	93,5	125,1	10,8
Теплота выделения при нейтральном сгорании, МДж/м ³	18,5	1,4	12,6	-	-
Тепловой поток пламени кДж/(см ² с)	44,8	-	10,8	-	14,0
Скорость распространения газового пламени в смеси с кислородом, м/с	13,5	3,3	3,7	-	8,9
Температура газового пламени в смеси с кислородом, К	3373-3473	2273-2373	2673-2973	2673-2973	2273-2773

Избыток кислорода усиливает окислительную способность продуктов горения. При недостатке кислорода в продуктах сгорания появляются углеродосодержащие фазы CO , C_nH_m , способные создавать восстановительную атмосферу при взаимодействии частиц в потоке и на поверхности напыления. При этом необходимо учитывать возможность диффузионного взаимодействия материала частиц с активными атомами

углерода и осаждением сажистого углерода в покрытии. В связи с этим одним из основных параметров газопламенного процесса является отношение кислорода к горючему газу или жидкости. Выбор этого параметра определяется условиями технологического процесса. В зависимости от способа получения потока газопорошковой горючей смеси выделяют следующие методы газопламенного напыления покрытий:

- 1) формирование газопламенного потока за срезом сопла распылителя в воздушной атмосфере;
- 2) формирование потока горючей газопорошковой смеси в камере с повышенным давлением с последующим истечением в сопловое устройство распылителя;
- 3) формирование горючей смеси при детонационном взрыве в канале ствола распылителя.

Главными энергетическими параметрами всех методов газопламенного напыления являются род и расход горючего газа, отношение p и скорость газопламенного потока.

2.5 Этапы нанесения покрытия

Технологическая схема процесса получения газотермических покрытий в зависимости от конкретных задач и технологий может содержать различное количество операций. В общем, весь цикл нанесения газотермических покрытий можно разбить на следующие этапы:

- входной контроль;
- подготовка поверхности к напылению;
- напыление основного покрытия;
- обработка изделий с газотермическими покрытиями (механическая, пропитка, термическая и др.);
- выходной контроль.

Для формирования газотермического покрытия с высоким уровнем свойств необходимо проведение предварительной обработки поверхности изделия. Предварительная очистка поверхности от загрязнения повышает вероятность образования химических связей между напыляемым материалом и основой. Создание шероховатой поверхности увеличивает протяженность границы и количество мест «приваривания» между напыленным слоем и основой, а также может способствовать механическому сцеплению покрытия с основой. Все это приводит к повышению прочности сцепления напыленного материала с изделием [30]. От чистоты поверхности изделия в значительной мере зависит качество покрытия. Наличие на поверхности грязи, окисных и масляных пленок снижает прочность сцепления напыленного материала с основой. После газотермического напыления чаще всего размеры детали и качество поверхности не соответствуют требуемым параметрам. Поэтому часто после напыления детали с покрытиями подвергаются окончательной обработке (механической, термической и др.). Контроль качества продукции после напыления является необходимой операцией технологии, обеспечивающей надежность работы изделия. Многофакторность процесса газотермического напыления обуславливает его чувствительность к отклонениям в режиме и повышает значимость элемента контроля качества покрытий [30].

Выводы к разделу 2:

В данном разделе была исследована технология газопламенного напыления, этапы нанесения покрытий и технологические параметры.

3. Экономическое обоснование предлагаемой технологии коррозионной защиты

3.1 Экономическая эффективность

В данной работе был проведен расчет экономической эффективности предлагаемой технологии газопламенного нанесения защитных покрытий на примере трубопровода.

Исходные данные представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Исходные данные

