

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Напыление коррозионностойких покрытий сварных швов магистральных
газопроводов

Обучающийся

В.Н. Мельников

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н, профессор

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

А.Н. Ковтунов

Содержание

Введение	4
1 Общие сведения и понятия о коррозии и защите трубопроводов	8
1.1 Почвенная коррозия	8
1.1.1 Опасность почвенной коррозии для магистральных газопроводов	10
1.1.2 Анализ дефектов по результатам отчета ВТД участка МГ «Челябинск-Петровск», Ду 1400, 610-778 км	13
1.2 Обзор и анализ методов получения защитных коррозионностойких покрытий	15
1.2.1 Методы получения наружной противокоррозионной защиты современными изоляционными материалами	15
1.2.2 Методы нанесения защитных металлических коррозионностойких покрытий	19
1.2.3 Холодный способ нанесения защитного покрытия	19
1.2.4 Горячий способ нанесения защитного покрытия	20
1.2.5 Холодное газодинамическое напыление	21
1.2.6 Газопламенное и плазменное нанесение защитного покрытия ..	22
1.2.7 Электродуговая металлизация	23
1.3 Анализ наиболее применимых методов и оборудования нанесения защитных металлических коррозионностойких покрытий на сварные соединения магистрального газопровода	27
1.3.1 Обоснование необходимости защиты сварного соединения после сварки	27
1.3.2 Оборудование газопламенного нанесения защитного покрытия	30
1.3.3 Оборудование электродуговой металлизации	30
1.4 Обоснование выбора оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение в трассовых условиях	31
1.4.1 Требования к мобильности оборудования	31

1.4.2 Требования по безопасности и надежности эксплуатации оборудования	32
1.4.3 Выбор наиболее подходящей технологии и оборудования для защиты сварных швов и околошовной зоны МГ	34
2 Разработка комплексной технологии нанесения коррозионностойких покрытий кольцевых швов магистральных газопроводов	36
2.1 Анализ и выбор присадочных материалов для напыления на сварное соединение методом электродуговой металлизации	36
2.1.1 Характеристики защищаемых поверхностей для нанесения коррозионностойкого покрытия	37
2.1.2 Выбор наиболее подходящего состава материала защитного покрытия	38
2.1.3 Условия проведения и свойства материала покрытия	41
2.2 Подготовка поверхности сварного шва и околошовной зоны перед напылением	43
2.3 Напыления защитного покрытия на поверхность сварного шва и околошовной зоны	49
2.4 Контроль качества металлизационных покрытий	53
3 Зависимость сплошности, пористости и адгезионной прочности нанесенных покрытий от скорости вылета, и размера напыляемых частиц	56
3.1 Условия получения максимально прочного адгезионного покрытия	56
3.2 Способы повышения качества получаемых покрытий	58
Заключение	68
Список используемой литературы и используемых источников	71

Введение

Самым эффективным и безопасным способом транспортировки газа на значительные расстояния является их транспортировка по газопроводам. Этот способ транспортировки от мест добычи к местам потребления применяется уже больше сотни лет. При этом коррозионная защита газопроводов напрямую влияет на их долговечность и безаварийную работу.

ООО «Газпром трансгаз Самара» на данный момент обслуживает более 4500 километров газопроводов, расположенных от границы Татарстана до Саратовской области, в том числе с системой газораспределительных и компрессорных станций.

В настоящее время магистральная часть газотранспортной системы, которая была проложена в начале 80-х годов, требует проведения работ по капитальному и текущему ремонту.

Для выполнения работ по восстановлению технических характеристик газопровода и приведение их в соответствие с нормативными значениями, необходимо выполнить значительный объем работ по капитальному ремонту с заменой труб, имеющих недопустимые дефекты, на новую в заводской изоляции.

Необходимо выполнить эту работу так, чтобы ресурс вновь проложенного магистрального газопровода оказался максимальным и вложенные капитальные затраты были реализованы в полной мере.

Основными задачами ставятся качественное выполнение всего комплекса подготовительных и сварочных работ, а также мероприятий по поддержанию газопроводов в исправном состоянии. Для реализации этих задач должны быть применены в том числе и эффективные способы защиты газопроводов от коррозионных воздействий окружающей среды.

Как показывают данные результатов внутритрубной диагностики, основными дефектами, наиболее опасными и требующими кратчайшего проведения ремонта, являются коррозия и аномалии кольцевых швов

магистральных газопроводов. Дефекты в основном металле трубы встречаются значительно реже и чаще всего имеют аномалию, вызванную нарушением технологии производства этих труб. Также их категория опасности ниже, что позволяет дальше эксплуатировать газопровод до перехода дефектов в категорию опасных и подлежащих исправлению в ближайшие сроки.

Накопленная статистика дефектов показывает, что именно зоны сварных соединений труб, СДТ и ЗРА являются наиболее подверженными коррозии, особенно это касается газопроводов, проложенных в земле с высоким уровнем грунтовых вод, обводненных участках и при пересечении водных преград. Возможность повышенной коррозии сварных соединений обусловлена разным составом и структурой металла шва и основного металла трубы в зоне сварки, что при наличии коррозионно-активных агентов (кислорода и воды) могут стимулировать активное образование электрохимическое коррозии и концентрации особо опасных язвенных образований.

После проведение ремонтных мероприятий наступает не менее важный этап подготовки и нанесения изоляции отремонтированных участков. Этот этап незаслуженно отнесен к второстепенным работам в нашем Обществе. Однако, именно качество подготовки и защиты сварных соединений напрямую влияет на срок службы и безопасность эксплуатации газопровода. После выполнения сварки необходимо обеспечить качественное выполнение всего объема работ по подготовке поверхности перед нанесением защитного покрытия на сварное соединение, а также выполнить нанесение в соответствии с технологией.

Выполнение работ по нанесению изолирующего защитного покрытия обеспечивающее качество защиты от проникновения коррозионно-активных агентов, аналогично нанесенной заводской изоляции, в трассовых условиях выполнить технически очень сложно.

Задача по обеспечению противокоррозионной защиты участков сварных соединений является крайне сложной задачей, так как в отличие от заводской изоляции труб, СДТ и ЗРА, изоляция сварных швов может осуществляться только в трассовых условиях. В сложных климатических условиях очень трудно соблюсти все этапы подготовки поверхности сварных соединений и технологию нанесения изоляционного покрытия.

Тема выпускной квалификационной работы "Напыление коррозионностойких покрытий сварных швов магистральных газопроводов" является актуальной, так как обеспечение надежной и безопасной эксплуатации газопроводов является одной из основных задач в энергетической отрасли. Одной из основных проблем, которые возникают при эксплуатации газопроводов, является коррозия металла, особенно в местах сварных соединений, что может привести к аварийным ситуациям.

Современные требования к обеспечению надежности, безопасности и экономичности эксплуатации газопроводов приводят к необходимости учитывать при выборе методов их защиты от коррозии не только стоимость однократного покрытия, но и риски, возникающие из повышенной коррозионной опасности и ответственности объекта.

Целью выпускной квалификационной работы является увеличение срока эксплуатации газопроводов и снижение затрат на их ремонт и обслуживание за счет повышения коррозионной стойкости сварных соединений путем разработки методики и технологического регламента напыления коррозионностойких покрытий на сварные швы магистральных газопроводов. Определить закономерности влияния условий и режимов проведения электродуговой металлизации на свойства образующихся защитных покрытий. Разработать технологические рекомендации по нанесению коррозионностойких покрытий на сварные соединения труб и деталей трубопроводов, исследовать коррозионную стойкость покрытий и внедрить их в производство.

Научная новизна:

Впервые разработана и предложена комбинированная технология повышения коррозионной защиты сварных швов и околошовной зоны магистральных газопроводов.

Технология электродугового напыления является наиболее эффективным способом нанесения коррозионностойких покрытий на сварные соединения газопроводов.

Ранее для антикоррозионной защиты сварных швов газопроводов не проводилась металлизация цинк-алюминием и последующая изоляция сварных соединений термоусаживающими полимерными манжетами.

Установлено, что такой способ обеспечивает более длительную и надежную защиту газопроводов от коррозии.

Данная тема имеет практическое значение для компаний, занимающихся строительством и эксплуатацией газопроводов, так как поможет повысить безопасность и надежность их работы.

1 Общие сведения и понятия о коррозии и защите трубопроводов

1.1 Почвенная коррозия

Коррозию подразделяют на общую, сплошную и местную.

Общая коррозия возникает, когда вся поверхность металла или часть его химически взаимодействует с агрессивной средой. С течением времени поверхность разъедается, и толщина металла соответственно уменьшается.

Наиболее опасной и быстроразвивающейся является межкристаллитная коррозия электрохимического характера.

При межкристаллитной коррозии происходит разрушение металла по границам зерен. Внешне металл не меняется, но связь между зернами значительно ослабевает, и при механической деформации в растянутой зоне образца образуются трещины по границам зерен.

Главным элементом магистрального газопровода является трубопровод. Трубопровод - это металлоконструкция, состоящая из труб, СДТ и ЗРА, соединенных либо разъемными (фланцевыми) и неразъемными (сварными) соединениями.

Трубопроводную арматуру изготавливают согласно государственным стандартам и стандартам предприятий, эксплуатирующих данные объекты. Монтаж осуществляют согласно технологий, разработанных в соответствии с нормами на опасные производственные объекты [9].

Подверженность коррозии, прочность и характеристики упругости газопровода можно определить зная состав металла, из которого он изготовлен. Толщина стенки магистрального газопровода рассчитанного на транспорт газа при давлении до 9,8 МПа определяется по формуле:

$$S = S_p + c_1 + c_2 \quad (1)$$

где S_p – толщина стенки трубы, в зависимости от внутреннего давления;

c_1 – остаточная толщина стенки трубы при наличии коррозии, позволяющая не снижать давление внутри трубы;

c_2 – коэффициент допуска неравномерности стенки трубы при производстве на трубопрокатном заводе, определяется возможным несоответствием реальных и номинальных размеров трубы по техническим условиям.

Общая коррозия подразделяется на различные виды в зависимости от характера возникновения и коррозионных явлений на поверхности либо в структуре металла [1,3].

Равномерная коррозия располагается по всей поверхности изделия и имеет на всех участках одинаковую скорость распространения; неравномерная – соответственно располагается на поверхности участками и распространяется с разной скоростью. Избирательная коррозия приводит к разрушению отдельных компонентов и химических элементов изделия [8].

Условия необходимые для протекания коррозии разделяют по природе ее происхождения и наличию агрессивных окислителей:

- жидкостная коррозия - коррозия образующаяся в жидкой среде; при наличии электролитов (щелочная среда, солевые растворы, кислоты содержащие растворы, соли содержащиеся в морской воде), а также неэлектролитического характера (все возможные масла и жидкости переработки нефтепродуктов органического и неорганического содержания);
- атмосферная коррозия, протекает в воздушной среде при наличии кислорода; это самая распространенный вид коррозии, так как большая часть оборудования и оборудования из металла эксплуатируется при воздействии окружающей среды;

- подземная коррозия – это коррозия при нахождении металлов в почвах и грунтах и обусловлена агрессивностью почвенной среды и наличием влаги; также влияние коррозии увеличивается содержанием в земле кислорода, различных химических соединений и микробов;
- электрокоррозия - это коррозия возникающая при наличии потенциала и движения электрического тока через участок металла;
- коррозия под нагрузкой – это коррозия возникающая при одновременном участии механических напряжений и агрессивной почвенной или атмосферной коррозии.

1.1.1 Опасность почвенной коррозии для магистральных газопроводов

Коррозионная защита трубопроводов напрямую влияет на их долговечность и безаварийную работу. Для этих целей разработаны и применяются два основных вида защиты: «активная» и «пассивная» [11].

«Активная» защита подразумевает под собой использование средств электрохимзащиты (ЭХЗ) с установкой катодных станций на трубопроводе в определенном расстоянии друг от друга.

«Пассивная» защита в свою очередь обеспечивает первичную коррозионную защиту трубопровода, затрудняя доступ к металлу активных соединений воды и кислорода [15].

Все подземные стальные трубопроводы, укладываемые непосредственно в грунт, должны быть защищены в соответствии с ГОСТ 9.602-2005 [10].

Почвенная коррозия – это процесс окисления металла трубопровода в результате химической либо электрохимической реакции с окружающей средой в почво-грунтах.

Чаще всего она имеет электрохимический характер с протеканием электрического тока и высвобождением электронов на анодных участках и переходом к катодным. Особенно это проявляется на протяженных участках

подземных сооружений, где электродный потенциал меняется из-за неоднородности определенных участков и коррозионной среды, с образованием коррозионных пар [14].

Так же очень опасен эффект блуждающих токов в местах пересечения газопроводов с автодорогами, железнодорожными путями и другими участками, где может возникнуть перетекание токов.

Сварные соединения магистральных газопроводов также, как и металлоконструкции, применяемые в других сферах деятельности подвержены коррозионным явлениям, однако есть некоторые отличия:

- химический состав в структуре шва и основном металле различен;
- при прокладке газопровода трудно избежать остаточных напряжений и концентрации напряжений при подвижках грунта;
- статическое и динамическое нагружение при подвижках грунта.