№	Показатель	Усл. обозн.	Ед. измер.	Варианты	
				Базов.	Проект.
1	2	3	4	5	6
1	Годовая программа выпуска	P_{Γ}	шт.	—	4200
2	Затраты на материалы	$C_{\text{м}}$	руб.	—	8123,15
3	Цена труб		руб./ед	14000	12600
4	Коэф. транспорт.-заготовит. расходов	$K_{\Gamma-3}$	—	—	1,05
5	Часовая тарифная ставка	$C_{\text{ч}}$	руб./ч	—	81,3
6	Коэффициент доплат к основной заработной плате	$K_{\text{д}}$	—	—	1,88
7	Коэффициент отчислений на доп. з/п	$K_{\text{доп}}$	%	—	0,1
8	Коэф. отчислений на соц. нужды	$K_{\text{сс}}$	%	—	0,356
9	Балансовая стоимость оборудования	$C_{\text{об.}}$	руб.		2730000
10	Норма амортизационных отчислений на оборудование	$N_{\text{а}}$	%	—	15
11	Коэффициент полезного действия	КПД	—	—	0,85
12	Стоимость электроэнергии [76]	$C_{\text{ээ}}$	руб./кВт·ч	—	4,61
13	Стоимость воды	$C_{\text{в}}$	руб./м ³	—	5
14	Цена площади	$C_{\text{пл}}$	руб./м ²	—	11000
15	Площадь, занимаемая оборудованием	S	м ²	—	51
16	Стоимость эксплуатации площади	$C_{\text{пл}}$	руб./м ²	—	1900
17	Коэффициент затрат на монтаж (демонтаж) оборудования	$K_{\text{монт}}$	%	—	3

Продолжение таблицы 8

№	Показатель	Усл. обозн	Ед. измер.	Варианты	
				Базов.	Проект.
18	Нормативный коэф. эффективности доп. капитальных вложений	E_n	—	—	0,15
19	Срок службы изделия по базовому/проектному варианту	$T_б/T_{пр}$	лет	50	50
20	Норма амортизационных отчислений на площади	$H_{пл.}$	%	—	5
21	Коэффициент цеховых расходов	$K_{цех.}$	%	—	215
22	Коэффициент заводских расходов	$K_{зав.}$	%	—	250
23	Амортизационные отчисления на эксплуатацию площадей		%		2,4

3.1.2 Расчёт норм времени

По условиям технологического процесса за 1 смену (8ч) происходит изготовление 6 изделий, причем все изделия изготавливаются одновременно.

Таблица 9 – Затраты рабочего времени на технологические операции

Вид работы	$t_{маш.}$	$t_{всп.}$	$t_{обсл.}$	$t_{отл.}$	$t_{п-з.}$	$t_{бшт.}$
	ч	ч	ч	ч	ч	ч
Транспортировка труб	0,5	0,05	0,05	0,025	0,005	1,3608
Подготовка труб	0,5	0,05	0,05	0,025	0,005	1,3608
Нанесение покрытий	6	0,6	0,6	0,3	0,06	7,56
Охлаждение труб	0,28	0,028	0,028	0,014	0,0028	0,3528
Итого	6,28	0,628	0,628	0,314	0,0628	7,9128
Итого на 1 изделие						1,3188

3.1.3 Расчёт фонда времени работы оборудования и количества оборудования, необходимого по техпроцессу

Номинальный годовой фонд времени работы оборудования по формуле (1):

$$F_n = (D_p \cdot T_{см} - D_n \cdot T_n) \cdot C, \quad (1)$$

где D_p – количество рабочих дней в году;

$T_{см}$ – продолжительность смены (час);

$T_{п}$ – количество часов, на которые сокращается смена в предпраздничные дни (по условию технологического процесса $T_{п}=0$);

$D_{п}$ – количество предпраздничных дней;

C – количество смен.

Согласно формуле (1), номинальный годовой фонд времени работы оборудования равен:

$$F_n = (248 \cdot 8 - 8 \cdot 0) \cdot 33 = 5928 \text{ ч}$$

Эффективный фонд времени работы оборудования по формуле (2):

$$F_{э} = F_n \cdot \left(1 - \frac{B}{100}\right), \quad (2)$$

где B – плановые потери рабочего времени, $B = 7 \%$.