Наиболее опасным для газопровода видом коррозии является появление трещин в местах концентрации напряжений или при растягивании и сжатии при температурных колебаниях (рисунок 2):

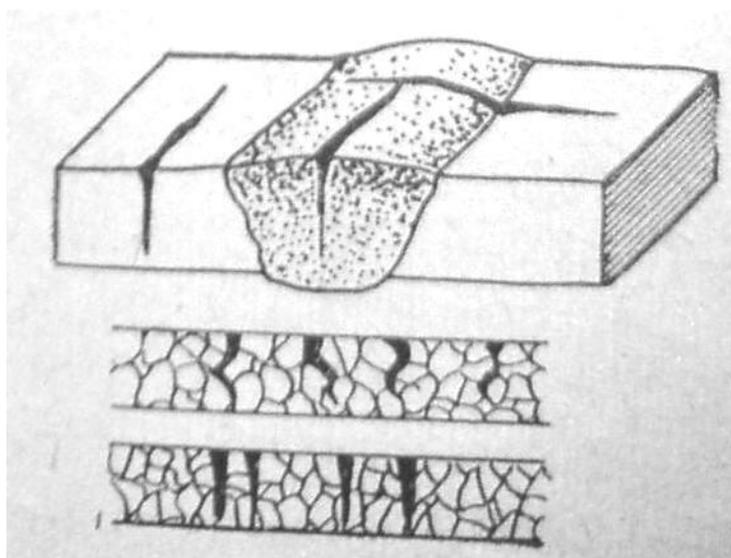


Рисунок 2 – Характер разрушений при коррозионном растрескивании

В Средневолжском линейном производственном управлении магистральных газопроводов, при проведении ВТД на одном из участков газопровода-отвода на ГРС-48 с. Покровка, с пересечением нефтепровода, периодически фиксировалась повышенная коррозионная активность, приводящая к ремонтам газопровода. Оказалось, на этом участке установка катодной защиты у нефтяников была с большим потенциалом и приводила к протеканию токов на газопровод-отвод [1].

Опасность почвенной коррозии характеризуется агрессивностью грунта по отношению к металлу труб и соединительных деталей трубопроводов. Коррозионная агрессивность грунта оценивается по удельному электрическому сопротивлению и измеряется в Ом·м [13].

Агрессивность грунтов подразделяют на низкую, среднюю и высокую.

Таблица 1 – Характеристика коррозионной активности грунта

Коррозионная активность грунта	Электрическое сопротивление грунта, Ом·м	Усредненное влияние катодного тока, А/м ²
Низкая	Больше 50	Меньше 0,05
Средняя	20 - 50	0,05 - 0,20
Высокая	Меньше 20	Больше 0,20

Для противодействия коррозионному влиянию сварных швов газопровода чаще используются традиционные зарекомендовавшие себя способы:

- применение материалов стойких либо не подверженных коррозии;
- использование покрытий, изолирующих доступ агрессивной среды к металлу);
- улучшение свойств и снятие остаточных сварочных напряжений и деформаций.

Измерения по определению опасности почвенной коррозии необходимо проводить, как при проектировании ЭХЗ на вновь вводимых и

реконструируемых газопроводов, так и при обследовании эксплуатируемых газопроводов на которых защита от коррозии с применением ЭХЗ не реализована [12].

1.1.2 Анализ дефектов по результатам отчета ВТД участка МГ «Челябинск-Петровск», Ду 1400, 610-778 км

Участок магистрального газопровода «Челябинск-Петровск» Ду 1400, 610-778 км. протяженностью по одометру 168101 метр Северного ЛПУМГ (610-704 км) и Сергиевского ЛПУМГ (704-778 км).

Год ввода в эксплуатацию: 1980, 2000, 2002, 2004, 2006-2008, 2011. Разрешенное давление составляет 7,4 МПа. Изоляционное покрытие участков: ленточное, полимерное. Заводское полимерное, мастичное полимерное армированное. Толщина стенок 16,5-23,2 мм.

По данным ВТД участок состоит из 15312 трубных секций, из них: 5706 (37,3 %) - одношовные, 9606 (62.7 %) - двухшовные.

Зарегистрировано 20744 аномалий на 7003 трубах, в т.ч.:

- 12579 коррозионных дефектов на 3381 трубной секции глубиной до 37 %, в том числе 4824 дефекта глубиной более 10 % на 1817 трубах, все обнаруженные дефекты внешние;
- 2036 аномалий кольцевого шва на 2008 трубах;
- 4117 аномалий продольного шва на 2635 трубах;
- 1054 технологических дефектов на 770 трубных секциях;
- 706 заводских дефектов на 401 трубной секции;
- 73 вмятины на 68 трубах глубиной до 2,4 %;
- 13 механических повреждений на 7 трубах, глубиной до 16 %;
- 166 прочих дефектов на 149 трубах.

На основании СТО Газпром 2-2.3-1050-2016 «ВТД. Требования к проведению, приемке и использования результатов диагностирования» все выявленные дефекты классифицированы диагностической организацией по степени опасности: [33]:

- 1 дефект (коррозия кольцевого шва длиной 900 мм. на тр.№19997) на 1 трубе имеет категорию А – подлежит наружному обследованию в кратчайшие сроки, газопровод с такими дефектами находится в предаварийном состоянии, рекомендация - замена трубы;
- 186 дефектов (185 аномалии кольцевого шва на 183 трубах, 1 вмятина на 1 трубе имеют категорию В – подлежат наружному обследованию в плановом порядке, данные дефекты могут быть причиной аварии;
- 16133 дефектов на 5223 трубах имеют категорию С – данные аномалии на должны привести к аварии до следующего ВТД и не нуждаются в наружном обследовании;
- 4424 дефекта не идентифицированы подрядной организацией по степени опасности.

Согласно выполненной по СТО Газпром 2-2.3-112-2007 оценке работоспособности труб с коррозионными дефектами следует, что на участке допустимое давление определяется дефектами трубы №19997 и составляет 6,81 Мпа. [28].

Таким образом, участок МГ Челябинск-Петровск 610-778 км находится в неисправном, частично работоспособном состоянии до устранения дефектов, ограничивающих рабочее давление [26].

Проанализировав имеющиеся данные по результатам внутритрубной диагностики, основными дефектами, требующими кратчайшего проведения ремонта, являются коррозия и аномалии кольцевых швов.

Защита сварного шва при проведении текущего и капитального ремонта перед нанесением изоляции является действительно важной задачей в масштабах всей газотранспортной системы страны [27].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить основные способы защиты газопроводов от коррозии, выбрать наиболее подходящий способ напыления защитных металлических покрытий на сварные швы газопроводов;
- определить оптимальный состав покрытий и режимы их нанесения;
- определить параметры процесса электродуговой металлизации, при которых показатели прочности сцепления покрытия с подложкой будут максимальными;
- разработать технологический регламент напыления коррозионностойких покрытий на сварные швы магистральных газопроводов;
- выполнить анализ коррозионностойкого покрытия из цинковых и алюминиевых материалов на основании ранее проведенных опытных испытаний;
- сделать выводы и рекомендации по использованию разработанной методики напыления коррозионностойких покрытий на сварные швы магистральных газопроводов.

1.2 Обзор и анализ методов нанесения коррозионностойких покрытий для защиты сварных соединений газопроводов

1.2.1 Методы получения наружной противокоррозионной защиты современными изоляционными материалами

При строительстве вновь вводимых магистральных газопроводов и также работах по пере укладке и пере изоляции действующих МГ для организации их противокоррозионной защиты применяют различные изолирующие материалы. Применяют битумно-мастичные, ленточные на полимерной основе и современные многослойные полимерные термоусаживающиеся манжеты, а также покрытия заводского нанесения [11].

В трассовых условиях при проведении работ по переизоляции чаще всего останавливают свой выбор на битумно-мастичных и полимерно-ленточных покрытиях. При новом строительстве МГ сейчас применяют трубы, СДТ И ТПА, с нанесенными заводскими покрытиями. Поэтому нанесению защитного покрытия подвергаются только зоны сварных швов. Термоусаживающаяся манжета, при соблюдении всей технологии нанесения, аналогична заводскому многослойному полиэтиленовому покрытию и обладает высокими эксплуатационными свойствами [31].

Покрытие труб в заводских условиях чаще всего выполняется на основе эпоксидных, полипропиленовых или полиэтиленовых составов.

Также применяют покрытия на основе эпоксидных красок и порошковую окраску. Покрытия получают стойкими к электрохимической коррозии и обладают повышенной теплостойкостью и хорошей адгезией к стали. Однако применение этих покрытий ограничено из-за низкой ударной прочностью при минусовых температурах [19].

Самыми перспективными на данный момент являются покрытия труб на основе полипропилена [29].

Если сравнивать заводские полиэтиленовые покрытия труб и полипропиленовые, то последние имеют более высокую теплостойкость, высокую стойкость к деформации и лучше выдерживает механические нагрузки. Основное их применение - это строительство подводных переходов и прокладка газопроводов местах наличия скальных пород и твердого грунта.

Также заводские полипропиленовые покрытия нашли свое применение при организации проколов под дорогами и по методу наклонного бурения [32].

При всех преимуществах этого покрытия главный недостаток не позволяет повсеместно перейти на них. Низкая морозостойкость не позволяет выполнять работы с такими трубами в зимнее время и отрицательных температурах.

Для выполнения работ в любое время года и в условиях вечной мерзлоты для изоляции газопроводных труб в большинстве случаев применяют полиэтиленовые и полиуретановые покрытия, что в значительной степени повлияло в положительную сторону на качество противокоррозионной защиты МГ.

Но до конца не решен вопрос по обеспечению противокоррозионной защиты сварных соединений труб. В данном случае изоляция выполняется исключительно в условиях трассы со всеми вытекающими последствиями.

В условиях агрессивной атмосферной среды и круглогодичном выполнении работ обеспечить выполнение всех этапов подготовки и очистки поверхности и нанесение на него защитного покрытия, свойствам близким к заводскому полиэтиленовому покрытию труб практически невозможно. [38].

До появления современных покрытий на основе полиэтилена для изоляции сварных стыков применялись в основном битумно-мастичные покрытия. Такие покрытия по своим характеристикам и температурному диапазону применения значительно уступали полиэтиленовым покрытиям труб и имели недостаточно высокую адгезию в местах нахлеста на заводское покрытие.

В настоящее время для работ по изоляции сварных стыков газопроводов успешно применяются защитных покрытий на основе термоусаживающихся полимерных лент. В основе конструкции термоусаживающейся ленты лежит адгезионный подслои, который получают, используя термоплавкую полимерную композицию, а также наружный защитный слой, выполненный по технологии сшитого и ориентированного в продольном направлении полиэтилена [6].

Сейчас можно сказать о том, что уровень противокоррозионной защиты сварных стыков газопроводов находится на достаточно высоком уровне. Однако, показатели адгезии термоусаживающихся полимерных лент к защищаемому покрытию трубы и к заводскому покрытию значительно

уступают нанесенному покрытию, выполненному на заводе. Низкая прочность при возможном ударе в случае засыпки газопровода неподходящим грунтом, низкая стойкость к сдвигу. При всех положительных качествах термоусаживающихся полимерных лент они все же уступают покрытиям, выполненным в заводских условиях на заводе.

Только в стационарных заводских условиях можно выполнить качественную подготовку поверхности труб: очистку, удаление влаги, получение необходимой шероховатости и подогрев. Выполнить все этапы нанесения защитного покрытия по рекомендованной технологии, применяя оборудование и материалы, использование которых при изоляции газопроводов трассовых условиях невозможно.

Накопленная статистика указывает на то, что зона сварного соединения наиболее уязвима для почвенной коррозии при прокладке газопровода в обводненных, а, следовательно, электролитических активных грунтах.

Выполнение работ по изоляции зоны сварных стыков выполняется либо перед опусканием трубы в траншею, либо же выполняется прямо в траншее, при этом работа должна быть выполнена при любых погодных условиях и должна обеспечить качество аналогичное заводскому покрытию.

На заводе весь объем работ по нанесению изоляции автоматизирован, а в условиях трассы изоляция производят в основном вручную. При ручном нанесении на первый план выходит человеческий фактор и качество защиты сварных стыков в большей степени связано с ответственным подходом и в строгом соответствии с технологическими операциями, рекомендованными заводом-изготовителем изоляционных материалов.

В случае проникновения к поверхности сварных стыков труб кислорода и грунтовых вод с растворенными минералами и бактериями, то это может способствовать образованию микрोगальванических пар образованию потенциала между трубой и землей. Блуждающие токи могут

привести к коррозии электрохимического характера и самому опасному и быстро распространяемому виду дефектов – язвенной коррозии.

1.2.2 Методы нанесения защитных металлических коррозионностойких покрытий

Покрытия разделяют на основе требований, которые предъявляются к эксплуатационным характеристикам изделий:

- покрытия для защиты от коррозии при различных условиях эксплуатации;
- защитно-декоративные покрытия, выполняют функцию защиты от коррозии и декоративную отделку;
- специальные покрытия, применение которых обусловлено созданию на поверхности изделий каких-либо специальных свойств, в том числе и восстановление деталей.

Для нанесения защитных металлических коррозионностойких покрытий наиболее часто применяются следующие способы:

- холодный способ нанесения;
- горячий способ нанесения;
- холодное газодинамическое напыление;
- газопламенное и плазменное нанесение;
- электродуговая металлизация.

1.2.3 Холодный способ нанесения защитного покрытия

Способ нанесения защитного покрытия в виде лакокрасочных материалов является самым простым и дешевым. По структуре ЛКМ бывают жидкими или порошкообразными. Нанесение происходит на заранее подготовленную поверхность металла. После высыхания образуется защитное покрытие. Самым распространенным, получившем народное признание и известная многим поколениям «серебрянка» по-прежнему остается лидером среди защитных составов. Если все сделано правильно, соблюдены пропорции алюминиевой пудры и связующей основы (олиф или

лак), то ваш забор или гараж надолго получат защиту от негативного влияния окружающей среды.