Согласно формуле (2), эффективный фонд времени работы оборудования равен:

$$F_{э} = 5928 \cdot (1 - 7/100) = 5513 \text{ ч}$$

Расчет производственной программы производства изделий по формуле (3):

$$П_{г} = D_{п} \cdot n_{см} \cdot C, \quad (3)$$

где $П_{г}$ – производственная программа производства изделий, шт/год;

$n_{см}$ – число изделий, производимых за смену

Согласно формуле (3), производственная программа производства изделий составляет:

$$П_{г.пр.} = 248 \cdot 6 \cdot 3 = 4464 \text{ шт}$$

3.1.4 Расчет общих капитальных затрат

Общие капитальные затраты по проектному варианту по формуле (4):

$$K_{\text{ОБЩ.ПР.}} = K_{\text{ОБ.ПР.}} + K_{\text{ПЛ.ПР.}} + Z_{\text{СОП.ПР.}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ОБ.ПР.}}$ – капитальные вложения в оборудование (руб.);

$K_{\text{ПЛ.ПР.}}$ – капитальные вложения в дополнительные площади (руб.);

$Z_{\text{СОП.ПР.}}$ – сопутствующие капитальные затраты (руб.).

Расчет капитальных вложений в оборудование по формуле (5):

$$K_{\text{ОБ.ПР.}} = C_{\text{ОБ.ПР.}} \cdot K_{\text{Т-З}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{ОБ.ПР.}}$ – стоимость приобретения нового оборудования (руб.);

$K_{\text{Т-З}}$ – коэффициент, учитывающий транспортно – заготовительные расходы на доставку оборудования;

В таблице 10 представлена ценовая категория каждого аппарата напыления защитного антикоррозионного покрытия.

Таблица 10 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена, руб/шт	Сумма
1	Комплекс высокоскоростного напыления Плакарт HVA-7	1	1500000	1500000
2	Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	1	480000	480000
3	Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	1	500000	500000
4	Кран-балка КМПэ 1т	1	100000	100000

Согласно формуле (5), капитальные вложения в оборудование составляют:

$$K_{\text{ОБ.ПР.}} = 2580000 \cdot 1,05 = 2709000 \text{ руб.}$$

Расчет капитальных вложений в дополнительные площади по формуле (6):

$$K_{пл.пр.} = C_{пл} \cdot S_{пр}, \quad (6)$$

где $S_{пр}$ – площадь по проектному варианту, m^2 ;

$C_{пл}$ – стоимость приобретения площади, руб./ m^2 .

Согласно формуле (6), капитальные вложения в дополнительные площади составляют:

$$K_{пл.пр.} = 11000 \cdot 51 = 561000 \text{ руб.}$$

Расчет сопутствующих капитальных затрат по формуле (7):

$$З_{соп} = З_{монт}, \quad (7)$$

где $З_{монт}$ – затраты на монтаж оборудования, руб.

Расчет затрат на монтаж оборудования по формуле (8):

$$З_{монт} = C_{ок пр} \cdot K_{монт} / 100, \quad (8)$$

где $K_{монт}$ – коэффициент, учитывающий затраты на монтаж проектного оборудования, %.

Согласно формуле (7) затраты на монтаж оборудования, а так же сопутствующие капитальные затраты, согласно формуле (8), составляют:

$$З_{монт} = З_{соп.пр.} = 2580000 \cdot 3 / 100 = 77400 \text{ руб.}$$

Общие капитальные затраты по проектному варианту, согласно формуле (4), составляют:

$$K_{общ.пр.} = 2709000 + 561000 + 77400 = 3347400 \text{ руб.}$$

Расчет дополнительных капитальных вложений составляет:

$$K_{\text{доп}} = K_{\text{общ.пр.}} = 3347400 \text{ руб.}$$

Расчет удельных капитальных вложений по формуле (9):

$$K_{\text{ул}} = K_{\text{общ}} / \Pi_{\Gamma}, \quad (9)$$

где Π_{Γ} – годовая программа выпуска, шт/год.

Согласно формуле (9) удельные капиталовложения составляют:

$$K_{\text{уд.пр.}} = 3347400 / 4464 = 750 \text{ руб.}$$

3.1.5 Расчет технологической себестоимости сравниваемых вариантов

Расчет затраты на основные материалы по формуле (10):

$$M_{\text{осн.}} = \Pi_{\text{м}} \cdot K_{\text{тз}}, \quad (10)$$

где $\Pi_{\text{м}}$ – стоимость материала;

$K_{\text{тз}}$ – коэффициент транспортно-заготовительных расходов;

В таблице 11 представлены затраты на материалы для газопламенного метода напыления защитного покрытия.

Таблица 11 – Затраты на материалы для газопламенного напыления

№	Наименование	Расход	Ед. изм.	Цена	Стоимость
1	Пропан	8,0	литр сжиженного газа	18	144
2	Порошок ПХ23Н18	5	кг	1300	6500
3	Порошок ПВ-Н85Ю15	6	кг	1460	8760

Продолжение таблицы 11

6	Порошок Плакарт-0.05-Н	8	кг	900	7200
7	Труба стальная 60х4х6000	1	шт	1200	1200
Итого		–	–	–	7844
С учетом ТЗР		–	–	–	8236,2

Наиболее выгодны порошок: ПХ23Н18

Затраты на основные материалы, согласно (11), составляют:

$$M_{\text{осн}} = 7844 \cdot 1,05 = 8236,2 \text{ руб.}$$

Расчет затрат на заработную плату основных производственных рабочих с отчислениями на социальные нужды:

1) Затраты на оплату труда:

а) Основная з/п по формуле (12):

$$З_{\text{осн.пр}} = C_{\text{ч}} \cdot t_{\text{шт}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент доплат к основной з/п;

$t_{\text{шт}}$ – норма времени на одно изделие, $t_{\text{шт}} = 1,32$.

Основная з/п составляет:

$$З_{\text{осн.пр.}} = 81,3 \cdot 1,32 \cdot 1,88 = 202 \text{ руб.}$$

б) Дополнительная з/п по формуле (13):

$$З_{\text{доп}} = З_{\text{осн}} \cdot K_{\text{доп}}, \quad (13)$$

где $K_{\text{доп.}}$ – коэффициент отчислений на дополнительную з/п.

Согласно (13), дополнительная з/п составляет:

$$З_{\text{доп.пр.}} = 202 \cdot 0,10 = 20,2 \text{ руб.}$$

2) Фонд оплаты труда $\Phi_{\text{ОТ}}$ составляет:

$$\Phi_{\text{ОТ}} = З_{\text{осн.}} + З_{\text{доп.}} = 202 + 20,2 = 222 \text{ руб.}$$

3) Отчисления на социальные нужды по формуле (14):

$$O_{\text{сс}} = \Phi_{\text{ОТ}} \cdot K_{\text{сс}}, \quad (14)$$

где $K_{\text{сс}}$ – коэффициент отчислений на социальные нужды.

Согласно (14), сумма отчислений на социальные нужды составляет:

$$O_{\text{сс.пр.}} = 222 \cdot 0,356 = 79 \text{ руб.}$$

4) Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования по формуле (15):

$$З_{\text{об.}} = A_{\text{о}} + P_{\text{ээ}} + P_{\text{в}}, \quad (15)$$

где $P_{\text{ээ}}$ – расходы на электроэнергию;

$P_{\text{в}}$ – расходы на техническую воду;

а) Расчет амортизационных отчислений по формуле (16):

$$A_{\text{о}} = \frac{Ц_{\text{об}} \cdot H_{\text{а}} \cdot t_{\text{маш}}}{100 \cdot F_{\text{э}}}, \quad (16)$$

где $Ц_{\text{об.}}$ – цена оборудования, руб;

$H_{\text{а}}$ – норма амортизации оборудования

$F_{\text{э}}$ – годовой эффективный фонд времени работы оборудования

Полученные по формуле (16) значения амортизационных отчислений представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Амортизационные отчисления

№	Наименование оборудования	Ц _{об} , руб.	Н _а , %	t _{маш} , час	Аморт. отчисления, руб
1	Комплекс высокоскоростного напыления Плакарт HVA-7	1500000	14	6	210
2	Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	480000		6	68
3	Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	500000		6	68
Итого					346
Итого, в пересчете на 1 изделие					57,7

б) Расчет расходов на электроэнергию по формуле (17):

$$P_{\text{ээ}} = \frac{M_y \cdot t_{\text{маш}} \cdot C_{\text{ээ}} \cdot n}{KПД_i}, \quad (17)$$

где M_y – мощность установки, кВт;

$C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии, руб.