На практике добиться сплошности изоляционного покрытия не удается таким способом, также оно не обладает достаточной адгезией к металлу и имеет низкую механическую прочность [7].

Данный способ защиты от коррозии прекрасно подходит для бытового применения. На опасных производственных объектах применим для защиты от коррозии наружных трубопроводов, обвязки газораспределительных станций и газопроводов низкого давления. При прокладке магистральных газопроводов не применяется, так как не обеспечивает уровень защиты, достаточный для безопасной эксплуатации газопровода на проектный срок службы.

1.2.4 Горячий способ нанесения защитного покрытия

Горячий способ основан на процессе нанесения расплавленного металла на изделие. Рассмотрим его на примере горячего оцинкования. Технологический процесс заключается в следующем: стальную заготовку очищают механическим способом либо химическими реагентами (растворы щелочей и кислот) и удаляют их с поверхности.

После очистки заготовку окунают в ванну с расплавленным цинком. Постепенно расплавленный цинк взаимодействует со сталью и образует на поверхности слой сплавов цинка и железа.

Поверхностный слой состоит из Zn/Fe-матрицы и большую часть занимают молекулы железа. Цинка в поверхностном слое содержится не более 40 % [7].

Размеры изделий для горячего оцинкования зависят от размеров используемых ванн. Чем больших размеров ванна, тем большие энергозатраты необходимы для поддержания цинка в расплавленном состоянии. Также метод экологически не безопасен и образует большое количество отходов и подразумевает особые требования к технике безопасности проведения работ.

Основным недостатком применения данной технологии является невозможность использования в трассовых условиях и ограничения по габаритам защищаемых заготовок.

1.2.5 Холодное газодинамическое напыление

Технологический процесс нанесения частиц сверхзвуковым потоком газа без плавления. При взаимном ударе частиц металла происходит пластическая деформация и кинетическая энергия частиц переходит в тепловую, способствуя образованию тонкого слоя покрытия. Позволяет наносить покрытие из металлов, сплавов и смесей металлов с керамикой без изменения фазового состава исходных материалов. Процесс схож с операцией пескоструйной обработки, но с обратным эффектом. При этом хорошее покрытие образуется, применяя металлы с низким пределом прочности: медь, цинк, алюминий.

Присадочные материалы же, имеющие в своем составе железо, никель или тугоплавкие материалы для образования хорошего покрытия требовали большей кинетической энергии, а, следовательно, большей скорости газового потока и введения порошков наносимого металла с размером частиц от 1 до 50 мкм [30].

Это прекрасный способ придания заготовкам необходимых свойств и нанесения защитных покрытий, наносится практически на любые поверхности и восстанавливает изношенные детали машин. Однако производительность оборудования недостаточна для обработки больших по площади поверхностей.

1.2.6 Газопламенное и плазменное нанесение защитного покрытия

Методы газопламенного напыления и плазменного напыления входят в группу методов газотермического напыления, так как имеет схожий процесс образования газовой струи с расплавленным металлом. Распыление расплавленных металлов осуществляется сжатым воздухом. При газопламенном напылении плавление металла происходит при сгорании

рабочих газов ацетилена, пропана, водорода, а в случае с плазменным методом плавление происходит в потоке плазменной дуги в рабочих инертных газах [3].

Расплавленные капли наносимого материала, вылетая из сопла горелки, под действием давления транспортирующего газа приобретает скорость, с которой ударяется об поверхность. Расплавленные капли вступают во взаимодействие с материалом основы, они деформируются, в результате чего увеличивается их площадь контакта с поверхностью.

Оба способа отчасти мобильны и поддаются, в том числе процессу автоматизации, так как присадочным материалом является проволока, прутки или порошок. Однако установка плазменной диффузионной металлизации - это сложный комплекс, включающий в себя большое количество комплектующих и необходимость охлаждения плазматрона.

Комплект для газопламенного напыления состоит из пистолета-распылителя, подающих механизмов, пульта управления, воздушного компрессора, фильтра-осушителя и баллонов с редукторами давления со сжатыми газами.

Основные преимущества данного способа нанесения – это однородность покрытия, напыляемый слой отличается более плотной структурой с минимальным количеством пор, прочность сцепления, а за счет давления потока и напыляемых частиц требования к подготовке поверхности перед нанесением снижены.

Данные методы нашли широкое применение в трубной промышленности в камерах напыления трубопрокатных станков, для восстановления изношенных деталей транспортных средств, сельскохозяйственных машин и технологического оборудования.

1.2.7 Электродуговая металлизация

Расплавление электрической дугой металла и распыление сжатым воздухом на предварительно подготовленную поверхность изделия называется электродуговой металлизацией (далее ЭДМ). В основе способа

лежит процесс сгорания двух присадочных электропроводных проволок, между которыми горит электрическая дуга, и распыление воздухом частиц металла. На рисунке 2 приведена принципиальная схема металлизатора.

Размеры частиц металла варьируются в пределах 10 – 50 мкм, а толщину нанесенного слоя можно получить в больших пределах. По стоимости получаемого покрытия электродуговая металлизация значительно дешевле других покрытий, например, процесс газотермического напыления.



Рисунок 2 - Схема работы металлизатора

Процесс нанесения методом электродуговой металлизации заключается в послойном нанесении расплавленных частиц на подготовленную и нагретую поверхность изделия металла малой толщины. Сопло металлизатора электродуговой металлизации распыляет частицы расплавленного металла, образовавшиеся при сгорании проволок, и направляет это облако к детали с использованием потока воздуха высокого давления. Частицы металла, ударяясь о поверхность изделия деформируются, образуя плотное покрытие, которое придает изделию свойства распыляемого металла [4].

Главным недостатком можно назвать чрезмерный нагрев и окисление напыляемого материала, а также сгорание в электрической дуге легирующих элементов в присадочной проволоке.

Основное достоинство электродугового напыления — это очень высокая производительность напыления, стойкость покрытия к истиранию и отслаиванию, а также простота самого процесса напыления и относительная дешевизна используемого оборудования.

Электродуговая металлизация имеет максимальный КПД из всех существующих способов напыления.

Использование современных источников тока позволило получить стабильный дуговой разряд и улучшить стабильность горения дуги и улучшить характеристики напыленных покрытий. Стабильность горения дуги напрямую влияет на отсутствие разрывов цепи, хорошее регулирование процесса металлизации без коротких замыканий [2].

Область сгорания токопроводящих проволок при электродуговой металлизации получило название косвенная электрическая дуга. При этом капли расплавленного металла в области сгорания проволок направляются к детали потоком воздуха или газа под высоким давлением. Подающие механизмы, состоящие из двух пар роликов, по мере плавления проволок, подают в зону горения косвенной дуги проволоку из катушек (Рисунок 3):

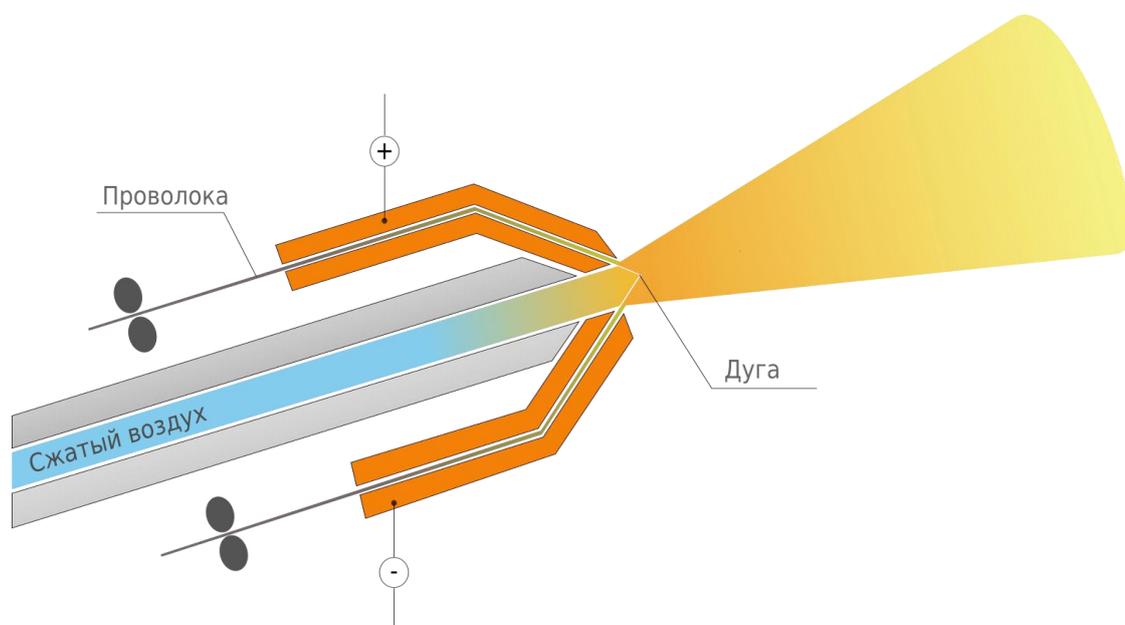


Рисунок 3 – Принципиальная схема электродуговой металлизации

Контроль и регулирование процесс электродуговой металлизации осуществляется довольно легко и основными параметрами здесь являются, скорость подачи проволоки, напряжение и ток сварочной дуги.

Процесс плавления в электрической дуге происходит с высокой скоростью и при высокой температуре и при этом в зоне сгорания проволок происходят следующие явления:

- горение дуги между проволоками и их совместное плавление;
- происходит разрыв электрической цепи между электродами;
- короткое замыкание дуги и снова плавление электродов;
- повторный разряд между концами проволок, разжигающий новую дугу.

Отсюда можем видеть, что плавление проволок происходит в момент горения дуги и короткого замыкания. Когда происходит разрыв электрической цепи между двух проволок, то плавление их не происходит. Каждый цикл по длительности его появления оставляет доли секунды.

Горение дуги при котором происходит расплавление проволок занимает по длительности примерно половину времени всех явлений.

Температура расплавленного металла проволок отличается при различных циклах и наибольшей она будет в моменте горения дуги.

При максимальной температуре расплавленного металла в облаке образуется максимальное число мелкодисперсных частиц. Соответственно при цикле короткого замыкания температура плавления будет ниже, а, следовательно, и частицы будут иметь больший размер.

Главные факторы, оказывающие влияние на структуру и свойства получаемого покрытия — это скорость полета частиц, их масса и размеры, а также температура при которой происходит столкновение с подложкой.

Для настройки режимов электродуговой металлизации выполняют регулировку соотношения силы тока электрической дуги и скорости подачи проволок, тем самым оказывая влияние на расплавление и постоянство длины дуги. Обязательно контролируют расстояние от сопла металлатора до обрабатываемой поверхности и обычно оно составляет 120-180 мм.

Соединение расплавленного металла с основным металлом происходит за счет механического соударения с подложкой и процесса диффузии между молекулами.

Температура обрабатываемой поверхности при электродуговой металлизации нагревается примерно до 120° С и более за счет передачи энергии расплавленного металла к подложке и переходу кинетической энергии молекул. Относительно не высокая температура не изменяет структуру обрабатываемого металла и не приводит к его деформации.

В рассмотрение не брались иные способы нанесения защитных покрытий такие как диффузионный (легирование), плакирование (термомеханический), гальванический и др., по причине невозможность какого-либо применения на магистральных газопроводах в трассовых условиях.

1.3 Анализ наиболее применимых методов и оборудования нанесения защитных металлических коррозионностойких покрытий на сварные соединения магистрального газопровода

1.3.1 Обоснование необходимости защиты сварного соединения после сварки

При соединении в плетть труб, а также при монтаже элементов трубопроводов согласно технологии сварки по СТО Газпром 2-2.2-136-2007, заводская изоляция должна быть удалена от торцов труб на расстояние 300 мм. Соответственно после сварки остается не заизолированный участок шириной 600 мм. Его необходимо защитить, не повредив имеющуюся рядом заводскую изоляцию.

Задача является сложной, так как выполняется в условия трассы и различных погодных условиях. Соответственно технологии и оборудование должны отвечать определенным условиям:

- обеспечить мобильность;
- выполнение работ в любых погодных условиях и температурах;
- обладать высокой скоростью нанесения;
- адекватность затрат и себестоимость;
- обеспечивать надежную защиту от коррозии;
- не изменять основной состав трубы и структуры металла;
- не оказывать термического воздействия на сварное соединение и заводскую изоляцию.

Этим требованиям удовлетворяют два метода рассмотренных нами: газопламенное нанесение защитного покрытия и электродуговая металлизация.

Далее постараемся оценить их основные характеристики, возможности, недостатки и на основе анализа создадим технологию и перспективность применения на сварном соединении магистрального газопровода.

Выбор оборудования и технологии обусловлен возможностью применения его в трассовых условиях. Из рассмотренных выше для нас применимы методы холодного газопламенного нанесения и электродуговая металлизация.

Для определения наиболее подходящего метода защиты сварных соединений сравним характеристики разработанного на данный момент оборудования.