Полученные по формуле (17) значения представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Расходы на электроэнергию

Наименование	Мощность, кВт	Кол-во, ед.	t _{маш} , час	Цена эл.эн, руб./кВт·ч	Итого, кВт·ч	Стоимость
Комплекс высокоскоростного напыления Плакарт HVA-7	8,0	1	6	4,61	48	176,16
Струйно-абразивная установка Problast 60 SL	4	1	6		28	88,08
Компрессорная станция REMEZA BK40-10Д	30	1	6		180	660,6
Итого						924,84
Итого, в пересчете на 1 изделие						154,14

Итого расходы на содержание и эксплуатацию оборудования согласно формуле (15):

$$Z_{об.пр.} = 57,7 + 154,14 = 211,84 \text{ руб}$$

Затраты на содержание, эксплуатацию и амортизацию производственных площадей по формуле (18):

$$Z_{пл} = A_{пл} + P_{пл}, \quad (18)$$

где $A_{пл}$ – амортизация площадей

$P_{пл}$ – расходы на эксплуатацию площадей, руб

Амортизационные отчисления по формуле (19):

$$A_{пл} = \frac{Ц_{пл} \cdot H_{пл} \cdot t_{маш} \cdot S}{100 \cdot F_9}, \quad (19)$$

где $Ц_{пл}$ – цена площади, руб;

$H_{пл}$ – норма амортизации площадей

S – площадь, необходимая для технологического процесса, м²

Согласно (19), амортизационные отчисления составляют 17,45 руб.

Расходы на содержание и эксплуатацию площадей по формуле (20):

$$P_{пл.экс.} = \frac{C_{экс.} \cdot t_{ми} \cdot S}{F_9} \quad (20)$$

где $C_{экс.}$ – стоимость эксплуатации площади, руб.

Согласно (20), расходы на содержание и эксплуатацию площадей составляют 148,75 руб.

Итого, затраты на производственные площади, согласно (18):

$$Z_{пл.пр.} = 17,45 + 148,75 = 166,2 \text{ руб.}$$

Технологическая себестоимость упрочнения детали по формуле (21):

$$C_{тех} = M + \Phi_{от} + O_{ср} + P_{на} + Z_{на} \quad (21)$$

Согласно (21), технологическая себестоимость упрочнения детали составляет 8856,67 руб.

3.1.6 Цеховая себестоимость упрочнения детали

Расчет цеховой себестоимости упрочнения детали по формуле (22):

$$C_{цех} = C_{тех} + P_{цех} \quad (22)$$

$$P_{цех} = Z_{осн} \cdot K_{цех} / 100, \quad (23)$$

где $K_{цех}$ – коэффициент цеховых расходов.

Согласно формулам (22) и (23), цеховая себестоимость упрочнения детали составляет:

$$P_{цех.пр.} = 202 \cdot 215 / 100 = 434,3 \text{ руб.}$$

$$C_{цех.пр.} = 8856,67 + 434,3 = 9291 \text{ руб.}$$

3.1.7 Заводская себестоимость упрочнения детали

Заводская себестоимость упрочнения детали рассчитывается по формуле (24):

$$C_{зав} = C_{цех} + P_{зав} \quad (24)$$

$$P_{зав} = Z_{осн} \cdot K_{зав} / 100, \quad (25)$$

где $K_{зав}$ – коэффициент заводских расходов.

Согласно формулам (24) и (25), заводская себестоимость упрочнения детали составляет:

$$P_{зав.} = 202 \cdot 250 / 100 = 505 \text{ руб}$$

$$C_{зав.пр.} = 9291 + 505 = 9796 \text{ руб}$$

3.1.8 Полная себестоимость упрочнения детали

$$C_{полн} = C_{зав.} + P_{вн.}, \quad (26)$$

где $P_{вн.}$ – внепроизводственные расходы

$$P_{вн.} = C_{зав.} \cdot \frac{K_{вн.}}{100}, \quad (27)$$

где $K_{вн.}$ – коэффициент внепроизводственных расходов, %.

$$P_{вн.} = 9796 \cdot \frac{5}{100} = 489,8 \text{ руб.}$$

$$C_{полн} = 9796 + 489,8 = 10285,8 \text{ руб.}$$

3.1.9 Отпускная цена предприятия на изготавливаемую деталь

$$Ц_{отп} = C_{полн.} + ПР, \quad (28)$$

где ПР – прибыль предприятия, руб.

$$ПР = C_{полн.} \cdot \frac{K_{пр.}}{100}, \quad (29)$$

где $K_{пр.}$ – коэффициент, учитывающий прибыль предприятия (%).

$$ПР = 10285,8 \cdot \frac{30}{100} = 3085,74 \text{ руб.}$$

$$Ц_{отп} = 10285,8 + 3085,74 = 13371,54 \text{ руб.}$$

3.1.10 Калькуляция и структура полной себестоимости и цены упрочнения детали

Таблица 14 – Калькуляция и структура отпускной цены производимого изделия

№ п/п	Показатели	Усл. обозн.	Калькуляция, руб.	Структура, %
			проектный вариант	
1	Фонд оплаты труда	Ф _{от.}	222	1,6 %
2	Отчисления на соц. нужды	О _{сс}	79	0,6 %
3	Затраты на оборудование	З _{об.}	211,84	1,6 %
4	Затраты на площади	З _{пл.}	166,2	1,26 %
5	Затраты на основные материалы	М _{осн.}	8236,2	62 %
	Себестоимость технологическая	С _{тех.}	8856,67	-
6	Цеховые расходы	Р _{цех.}	434,3	3,1 %
	Себестоимость цеховая	С _{цех.}	9291	-
7	Заводские расходы	Р _{зав.}	505	3,6 %
	Себестоимость заводская	С _{зав.}	9796	-
8	Внепроизводственные расходы	Р _{вн}	489,8	3,7%
	Полная себестоимость	С _{полн.}	10285,8	-
9	Прибыль предприятия	ПР	3085,74	23,1 %
	Отпускная цена	Ц _{отп.}	13371,54	100%

3.1.11 Экономический эффект в сфере эксплуатации

Если предполагается экономический эффект в сфере эксплуатации, за счет повышения качества продукции (повышения долговечности), то расчет производится по формуле (30):

$$\mathcal{E}_{\text{экон.}} = \left(\Pi_{\text{б}} \cdot \frac{T_2}{T_1} - \Pi_{\text{пр}} \right) \cdot \Pi_{\text{Г}} - E_{\text{Н}} \cdot K_{\text{пр.дон}}, \quad (30)$$

где T_2 и T_1 – срок службы по проектному и базовому вариантам соответственно.

$$\mathcal{E}_{\text{экон.}} = \left(14000 \cdot \frac{50}{50} - 13371,54 \right) \cdot 4464 - 0,15 \cdot 3347400 = 2303335,44 \text{ руб.}$$

Вывод:

За счет снижения стоимости изделия экономический эффект в сфере эксплуатации от внедрения данной технологии составит 2303335,44 рублей в год.

Вывод к разделу 3:

В данном разделе было проведено экономическое обоснование использования выбранного антикоррозионного покрытия.

Заключение

В данной бакалаврской работе для решения поставленных задач в ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ существующих методов антикоррозионной защиты
2. Усовершенствована наилучшая доступная технология
3. Проведен патентный поиск
4. Выполнено экономическое обоснование целесообразности предлагаемой технологии коррозионной защиты трубопровода. Экономический эффект согласно расчетам, равен 2303335,44 руб/год.

В результате исследования установлена теоретическая необходимость внедрения покрытий в качестве увеличения коррозионной стойкости трубопровода.

Были выявлены проблемы в работе трубопровода на ООО«Тольяттикаучук», а они следующие:

- возникающая коррозия на фоне агрессивности среды
- возможные утечки токсичных веществ
- износ трубопровода.

На основании проанализированной проблемы было предложено совершенствование технологии полной коррозионной защиты продукто-проводов на предприятии ООО «Тольяттикаучук». Так же была исследована технология газопламенного напыления, этапы нанесения покрытий и технологические параметры и было проведено экономическое обоснование по использованию выбранного антикоррозионного покрытия.

Таким образом, цель достигнута и поставленные задачи были выполнены.