При выборе оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение в трассовых условиях следует учитывать ряд факторов:

- требования к качеству покрытия. Коррозионностойкие покрытия должны обеспечивать высокую защиту от агрессивных воздействий окружающей среды, сохранять свои свойства в течение длительного периода эксплуатации и не оказывать негативного влияния на сварное соединение.
- особенности конструкции сварного соединения. В зависимости от конструктивных особенностей сварного соединения могут потребоваться различные методы нанесения покрытий, например, для защиты сложных поверхностей СДТ и ТПА должно применяться распыление покрытия.
- требования к скорости выполнения работ. В трассовых условиях часто требуется быстрое нанесение покрытий для минимизации времени простоя оборудования.
- необходимость соблюдения экологических требований. При выборе технологии нанесения покрытий следует учитывать не только их свойства, но и возможность их применения без нарушения экологических норм.

Исходя из этих факторов, можно рекомендовать использование следующих оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение в трассовых условиях:

- термическое распыление порошковых материалов и проволок сплошного сечения. Эта технология газопламенного напыления позволяет быстро и качественно наносить покрытия на сложные поверхности и обеспечивает высокую адгезию покрытий к основанию. Для данной технологии потребуется специальное оборудование - термический распылитель, баллоны с горючим газом, подающие механизмы;
- электродуговая металлизация. Эта технология позволяет наносить коррозионностойкие покрытия на детали сложной формы. Она также экологически безопасна и не требует высоких затрат на оборудование. В качестве распыляемого материала для данной технологии используется проволока в бухтах, что улучшает мобильность оборудования, уменьшает его габариты и позволяет выполнять напыление во всех пространственных положениях.

Таким образом, выбор оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение должен основываться на требованиях к качеству покрытия, особенностях конструкции сварного соединения, скорости выполнения работ и соблюдении экологических требований.

Имеющиеся российские образцы оборудования газопламенного нанесения и электродуговой металлизации выпускаются такими компаниями как ООО «БАМЗ», ООО «ТСЗП», ООО «Технологические системы защитных покрытий», «Элмид-Техно», «Свартех», АО «Плакарт», ООО «МС ТЕХНОЛОДЖИ», а также компанией ОДО «Тена» в Республике Беларусь. Если быть предельно честным, то не один производитель в России не производит комплексы газопламенного оборудования в полном объеме. Стандартный комплекс формируется из имеющихся на рынке комплектующих, либо дополняется отсутствующими собственными элементами оборудования. Чаще всего собственной разработкой является блок сопряжения устройства и пульт управления.

1.3.2 Оборудование газопламенного нанесения защитного покрытия

Комплексы газопламенного напыления предназначена для распыления металлов в виде проволок и порошков с целью придания изделиям антикоррозионных свойств, для ремонта изношенных поверхностей и придания изделиям улучшенных эксплуатационных свойств.

Установки используют для распыления тугоплавких и легкоплавких проволок металлов с целью нанесения покрытий для восстановления посадочных мест, пастели, опорные места подшипников качения и т.п.

Напыление может осуществляться как стационарно в цеху, так и в полевых условиях (при наличии дизельного компрессора). Для обеспечения работы установки необходимо наличие воздуха (рабочее давление 0,6 МПа, производительность 90 м³/ч), пропан (ацетилен) и кислород.

1.3.3 Оборудование электродуговой металлизации

Работа установки заключается на подаче двух электропроводных проволок, их расплавление в электрической дуге и перенос с высокой скоростью на изделие потоком сжатого воздуха. Покрытие формируется при соударении расплавленных частиц о поверхность изделия и затвердевании частиц металла к на защищаемой детали.

Чаще всего для нанесения покрытий применяют проволоки диаметром 1,6-2,0 мм.

Установка позволяет наносить антикоррозионные, восстановительные, упрочняющие, износостойкие и другие покрытия. Покрытия имеют толщину 80-200 мкм. При необходимости толщину наносимого покрытия можно увеличить.

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

Установка представляет собой модульную систему, в которую входит - мобильный источник тока мощностью до 500 А с жёсткой характеристикой;

- пульт управления источником тока с размоточным устройством, электромеханическим устройством подачи проволоки и блоком подготовки воздуха;
- пистолет (металлизатор);
- пакет кабелей и шлангов.

Отдельно вынесенный пульт управления с размоточным устройством, блоком подготовки воздуха позволяет производить работы на большем расстоянии.

1.4 Обоснование выбора оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение в трассовых условиях

1.4.1 Требования к мобильности оборудования

К выполнению работ по напылению защитного покрытия на сварной шов при прокладке и ремонте магистральных трубопроводов предъявляются особые требования к технологии и необходимому оборудованию.

Работы ведутся в любое время года с широким температурным диапазоном и погодными условиями, с возможностью выпадения осадков.

Основными требованиями в данном случае являются применение технологии и оборудования обеспечивающих мобильность и надежную эксплуатацию в трассовых условиях, заданные характеристики при подключении к мобильным генераторным установкам, безопасность выполнения работ в замкнутых пространствах, котлованах и траншеях.

В аппарате электродуговой металлизации в качестве первичного распыляемого металла выступает проволока в бухтах, ее значительно удобнее применять в трассовых условиях чем порошковые металлы, засыпаемые в бункер газопламенных устройств.

На данный момент большинство строительных организаций занятые в монтаже и ремонте магистральных трубопроводов повсеместно стараются уходить от применения в работе взрыва-пожароопасных газов. Отдавая предпочтение для работ по разделительной резке и демонтажа труб методам, использующим энергию, получаемую от преобразования электрического тока, например, установки плазменно-дуговой резки.

При выборе оборудования для нанесения защитных покрытий следует учитывать потребляемую мощность установки и стабильность питающей сети. Получение электрической энергии с использованием передвижных дизель-генераторов для работы оборудования является наиболее удобным способом питания в трассовых условиях.

Наиболее оптимальным вариантом отвечающим всем требованиям по мобильности является оборудование по методу электродуговой металлизации.

1.4.2 Требования по безопасности и надежности эксплуатации оборудования

Для возможности применения технологии электродуговой металлизации на опасных производственных объектах, должно быть обеспечено:

- соответствие требованиям безопасности и надежности, установленным в государственных стандартах и нормативных документах;
- все элементы оборудования (источники тока, подающие механизмы, клапаны, редукторы, распылители и т.д.) должны быть изготовлены из материалов, устойчивых к коррозии и агрессивным средам, а также иметь климатическое исполнение для работ в климатических зонах умеренного и холодного климата на открытом воздухе и класс защиты от поражения электрическим током при работе во влажной среде;
- имеется средства автоматического контроля и регулирования, либо показывающие устройства, параметров нанесения покрытий (температура,

давление, скорость движения и т.д.), чтобы обеспечить равномерность и качество нанесения покрытий;

- эффективная система очистки поверхности перед нанесением покрытий, чтобы устранить загрязнения и ржавчину;

- при нанесении покрытий должны привлекаться только обученные, квалифицированные специалисты, прошедшие сертификацию на право выполнения данных работ в соответствии с требованиями безопасности и надежности;

- при использовании оборудования необходимо проводить проверку на соответствие требованиям безопасности и проводить ежедневный контроль за его работой;

- эксплуатирующий персонал должен быть укомплектован средствами контроля за качеством покрытий, чтобы исключить возможность дефектов и повреждений.

Таким образом оборудование, применяемое для работ повышенной опасности на объектах подконтрольных Ростехнадзору, должно обеспечивать безопасность его применения, соответствовать государственным стандартам и нормативным документам и изготовлено с возможностью применения в трассовых условиях.

1.4.3 Выбор наиболее подходящей технологии и оборудования для защиты сварных швов и околошовной зоны МГ

При выборе оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение в трассовых условиях следует учитывать ряд факторов:

- требования к качеству покрытия. Коррозионностойкие покрытия должны обеспечивать высокую защиту от агрессивных воздействий окружающей среды, сохранять свои свойства в течение длительного периода эксплуатации и не оказывать негативного влияния на сварное соединение;

- особенности конструкции сварного соединения. В зависимости от конструктивных особенностей сварного соединения могут потребоваться различные методы нанесения покрытий, например, для защиты сложных поверхностей может применяться напыляемые покрытия;
- требования к скорости выполнения работ. В трассовых условиях часто требуется выполнять ремонтные работы в строго ограниченное время, поэтому, оборудование должно обеспечить быстрое нанесение покрытий для минимизации времени простоя газопровода;
- необходимость соблюдения экологических требований. При выборе технологии нанесения покрытий следует учитывать не только их свойства, но и возможность их применения без нарушения экологических норм.

Таким образом, выбор оборудования и технологии нанесения коррозионностойких покрытий на сварное соединение должен основываться на требованиях к качеству покрытия, особенностях конструкции сварного соединения, скорости выполнения работ и соблюдении экологических требований.

Неоспоримым преимуществом способа электродуговой металлизации является его высокая производительность, что очень важно при ограниченном времени выполнения работ при выводе магистрального газопровода в ремонт. Согласно документации, на оборудование электродуговой металлизации, при силе тока 145 А, производительность напыления алюминий-цинкового покрытия составит 36 кг/ч, что в несколько раз превосходит производительность методов газопламенного напыления.

Применение электродуговой металлизации позволяет получать более прочные покрытия, имеющие лучшую адгезию с основой чем при способе газопламенного напыления.

Оборудование для электродуговой металлизации позволяет выполнять работы на открытом воздухе в трассовых условиях и в меньшей степени подвержено воздействию окружающей среды. Надежность и простота обслуживания присущи данному оборудованию.

Материалы, используемые для проведения работ удобны для транспортировки, хранения в местах дислокации оборудования. Присадочный материал в виде проволоки сплошного сечения позволяет произвести быструю замену в подающем механизме и продолжить выполнение работ.

При использовании проволок из различных металлов можно получить комбинацию необходимых свойств покрытия из их сплава.

Эксплуатация электрометаллизатора и расходные материалы для его обслуживания сравнительно небольшие. Отсутствие взрывопожарных газов обеспечивает большую безопасность его применения.

Исходя из вышеописанного, можно рекомендовать, как наиболее удовлетворяющей всем требованиям и заявляемым характеристикам, технологию и оборудование напыления коррозионностойких покрытий методом электродуговой металлизации.

2 Разработка комплексной технологии нанесения коррозионностойких покрытий кольцевых швов магистральных газопроводов

2.1 Анализ и выбор присадочных материалов для напыления на сварное соединение методом электродуговой металлизации

Способ электродуговой металлизации на сегодняшний день является одним из наиболее распространенных способов нанесения защитных покрытий на сварные соединения. Для эффективного применения этого метода необходимо использование специальных присадочных материалов, которые обеспечивают высокую адгезию с основным металлом, защиту от коррозии и износа.

Одним из самых популярных присадочных материалов для электродуговой металлизации является проволока сплошного сечения, либо порошковая проволока.

Главными требованиями к проволоке электродуговой металлизации являются:

- очистка до степени Sa 3,0;
- стабильный химический состав;
- отклонения диаметра проволоки, не выходящие за минусовой допуск;
- отсутствие дефектов на поверхности проволоки и низкая шероховатость.

Для оборудования электродуговой металлизации качество материала для напыления напрямую влияет на качество его работы. Для получения постоянно высокого качества покрытия необходимо применять проволоки постоянным диаметром и химическим составом.

2.1.1 Характеристики защищаемых поверхностей для нанесения коррозионностойкого покрытия

Правильный выбор материала для напыления является важным этапом для получения качественного покрытия и долговечности сварного соединения. При выборе материала необходимо учитывать химический состав основного металла, условия эксплуатации изделия, требования к коррозионной стойкости и многие другие факторы.

Для выбора подходящего состава наносимого материала необходимо определить сортамент трубной продукции, применяемой в сооружении газотранспортной системы. Определить химический состав стали, ее показатели, эксплуатационные характеристики в зависимости от условий эксплуатации.

Основная часть МГ проложена трубами диаметром 1420 мм, класса прочности К60 и стали 09Г2С по ГОСТ 20295-85. Применяемые трубы для вновь вводимых газопроводов согласно СТО Газпром 2-2.2-136-2007 изготавливают согласно ГОСТ Р 52079-2003 «Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов».

Таблица 2 - Показатели используемых труб МГ 1420 мм

Показатель	Значение
Рабочее давление	От 1,2 до 8,2 МПа
Класс прочности	До К60
Эквивалент углерода	Не более 0,46 %
Предел текучести	До 480 МПа
Материал	09Г2С
Минимально допустимая температура	- 60 °С
Расчетный срок службы	30 лет

Также необходимо определить характеристики наплавляемого металла шва в зависимости от способа сварки. Основную часть сварочных работ при прокладке нового газопровода выполняют механизированным

способом с применением самозащитных порошковых проволок. В рассмотрение возьмем пользующаяся большой популярностью у подрядных организаций самозащитную порошковую проволоку Innershield NR-232. В стандарте AWS A5.20-95 на этой присадочный материал приведены требования к химическому составу наплавленного металла для всех слоев шва. Проволока Innershield NR-232 должна обеспечивать химический состав и количественное значение наплавленного металла согласно таблице 3.

Таблица 3 - Состав наплавленного металла (% по массе) самозащитной порошковой проволоки по классификации E70T-1C/MJH8

Показатель	Значение
Углерод	0,18
Марганец	0,65
Кремний	0,27
Фосфор	0,006
Сера	0,004
Алюминий	0,55

2.1.2 Выбор наиболее подходящего состава материала защитного покрытия

Подбор материала для нанесения покрытия обеспечивает получение необходимых свойств и параметров эксплуатации изделия. Хром, никель, цинк и алюминий, являются наиболее распространенными материалами, которые используют в методах напыления коррозионностойких покрытий.

Цинк относится к группе активных элементов. Он располагается в ряду напряжения металлов левее железа, имеет более отрицательных электродный потенциал.

Цинк – металл при комнатной температуре имеет определенную твердость, но становится пластичным при 100-150 °С. Если нагреть до температуры свыше 210°С может начать деформироваться. Плавится при низкой температуре, несвойственной для металлов. Он имеет хорошую электропроводность.

Будучи нанесенным стальное изделие цинк защищает ее от коррозии, но при этом важным здесь является целостность цинковой пленки на поверхности. Физические свойства цинка показаны в таблице 4.

Таблица 4 - Физические свойства цинка

Показатель	Значение
Плотность	7,133 г/см ³
Теплопроводность	116 Вт/(м·К)
Температура плавления	419,6 °С
Температура кипения	906,2 °С
Удельная теплота испарения	114,8 кДж/моль
Удельная теплота плавления	7,28 кДж/моль
Предел прочности при растяжении	300–450 МПа

Покрытые цинком изделия обладают высокой стойкостью к воздействию соленой воды и электролитов в почве. Однако такое покрытие корродирует на объектах промышленности, где возможны контакты с окислами серы, хлора и парам сильных кислот. Эти вещества при контакте с цинком разрушают его покрытие, образуя гигроскопические соединения.

Алюминий является химически активным металлом, однако при наличии окислителей образует защитную пленку и резко понижает свою активность. Защитные свойства алюминиевых покрытий обусловлены образованием стойкой и сплошной пленки из оксида алюминия на его поверхности. Его оксидная пленка обладает стойкостью к атмосферной коррозии, морской и пресной воде, практически не вступает во взаимодействия с органическими кислотами, концентрированной или разбавленной азотной кислотой.

Если разрушить оксидную плёнку, алюминий выступает как активный металл-восстановитель. В мелкораздробленном состоянии и при высокой температуре металл взаимодействует с кислородом. Металл алюминий характеризуется высокой электропроводностью, теплопроводностью, стойкостью к коррозии и морозу, пластичностью. Алюминий имеет очень отрицательный потенциал -1,66 В. Обладает высокой удельной

теплоёмкостью и теплотой плавления. Эти показатели значительно больше, чем у большинства металлов. Физические свойства алюминия показаны в таблице 5.

Таблица 5 - Физические свойства алюминия

Показатель	Значение
Плотность	2,698 г/см ³
Теплопроводность	116 Вт/(м·К)
Температура плавления	660,0 °С
Температура кипения	2518,82 °С
Удельная теплота испарения	284,1 кДж/моль
Удельная теплота плавления	10,75 кДж/моль
Предел прочности при растяжении	100-150 МПа

Хром активный металл и также, как и алюминий очень склонен к пассивированию. Важной особенностью хрома является его способность к окислению. Образование оксидной пленки на его поверхности происходит как под действием окислителей, так и с участием кислорода, содержащегося в воде.

Никель в ряду напряжений находится левее всех рассмотренных до этих элементов. Никель очень пассивный металл. Пассивированная пленка на его поверхности так же достаточно устойчива к разрушению в растворах щелочей любой концентрации. Его применяют в основном для придания защитно-декоративных свойств изделиям из железа и стали путем гальванического покрытия.

Защита металла обрабатываемого изделия строится по катодному механизму. Качество сформированного покрытия зависит от его минимальной пористости.

Задачу по формированию защитного покрытия на поверхности сварных соединений труб, а также с точки зрения экономической целесообразности наиболее рационально использовать покрытия, образованные из проволок на основе цинка, никеля и алюминия. В таблице 6 показаны области применения металлов и их сплавов.

Таблица 6 - Материал проволоки и область ее применения

Материал проволоки	Назначение и свойства
AlMg5	Применяют для обработки металлоконструкций от коррозии и создания протекторной защиты
NiAl	Применяется для изолирующих противокоррозионных покрытий, а также для создания адгезионного подслоя
Zn	Для образования стойких к атмосферной коррозии и коррозии в жидкостях покрытий
Al	Для создания антикоррозионных покрытий
Zn85/Al15	Для создания антикоррозионных покрытий и защиты от блуждающих токов

Для получения определенного комплекса защитных свойств, данные металлы смешиваются в любом процентном соотношении и применять проволоки различного сечения, а также путем регулирования скорости ее вылета.

2.1.3 Условия для проведения работ и свойства материала покрытия

Оптимизация химического состава и свойств материала покрытия для электродуговой металлизации является важным аспектом процесса, который влияет на качество и долговечность покрытия. Ниже описаны основные факторы, которые следует учитывать при оптимизации химического состава и свойств материала покрытия.

1. Химический состав материала покрытия. Он должен быть подобран таким образом, чтобы обеспечить желаемые свойства покрытия: прочность, коррозионную стойкость, твердость и др. Кроме того, должно быть учтено соответствие химического состава материала покрытия с основным материалом, на который будет нанесено покрытие.

2. Размер зерна материала покрытия. Он должен быть оптимальным, чтобы обеспечить равномерность и плотность нанесенного покрытия.

3. Температура процесса. Она должна быть подобрана таким образом, чтобы обеспечить оптимальные условия для нанесения покрытия и получения желаемых свойств.

4. Скорость нанесения покрытия. Она должна быть оптимальной, чтобы обеспечить равномерность и плотность нанесенного покрытия.

В целом, оптимизация химического состава и свойств материала покрытия для электродуговой металлизации требует комплексного подхода и учета множества факторов, связанных с процессом нанесения покрытия и желаемыми свойствами покрытия.

Для осуществления выбранного в работе метода и основы выбранных материалов для электродуговой металлизации, был проведен подбор наиболее оптимальных по физико-химическим, технологическим и экономическим свойствам проволок сплошного сечения, поставляемых и совместимых с подающими механизмами для электродуговой металлизации.

Катушки проволоки для электродуговой металлизации согласно ГОСТ 25445-82 устанавливаются диаметром 300 мм.

Проволока должна обладать следующими характеристиками:

- равномерная толщина проволоки;
- достаточная жесткость;
- обеспечить равномерное горение.

Качественно изготовленная проволока не застревает в пистолете металлизатора, не сминается протяжными роликами, имеет минимальный процент пыления и легкое разжигание пламени.

Для создания протекторных коррозионностойких металлизационных покрытий используем проволоку из цинка и алюминия диаметром 2,0 мм. Наиболее стойкое и надежное защитное покрытие достигается за счет применения цинка/алюминия в процентном соотношении 85/15.

Алюминий выполняет функцию инертного покрытия, тем самым создает необходимую нам пассивную защиту для стали. Различные комбинации по массовому содержанию алюминия в сплавах проволок показали, что увеличение его до 20-25% в сочетании с цинком ведет себя как чисто алюминиевое покрытие [8].

Катодная защита чисто цинкового покрытия недостаточно сильная, чтобы препятствовать коррозии стали. Цинк-алюминиевая проволока Zn85/Al15 для электродуговой металлизации является оптимальным по качеству покрытия и его стоимости. При напылении образуется равномерно распределенная структура покрытия, состоящее из цинкового покрытия, которое усилено плетением из более инертного алюминия.

Получаемое покрытие является двухфазным и обеспечивает более плотное покрытие, чем чистый цинк или чистый алюминий. Из-за разницы в плотности металлов толщина покрытия при использовании проволоки Zn85/Al15 по сравнению с чистым цинком увеличивается на 22% [54].

Покрытие имеет очень мелкие поры и, следовательно, быстрое естественное уплотнение, высокий электрохимический потенциал, а значит и постоянную катодную защиту. Алюминий замедляет растворение цинка и увеличивает тем самым продолжительность защиты.

Для обеспечения тех же физико-технологических характеристик и коррозионной защиты требуется меньшая толщина покрытия, чем в случае напыления чистого цинка или алюминия.

Цинк-алюминиевая проволока Zn85/Al15 обеспечивает хорошую коррозионную защиту в условиях агрессивной среды.

Присадочные материалы играют важную роль в процессе электродуговой металлизации и являются одним из ключевых элементов в создании качественных защитных покрытий на сварных соединениях [14].

2.2 Подготовка поверхности сварного шва и околошовной зоны перед напылением

Качественная подготовка металлической поверхности перед нанесением покрытия электродуговым металлизатором является наиболее важной задачей всего комплекса работ. Качественная подготовка

поверхности имеет решающее значение для обеспечения прочной адгезии металлического покрытия к обрабатываемой поверхности. [19].

В состав этапа подготовки поверхности входят следующие операции:

- снятие изоляции и загрязнений с поверхности металла;
- просушка и отжиг поверхности для удаления в порах влаги и масел;
- абразивоструйная очистка поверхности металла с целью удаления старого покрытия, ржавчины, атмосферных загрязнений и придания шероховатости;
- удаление окисных пленок механическим способом и обеспечение необходимой шероховатости;
- подогрев обрабатываемой поверхности непосредственно перед началом процесса напыления до температуры 100-120°C.

Для очистки и подготовки поверхности в настоящее время чаще всего применяют дробеструйную абразивную обработку. Подогрев пропановыми горелками подложки проводят для удаления влаги оставшейся в мельчайших порах. Оксидную пленку удаляют воздействуя на поверхность химическими и физическими способами [5].

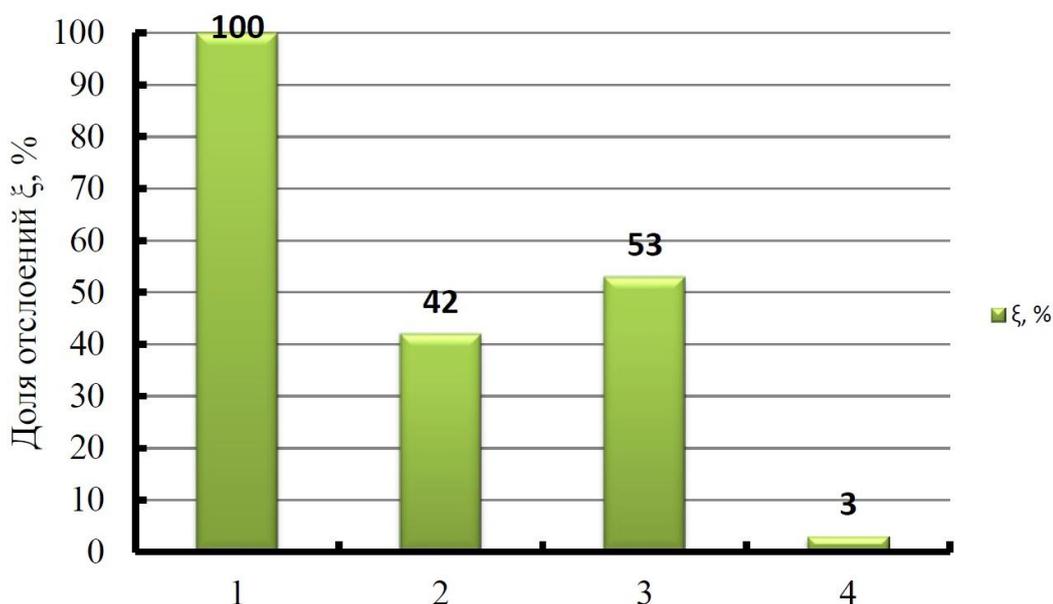
Качественное проведение всех этих работ все равно не может гарантировать образование оксидной пленки во время проведения самой металлизации.

Струйную абразивную обработку проводят не только для очистки поверхности и придания ей шероховатости, но и для выведения ее из термодинамического состояния. Это необходимо для высвобождения межатомных связей атомов, находящихся у поверхности обрабатываемого изделия для улучшения их взаимодействия с напыляемым материалом. При всем этом важное влияние на прочность сцепления напыляемых покрытий с подготовленной основой оказывает структура микрорельефа обработанной поверхности [32, 41].

Главным недостатком абразивоструйной очистки поверхности является то, что на химически активированной поверхности после

обработки идет быстрый рост оксидной пленки. И поэтому время между подготовкой поверхности и процессом напыления необходимо сократить до минимума. Абразивоструйная очистка процесс трудоемкий, требующий специального оборудования и достаточно вредный. Однако несмотря на все недостатки его применение для подготовки поверхностей под напыление в настоящее время используется повсеместно [38].

Для обеспечения стабильной прочности сцепления напыленного покрытия с основой недостаточно простых распространенных способов очистки (рисунок 4):



- 1 – обезжиривание растворителем; 2 – ручной абразивный инструмент;
3 – углошлифовальная машинка с проволочным кругом;
4 – абразивоструйная подготовка.

Рисунок 4 – Зависимость прочности сцепления от способа подготовки поверхности

В случае отсутствия качественной подготовки поверхности происходит низкий отвод тепла от энергии молекул напыляемого металла в подложку. Это приводит к чрезмерному нагреву поверхности и снижению механических свойств наплавленного металла [5].

Абразивоструйный метод подготовки поверхности одновременно выполняет несколько функций: обезжиривание поверхности, очистка от

загрязнений и придание поверхности необходимой шероховатости. Для получения необходимой степени шероховатости нужно выбрать абразив подходящей фракции; подать сжатый воздух нужного давления и степени чистоты; при помощи образцов шероховатости контролировать степень подготовки.

Сертифицированные образцы для сравнения степени очистки металлов после абразивоструйного метода должны соответствовать стандартам. В России на данный момент в основном применяются два стандарта: ГОСТ 9.402-2004 и ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014 [5].

Визуальным методом контроля проводят сравнение очищенной поверхности и образцов шероховатости.

Образцы шероховатости поверхности по ГОСТ 9.402-2004 и ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014 показаны на рисунке 5.