Список используемых источников

1. Уральская промышленно-строительная компания “УПСК”[Электронный ресурс].- Электрон. дан.(1 файл), [2010].
2. ТУ 1390-007-86695843-2010. Трубы стальные электросварные диаметром до 1420 мм с наружным антикоррозионным полиэтиленовым покрытием для строительства промысловых и магистральных нефтепроводов
3. Бафаев Д.Х. Эффективный способ повышения прочности поверхностных слоев деталей машин / Д.Х. Бафаев, М.Н. Шаропов. — Текст : непосредственный // Техника. Технологии. Инженерия. — 2018. — № 1 (7). — С. 24-29.
4. Хохлачева Н. М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии. Учебное пособие / Н.М. Хохлачева, Е.В. Ряховская, Т.Г. Романова. - М.: ИНФРА-М, 2016. - 118 с.
5. Зарубина Л.П. Защита зданий, сооружений, конструкций и оборудования от коррозии. Биологическая защита. Материалы, технологии, инструменты и оборудование / Л.П. Зарубина. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. - 224 с.
6. Зайцев О.С. Химия. Учебник / О.С. Зайцев. - М.: Юрайт, 2015. - 470 с.
7. Бойко С.И., Лещенко В.В., Винокуров В.И.. Патент RU2347012C2 С 23 F 15/00. Способ антикоррозионной защиты металлических трубопроводов от внутренней коррозии. Оpubл. 20.02.2009 г. 6 с.
8. Созонов П.М., Рябов В.М, Гольдфарб А.Я., Бухарин И.А., Нуриев Г.Н., Скаковский Е.А., Кунгурцева С.А.. Патент RU2340830C1, F 16 L 58/04. Способ антикоррозионной защиты трубопровода. Оpubл. 10.12.2008 г. 5 с.
9. Бекренев Н.В., Лясников В.Н., Трофимов Д.В.. Патент RU2283364C2, С 23 C4/12. Способ плазменного напыления покрытий. Оpubл. 10.09.2006 г. 9 с.

10. Гедзь А.Д., Коберниченко А.Б., Ухалин А.С., Ефремов В.В., Шульчевский Ю.Г.. Патент RU2312165C2 C23 C4/12. Способ газопламенного напыления металлических порошковых материалов. Опубл. 10.12.2007 г. 7 с.
11. Синолицын Э.К., Приходько В.М., Рубанов В.В., Шевченко А.И., Шевченко А.А., Чуларис А.А. Патент RU2169792C2, С 23 C4/12. способ газопламенного напыления металлических порошков. Опубл. 27.06.2001 г. 2 с.
12. Бородулин Г.М. Нержавеющая сталь [Текст] / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 1973. 319 с.
13. ГОСТ 10052-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы».
14. ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования».
15. ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования»
16. ГОСТ 6032-2003 «Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии».
17. ГОСТ 12.2.007.0-75. ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности
18. ГОСТ 12.2.008-75 (2001) ССБТ. Оборудование и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий. Требования безопасности.
19. РД 03-418-01 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. М:2002
20. РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах», (утв. АК «Транснефть» 30.12.99 приказом №152, согласовано Госгортехнадзором от 07.07.99 № 10-03/418, 1999).
21. РД 03-418 – 01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – Сер. 3. – Вып. 10. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.

22. Roberge Pierre R, R. Winston Revie. Corrosion Inspection and Monitoring, 2016 г. 377 с.
23. Article in Corrosion Engineering Science and Technology 50(4):265-269, May 2015.
24. Flaring Gas: How Not to Waste a Valuable Resource // By Columbia center on sustainable investment. — September 16, 2016.
25. Lietai Yang. Techniques for corrosion monitoring. – April 10, 2016.
26. J.E. Singley. Corrosion prevention and control in water treatment and supply systems. 325 p.
27. Philippe Marcus, Florian B. Mansfeld. Analytical Methods in Corrosion Science and Engineering. 300 p.
28. Колесникова А.С. Химические основы защиты транспортных сооружений от коррозии. Методическое пособие. ДГУПС. Хабаровск. 2001.
29. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии, М.: Физматлит, 2002. 335 с.
30. Рыбина Е.О., Богомолов Б.Б.. К.т.н., доцент каф. ИМиЗК РХТУ им. Д.И. Менделеева. Техничко-экономический анализ технологии нанесения антикоррозионного покрытия. 2019 г.