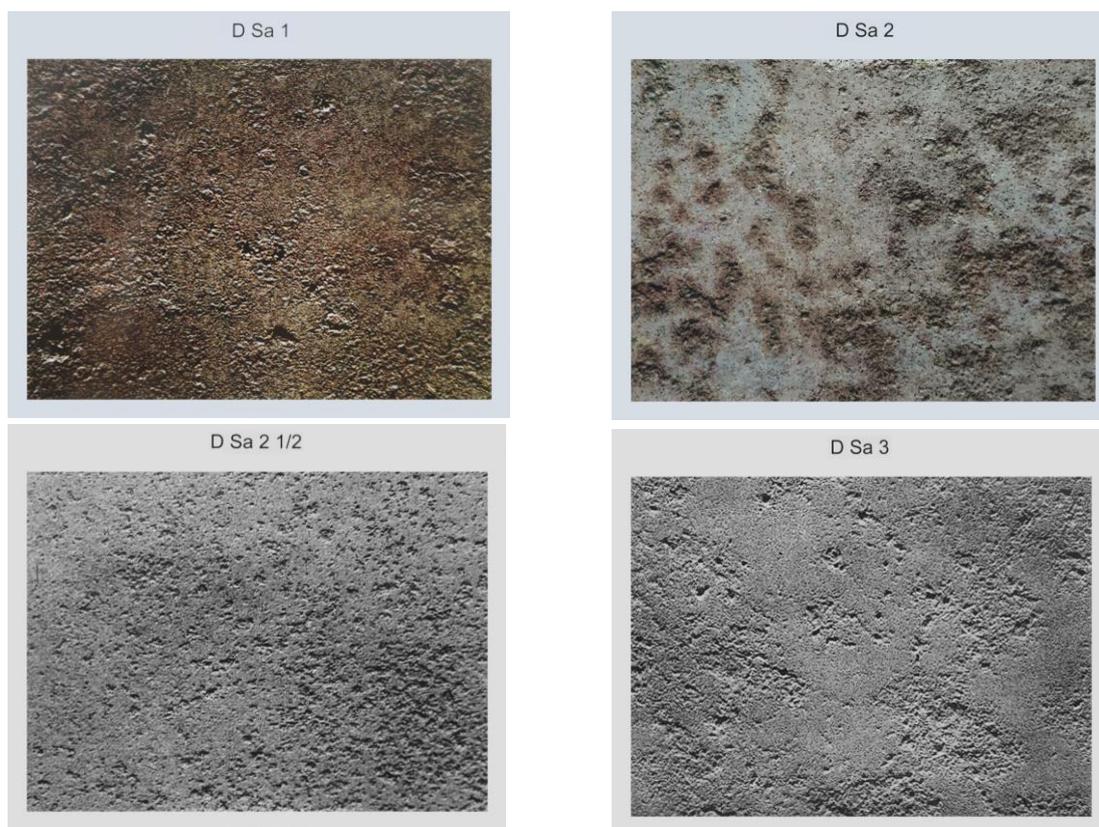


Рисунок 5 - Образцы четырех степеней шероховатости поверхностей, подготовленных абразивоструйным методом

Минимальную степень очистки поверхности перед металлизацией должна быть не ниже Sa 2 ½. Эта очистка подразумевает удаление масел, жиров, оксидов и других отложений. Для улучшения адгезии напыляемого слоя желательно выполнить максимально качественную очистку поверхности. В таблице 7 описаны характеристики степеней очистки подготовленной поверхности [25].

Таблица 7 – Описание характеристик степеней абразивоструйной очистки.

Степень очистки	Характеристика	Описание подготовленной поверхности
Sa 1	Слабая абразивная струйная очистка	Проводят осмотр поверхности визуальным способом. На поверхности исключаются наличие масел, грязи, коррозии, лакокрасочных покрытий и старой изоляции.
Sa 2	Тщательная абразивная струйная очистка	Проводят осмотр поверхности визуальным способом. На поверхности исключаются наличие масел, грязи, коррозии, лакокрасочных покрытий и старой изоляции. На поверхности возможно наличие трудно отделимой остаточной прокатной окалины.
Sa 2 ½	Сверх тщательная абразивная струйная очистка	Проводят осмотр поверхности визуальным способом. На поверхности исключаются наличие масел, грязи, коррозии, лакокрасочных покрытий и старой изоляции. Оставшиеся следы после очистки допускаются в виде пятен, точек или полос.
Sa 3	Абразивная струйная очистка до видимой чистой стали	Проводят осмотр поверхности визуальным способом. На поверхности исключаются наличие масел, грязи, коррозии, лакокрасочных покрытий и старой изоляции. Поверхность имеет по всей поверхности равномерный металлический блеск.

При контроле качества подготовленной поверхности оценку проводят по следующим критериям:

- абразивоструйная очистка должна быть осуществлена до степени, Sa 2,5 - 3 по ISO 8501 и проверена визуально путем сравнения с эталоном;
- ручная очистка должна быть осуществлена до степени Sa 2,5- 3 по ISO 8501 и проверена визуально путем сравнения с эталоном;

- шероховатость Rz 50-100 мкм (набором образцов шероховатости).

Подогрев обрабатываемой поверхности непосредственно перед началом процесса напыления повышает коэффициент использования присадочного материала, а значит и повышение адгезионной прочности покрытия. Уровень остаточных напряжений также уменьшается и улучшаются условия для равномерного растекания капель.

Перегрев обрабатываемой поверхности имеет ряд недостатков:

- увеличение температуры нагрева подложки приводит к росту на ее поверхности оксидной пленки, которая не дает взаимодействовать металлам между собой. Так как энергия активации оксидов значительно выше энергии активации металлов;
- перегрев подложки приводит к тепловым деформациям деталей;
- ведет к увеличению усталостных трещин на обрабатываемых поверхностях.

Появление остаточных напряжений возникает: из-за различия температуры напыляемых частиц и подложки, различных коэффициентов температурного расширения, изменение структуры при кристаллизации частиц. Приходим к выводу, что остаточные напряжения появляются в результате термического воздействия и перехода кинетической энергии в процессе электродугового напыления [25].

Обработка поверхности перед основным этапом напыления является очень важной работой обеспечивающей прочное сцепления частиц покрытия и поверхности детали. Большая часть напыленного покрытия формируется на поверхности за счет механического сцепления [25].

Соответственно, для того чтобы мельчайшие расплавленные частицы при ударе о поверхность лучше сцеплялись с ней она должна быть шероховатой.

2.3 Разработка технологического процесса напыления защитного покрытия на поверхность сварного шва и околошовной зоны

Разработку технологии процесса напыления защитного покрытия рассмотрим на примере обработки сегментов сварного соединения труб диаметром 1420x18,7 мм. методом электродуговой металлизации. Источником питания для подающих механизмов является выпрямитель сварочный ВД-506 УЗ [22].

Перед началом процесса металлизации необходимо убедиться в качестве подготовленной поверхности и ее температуре предварительного подогрева.

Определить, позволяют ли атмосферные условия окружающей среды выполнить данный процесс. К нормальным атмосферным условиям относятся:

- относительная влажность менее 80%;
- температура окружающего воздуха более 15°С;
- скорость ветра не более 5 м/с.

После проверки этих условий электродуговая металлизация должна начаться в максимально короткий срок после подготовки [24].

Технологические параметры электродугового металлизатора включают:

- тип используемого напыляемого материала проволока сплошного сечения цинка/алюминия в процентном соотношении 85/15;
- диаметр проволоки составляет 2,0 мм.
- время между подготовкой поверхности и процессом напыления не должен превышать одного часа.

При температуре окружающего воздуха ниже +15° С перед нанесением рекомендуется провести подогрев поверхности. Если по

истечении 2 часов процесс электродуговой металлизации не начался, то следует повторить операцию подготовки поверхности.

Напряжение и ток должны соответствовать типу и диаметру применяемых проволок. Ток и напряжение электрической дуги контролируется при помощи амперметра и вольтметра.

Дуговой разряд в месте соприкосновения двух проволок выбирается из условия нагрева жидкого металла в зоне приэлектродных пятен не доходящего до температуры кипения.

Температура расплавленного металла, находящегося в облаке распыляемого струей воздуха, не должна превышать температуры плавления. В случае если, нагрев присадочной проволоки будет доходить до температуры кипения металла, а это возможно в режиме горения дуги при коротком замыкании, то потеря легирующих элементов в следствии сгорания будет очень существенной.

Устойчивый процесс напыления электродуговой металлизацией проходит в режиме горения электрической дуги без коротких замыканий. Этого результата возможно добиться если обеспечить динамическое равновесие между скоростью сгорания электродной проволоки и скоростью ее подачи.

Для данного диаметра проволоки и учитывая, что металлы легкоплавкие, определяем необходимую силу тока, равную 90 А и напряжения 27 В.

Давление, а, следовательно, и скорость потока воздуха очень важный параметр. Он напрямую влияет на скорость движения частиц расплавленного металла в образовавшемся воздушном потоке.

Воздушный компрессор должен обеспечивать стабильность давления сжатого воздуха. Расчетным путем определили объем ресивера 100 литров для максимального отбора воздуха 1,5 кубическим метра в минуту. Средний мгновенный расход воздуха на выходе из компрессора по анемометру должен составлять 22-26 литров.

При этом проведен расчет внутреннего диаметра трубопровода для компрессора при его удалении от металлатора на 25 метров. Необходимая пропускная способность трубопровода обеспечивается при минимальном внутреннем диаметре 10,7 мм. По стандарту ГОСТ ISO 2398-2014 подходит рукав резиноканевый для сжатого воздуха внутренним диаметром 11,75 мм.

На механические свойства и структуру покрытия большое влияние оказывает скорость расплавленных частиц перед ударением о подложку, их масса, размеры и остаточная температура. Все эти факторы необходимо контролировать и настраивать режимы электродуговой металлации, давления воздушного потока и его чистоты. Качество подаваемого сжатого воздуха контролируется путем проверки его чистоты на фильтровальной бумаге, через которую пропускают сжатый воздух в течении нескольких минут. На бумаге должны отсутствовать следы масел и влаги.

Скорость движения частиц колеблется от 135 м/с до 320 м/с при давлении сжатого воздуха 0,5-0,6 МПа. Время полета расплавленных частиц металла от металлатора до поверхности обрабатываемой детали составляют тысячные доли секунды. При ударе частицы о поверхность вся кинетическая энергия преобразуется в тепловую, что дополнительно разогревает зону контакта. Ударение о поверхность заставляет частицу расплющиваться по поверхности и тем самым вызывает уплотнение слоя и снижает пористость покрытия.

Более высокая скорость частицы перед ударом, дает ей большую кинетическую энергию, что увеличивает плотность и надежность контакта частиц с поверхностью подложки и между собой.

Увеличение площади контакта поверхности возникает из частиц в пластичном состоянии, поэтому нанесение покрытий из легкосплавных и мягких металлов имеет хорошую адгезию.

Температуру покрытия необходимо контролировать с помощью бесконтактных термометров.

Температура обрабатываемой поверхности при напылении слоя покрытия должна варьироваться, начиная со 100°C до 180-200°C. Повышение температуры подогрева подложки выше этих значений приводит к снижению прочности сцепления наносимого покрытия. Возникает процесс окисления подложки и возможно отслоение покрытия от него.

Движения металлизатора по обрабатываемой поверхности должны быть равномерными, непрерывными и возвратно-поступательными. Это позволит избежать чрезмерного перегрева и отслоения покрытия.

Если металлизатор задерживается на каком-то участке, то на нем возможен перегрев и возникают остаточные напряжения и как следствие снижается прочность сцепления.

Если металлизатор перемещается очень быстро, то это приводит к снижению прочности сцепления и наличию участков не обработанной поверхности с пробелами наносимого слоя.

Размерность напыляемых частиц зависит от нескольких факторов и в среднем составляют порядка 20-50 мкм. Максимальный размер напыляемых легкоплавких частиц металла обычно не превышает 90 мкм. Частицы после расплавления проволоки продолжают измельчаться в распыляемом облаке под действием газодинамических сил в воздушном потоке воздуха.

Действие газодинамических сил по диспергированию частиц зависит от давления и скорости воздушного потока. Чем давление выше, тем выше скорость, а, следовательно, и процесс диспергирования.

Работы с применением оборудования и газопроводов, работающих под давлением должны, проводится персоналом, прошедшим обучение в соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением подконтрольных Ростехнадзору.

Обслуживание трубопроводов, шлангов для подачи воздуха, редуцирующих устройств должно выполняться специализированным

персоналом. Конструкция штуцеров, на которые надевают шланги, должна обеспечивать удобное прочное крепление и герметичное соединение.

2.4 Контроль качества металлизационных покрытий

В процессе производства металлизационные покрытия оцениваются как по качеству поверхности, так и по прочности сцепления частиц наплавляемого металла с поверхностью изделий. Подобный контроль должен состоять из оценки внешнего вида, определения толщины и проверки прочности сцепления с основанием (адгезии). Наплавление должно иметь равномерное мелкозернистое строение и достаточно высокую чистоту поверхности (3-5 класс). [25].

При этом абсолютно недопустимым является наличие пропусков, вздутий и металлических брызг. Возможны только малозаметные различия в цветовых оттенках поверхностного металлизированного слоя.

Полученные покрытия подвергают визуальному контролю по внешнему виду и геометрическим параметрам.

К металлизированным покрытиям предъявляется целый ряд требований, среди них:

- прочность сцепления с основанием;
- мелкозернистая структура, отличающаяся наилучшими механическими свойствами;
- минимум пористости;
- равномерность толщины покрытия.

Контроль по ВИК выполняют для своевременного выявления дефектов наружной поверхности таких как: сколы, трещины, отслоения покрытия. Наличие механических дефектов в виде царапин, рисок и оголенных участков не допускается. Осмотр выполняют с применением увеличительных стекол и луп с 10-кратным увеличением. Освещение

рабочего места должно быть обеспечено лампами, дающими освещенность не менее 150 лк по ГОСТ 1182-77.

Толщину покрытия на обработанных изделиях измеряют микрометром по ГОСТ 6507-78, металлографическими методами, а также толщиномерами магнитного типа. [6, 11].

Принцип работы магнитного толщиномера основан на преобразовании величины измеряемой толщины покрытия в электрический сигнал и последующем измерении его амплитуды.

Для измерения толщины покрытия применялся магнитный толщиномер покрытий МТ-201 предназначен для измерения толщины немагнитных покрытий, таких как хром, медь, цинк, алюминий, пластик на магнитном основании (железо, сталь). Его диапазон измерения позволяет измерять толщины от 5 до 5000 мкм.

Гравиметрическим методом определяют расчетную среднюю толщину покрытия на деталях вычислением по формуле:

$$t_{cp} = (m_1 - m_2) / \rho_n S \quad (2)$$

где m_1 - измеренная масса изделия до напыления;

m_2 - измеренная масса изделия после напыления;

ρ_n – табличное значение плотности материала покрытия, по ГОСТ 2409-67; S - площадь покрытия напыления.

При измерении толщины однослойных и многослойных покрытий применяют металлографический метод. Он основан на измерении толщины в поперечном сечении шлифа. Для покрытий толщиной до 20 мкм увеличение составляет кратность 500-1000, для покрытий более 20 мкм кратность составляет 200. Выполняют замеры не менее чем в трех точках по всей длине шлифа.

Для определения прочности сцепления покрытия с подложкой проводят анализ по методу отрыва клеевого соединения покрытия образца-свидетеля, по ГОСТ 9.302-79 проводят методом изгиба и др.

ГОСТ 9450-76 применяют для определения микротвёрдости покрытия. Для этого используют прибор ПМТ-3 5 при толщине покрытия меньше 10-кратной глубины отпечатка.

Для определения твердости покрытия при толщинах до 2 мм используют метод Виккерса по ГОСТ 2999-75, либо метод Роквелла по ГОСТ 9013-59 или по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59 [21].

Оценка шероховатости поверхности после напыления для последующего наложения термоусадочных муфт осуществляют, сравнивая с образцами шероховатости по ГОСТ 9378-75.

Гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 18898-73 проводят исследования покрытия уровня его пористости [21].

Стойкость к атмосферной коррозии определяют по ГОСТ 17332-71, для определения балла коррозии по ГОСТ 13819-68. [21].

Полученные цинк-алюминиевые покрытия, нанесенные с помощью электродуговой металлизации сами по себе, обеспечивают протекторную защиту и свойство самовосстановления. При возможном механическом повреждении защитного слоя происходит закупоривание этих мест оксидами металла покрытия.

3 Зависимость сплошности, пористости и адгезионной прочности нанесенных покрытий от скорости вылета, и размера напыляемых частиц

3.1 Условия получения максимально прочного адгезионного покрытия

Адгезионная прочность напыленных покрытий в процессе электродуговой металлизации в большой степени зависит от деформации частиц расплавленного металла при ударе об обрабатываемую поверхность.

Прочность соединения металлов распыляемого покрытия и поверхности зависит от силы действия удара частицы и создаваемого ей напорного давления

Размер частицы перед ударом о поверхность определяет на какой размер зоны будет направлено ее давление. Давление, не входящее в эту зону со стороны деформирующейся частицы направлено перпендикулярно к поверхности и стремится к нулю.

Давление же внутри зоны уменьшается от максимального значения в центре и до нуля по направлению к периметру. Из этого можно сделать вывод, чтобы получить максимальную адгезионную прочность, будет достигнута при одинаковых размерах частицы и площади ее контакта с поверхностью S .

При $S = \pi r^2$, где r – радиус частицы перед ударом [23].

Зависимость радиуса деформированных напыляемых частиц при различных скоростях удара о поверхность показаны на рисунке 5.

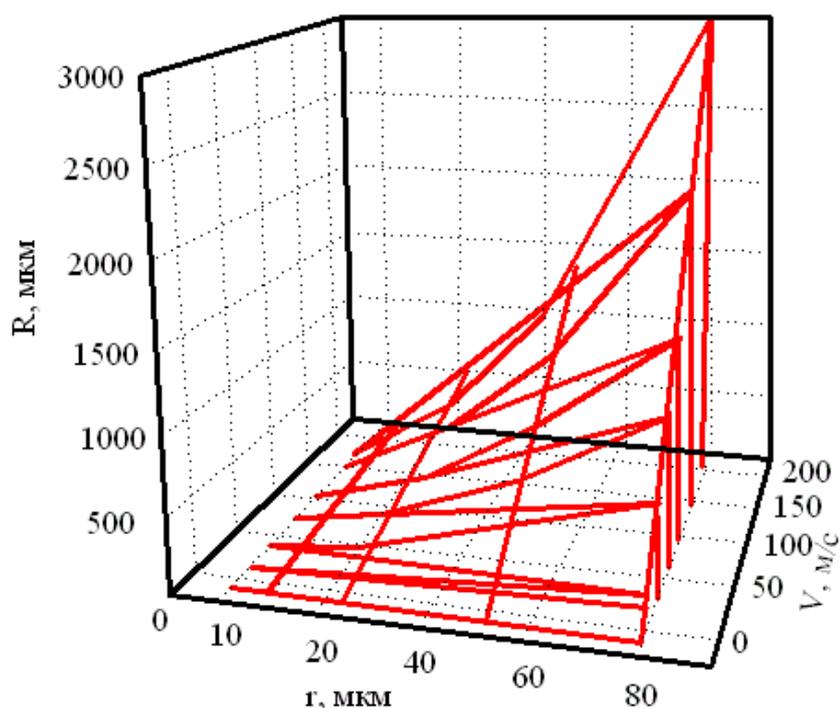


Рисунок 5 – Корреляция размеров деформированных частиц в зависимости от первоначальных размеров и скорости перед столкновением с поверхностью

Видим, что увеличение первоначального размера частицы и скорость перед ударом о поверхность естественно ведет к увеличению радиуса деформированной частицы [7].

Очевидно, что для повышения адгезионной прочности необходимо уменьшить размер образующихся частиц и увеличить их скорость.

По проведенным ранее исследованиям в этой области стоит также отметить, что при скоростях частиц перед ударением о поверхность выше скорости звука, происходит дополнительная активация поверхности изделия вне зоны действия напорного давления. Происходит это за счет резкого увеличения напряжений в волне Рэлея. Трение частиц, растекающихся с большой скоростью по поверхности и между собой, приводит к возрастанию адгезионной прочности покрытий [18].

Расстояние между соплом металлизатора и поверхностью изделия также оказывает существенное влияние на адгезионную прочность напыляемого покрытия. На рисунке 7 приведена корреляция между

полученной прочностью сцепления покрытия в зависимости от дистанции напыления [23].

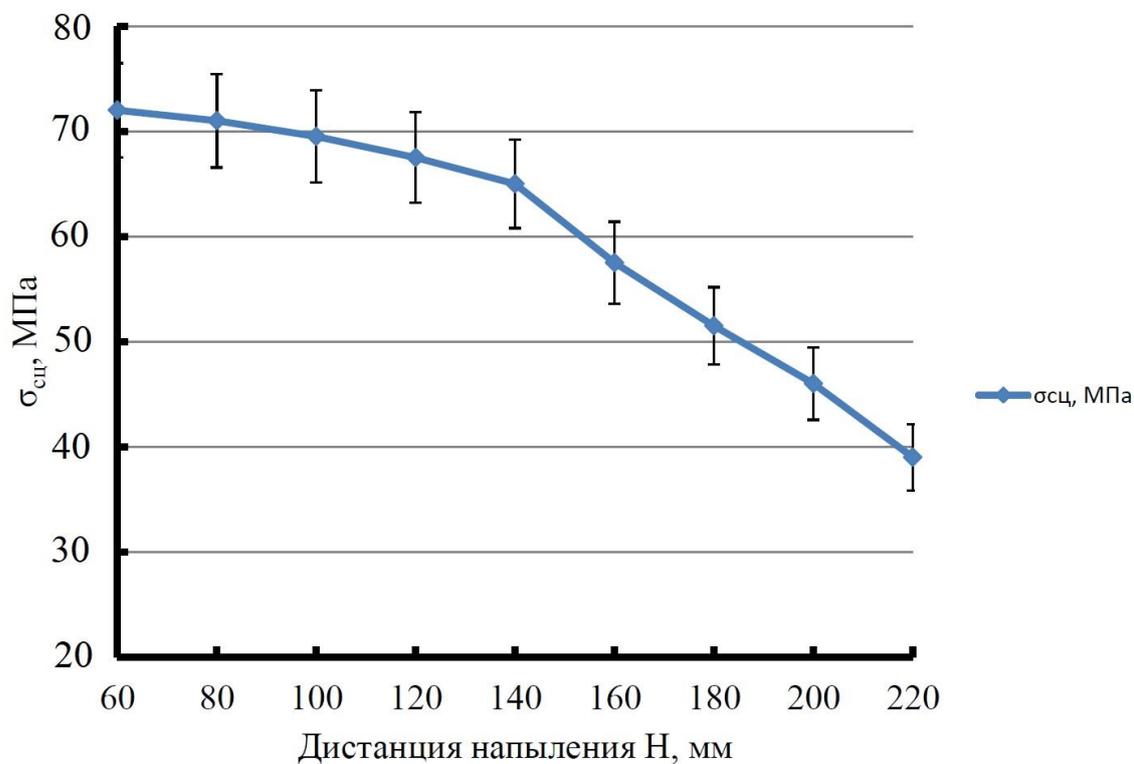


Рисунок 6 – Прочность сцепления в зависимости от расстояния до обрабатываемой поверхности

Проанализировав полученный график можно сказать, что при удалении сопла металлизатора от поверхности далее 140 мм происходит резкое снижение прочности сцепления покрытия.

Вероятнее всего это происходит в следствии окисления расплавленных частиц и обрабатываемой поверхности и ухудшение связей между частицами из-за образовавшихся оксидов [30, 35].

3.2 Способы повышения качества получаемых покрытий

Основными приемами повышения качества напыляемых покрытий методом электродуговой металлизации являются:

- повышением температуры и теплосодержания капель распыляемого металла;

- увеличение скорости частиц за счет сокращения угла иссечения воздушного потока и повышения давления;

- уменьшение угла оси электродов для повышения устойчивости дуги;

- обеспечить точное позиционирование электропроводных проволок в точке их скрещивания;

- уменьшить длину вылета электропроводных проволок из подающих тоководов;

Повышение температуры частиц.

Увеличение температуры напыляемых частиц перед их ударением о поверхность дает возможность существенно повысить адгезионную прочность.

Но необходимо избегать перегрева частиц расплавленного металла так как это может привести к выгоранию легирующих элементов в нем и насыщению газами атмосферы.

Насыщение расплавленного металла газами атмосферы приводит к ухудшению механических свойств покрытий и образованию оксидной пленки при снижении температуры напыляемых частиц до точки плавления.

Температуру напыляемых частиц при дуговой металлизации изменяют путем регулирования тока и напряжения на источнике.

Напряжение в 27-30 В увеличивает прочность сцепления и снижает количество используемого материала, но дальнейшее возрастание напряжения, практически не увеличивает прочность сцепления, но может привести к растрескиванию [11].

Производительность процесса электродуговой металлизации повышается с увеличением тока. Также увеличение тока оказывает влияние на физико-химическое взаимодействие между расплавленными частицами и поверхностью в момент удара, что также положительно влияет на повышение прочности сцепления [26, 41].

Значение $\sigma_{сц}$ начинает снижаться после повышения тока выше уровня, при котором происходит чрезмерное измельчение расплавленных капель металла и это приводит к увеличению степени окисления. Перегрев капель металла увеличивает вероятность выброса металла капли при ударе о поверхность, а не растекания по ней [4, 9, 26].

Максимальная прочность сцепления частиц металла при напылении проволокой Zn85/Al15 достигается при токе 110А, дальнейшее увеличение тока ухудшает физико-химическое взаимодействие в контакте «капля – подложка» [7].

Увеличение скорости напыляемых частиц.

Необходимость недопущения превышения частицами точки плавления ограничивают выше описанные методы по повышению прочности покрытия. Поэтому современное направление развития процессов электродуговой металлизации направлено на повышение скорости частиц и ограничение их температуры. Увеличение кинетической энергии с ростом скорости вылета частиц при ударе о поверхность обеспечивает их интенсивное деформирование.

Увеличение скорости вылета частиц обеспечивает повышение температуры при контакте с поверхностью за счет перехода ее кинетической энергии в тепловую.

Существует несколько способов увеличить скорость вылета частиц:

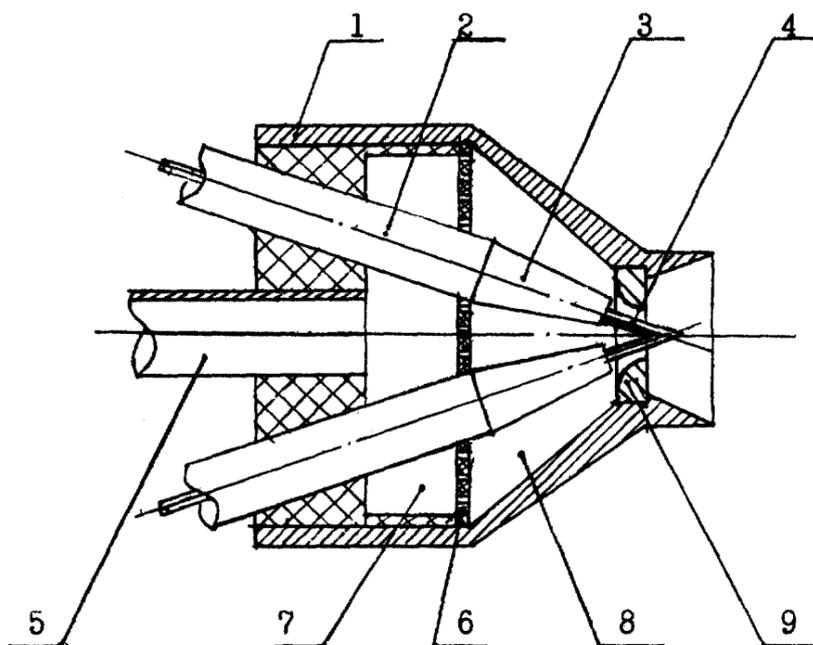
- увеличить количество подаваемого потока воздуха за счет повышения давления и плотности уменьшением сечения сопла;
- уменьшить размер частиц расплавленного металла, тем самым улучшить их аэродинамические качества.

Чтобы уменьшить размер частиц самым простым для реализации путем является увеличение давления транспортирующего газа и снизить напряжение электрической дуги. Снижение напряжения возможно до определенного момента при котором стабильность процесса образования капель расплавленного металла нарушается.

Для повышения скорости полета напыляемых частиц применяют специальный усеченный профиль сопла металлизатора. Его конструкция обеспечивает повышение скорости вылета частиц без значительного увеличения расхода воздуха [40].

Нанесение частиц расплавленного металла на обрабатываемую поверхность на сверхзвуковых скоростях называется сверхзвуковой электродуговой металлизацией (СЭМ) [23].

На рисунке 7 показана принципиальная схема металлизатора СЭМ. Сверхзвуковая струя потока воздуха увлекает за собой расплавленный металл через сопло металлизатора и переносит на поверхность изделия.



1 - корпус; 2 –присадочная электропроводная проволока; 3 – трубка-электрод; 4 - электрическая дуга; 5 - подача сжатого воздуха; 6 - рассекающий поток воздуха; 7 - газовая камера; 8 - выходная газовая камера; 9 - сопло с меньшим углом иссечения потока

Рисунок 7 - Схема профиля сечения сопла для увеличения скорости полета частиц

Измельчение расплавленного металла происходит в потоке сжатого воздуха. При использовании специального сопла с уменьшенным углом

между осями электродов до 30° и с точным их позиционированием, давлением потока воздуха до 7 атмосфер можно повысить механические свойства получаемых покрытий при скоростях истечения воздуха до 515 м/с [23].

Дуговой промежуток между проволоками при использовании специального сопла является небольшим и составляет примерно 1 мм. Угол встречи между подающими проволоками составляет до 60°. В случае превышения угла в 60°, процесс напыления становится нестабильным [23].

Свойства получаемых покрытий в зависимости от скорости вылета расплавленных частиц из сопла распылителя приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Зависимость свойств покрытия от скорости частиц

Свойства получаемых покрытия	Скорость вылета частиц из сопла металлизатора, м/с				
	138	230	345	450	515
Твердость, HRC	47,6	51,9	52,1	52,3	51,5
Адгезия, МПа	46,2	51,8	64,3	78,9	88,2
Пористость, %	6,4	5,8	4,7	2,7	2,4
Средний размер диспергированных частиц, мкм	38-50	25-38	20-15	15-10	5-10

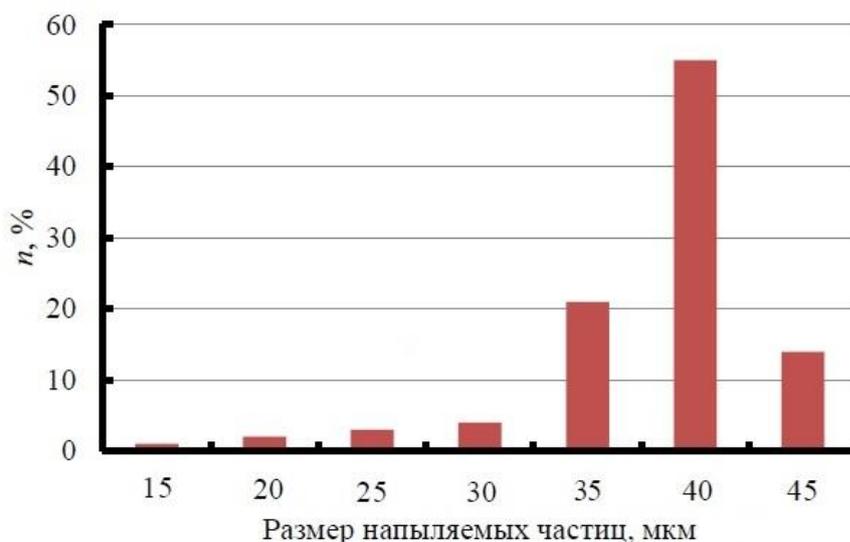
Увеличение адгезии и снижение пористости покрытия происходит при уменьшении размера частиц расплавленного металла при скоростях выше скорости звука [925].

При полете частиц с дозвуковой скоростью их размер в среднем составляет 25–50 мкм. При увеличении скорости транспортирующего потока воздуха до 515 м/с размер практически всех частиц находится в пределах 10 мкм [2].

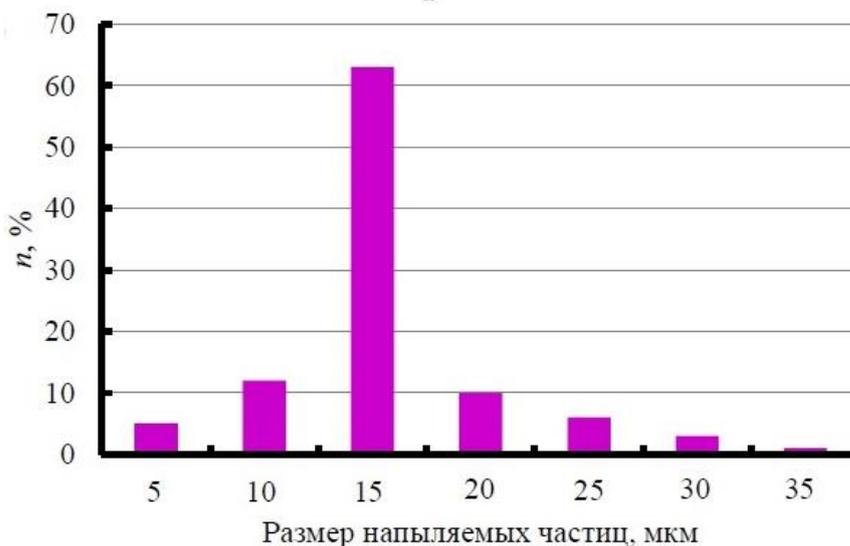
Для определения фракционного состава частиц цинк-алюминиевой проволоки производят распыление в калориметр и определяют с помощью

прибора 028 М. Подсчет размерности частиц и их количество проводят при двух сценариях с обычной и сверхзвуковой скоростью распыления.

Фракционный состав после распыления в калориметр частиц проволоки Zn85/Al15 при скоростях до 300 м/с (рис. 8, а) состоит в основном из частиц размером 35, 40 и 45 мкм. При скоростях воздушного потока 500 м/с (рис.8, б) размеры частиц составляют 10, 15, 20 мкм. [21].



а



б

а - скорость воздушного потока 200 м/с;
б - скорость воздушного потока 500 м/с

Рисунок 8 – Размер расплавленных частиц проволоки Zn85/Al15, при разных скоростях воздушного потока

Сверхзвуковая металлизация со скоростью воздушного потока до 500 м/с позволяет получить частицы проволоки Zn85/Al15 размером менее 20 мкм. А это значит, что покрытие будет формироваться из частиц металла меньшего размера по сравнению с электродуговой металлизацией на скоростях воздушного потока до 300 м/с. Крупные капли металла находясь в потоке воздуха, соударяются друг с другом и диспергируются на более мелкие [24].

Полностью расплавились и при этом приобрели сферическую форму, как наиболее удобную для переноса воздушным потоком, частицы размером 20 мкм. Частицы меньшей фракции переносятся на обрабатываемую поверхность практически в парообразном состоянии в виде мельчайших шариков расплавленного металла [34].

Уменьшение размера частиц при увеличении скорости их полета значительно изменяют микроструктуру покрытия (рисунок 9):

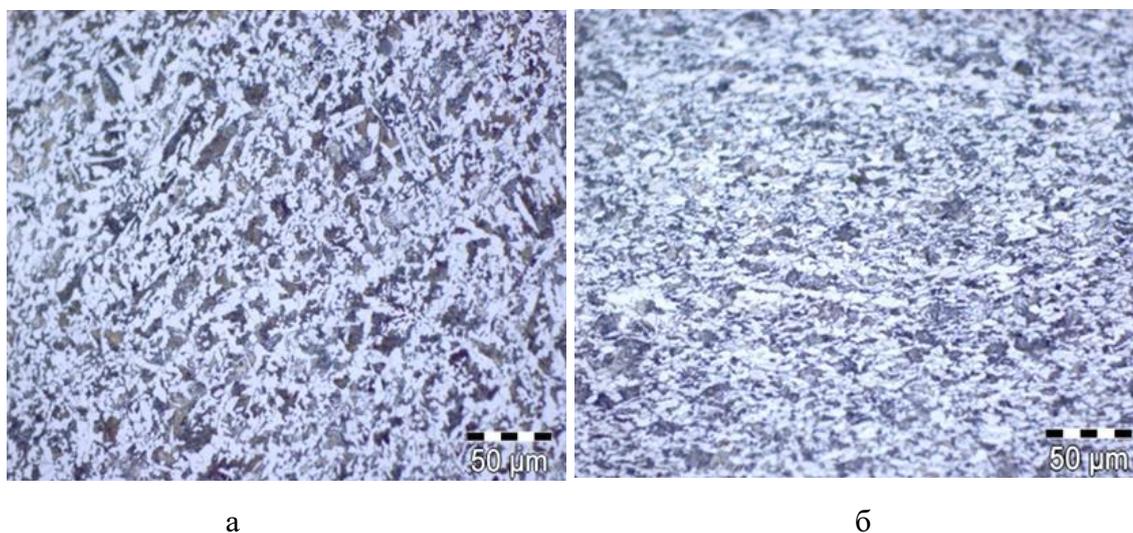


Рисунок 9 - Микроструктура образующегося покрытия при скоростях воздушного потока 200 м/с (а) и 500 м/с (б)

Проведя анализ микроструктуры покрытия имеем следующие данные (рисунок 10). Структура покрытия при скоростях до 300 м/с крупнозернистая и присутствует большое количество пор. Имеются и такие частицы в форме сферы, которые поток воздуха не смог раздробить на

более мелкие фракции и которые в процессе полета остыли раньше, чем произошло их столкновение с поверхностью обрабатываемой детали. Это следствие низкой скорости транспортирующего потока воздуха [36].

При увеличении скоростей воздушного потока количество пор постепенно уменьшается, а покрытия приобретают более тонкую микроструктуру. Также не обнаруживается в микроструктуре и глобулярных частиц. Наблюдается значительная пластическая деформация частиц. Покрытие образует равномерную структуру по всей толщине, а значит стабильность процесса горения дуги в данном случае обеспечено [41].

Увеличение скорости воздушного потока позволяет значительно уменьшить размер напыляемых частиц металла. Это позволяет защитить поверхность частиц от преждевременного окисления, а обрабатываемую поверхность от окисления в процессе металлизации. Тем самым можно обеспечить более высокие физико-технологические свойства напыляемых покрытий [40].

По полученным исследованиям можно сделать следующие выводы:

- покрытия, получаемые методом электродуговой металлизацией, имеют низкую пористость и хорошую адгезию между напыляемым металлом и металлом поверхности. Покрытие представляет собой слоистый материал из деформированных частиц напыляемого материала. Образованное покрытие с применением проволоки Zn85/Al15 имеет высокую адгезию и минимальное количество пор, что обеспечит необходимые нам антикоррозионные свойства [38].
- получение качественного покрытия и хорошую адгезию металлов невозможно получить без качественной подготовки поверхности изделия к электродуговой металлизации. Из рассмотренных способов подготовки поверхности обеспечивающий наиболее эффективное удаление загрязнений и заданную шероховатость поверхности явилось применение дробеструйной обработки.

- для уменьшения размеров напыляемых частиц до 5–15 мкм и повышения прочности сцепления частиц с поверхностью до 60 МПа при пористости 8,9% необходимо повысить скорость воздушного потока до сверхзвука и более [42].

Пористость при наплавке легкоплавких металлов электродуговой металлизацией особенно сильно зависит от скорости транспортирующего потока.

Пористость существенно снижается при скоростях воздушного потока от 350-500 м/с (рис.10) [10, 26, 27].



Рисунок 10 – Снижение пористости покрытия при увеличении скорости воздушного потока

Во время изменения угла потока частиц было определено, что оптимальный угол образования покрытия 90° , то есть перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Но важнее то что, начиная с 75° угла напыления и далее появляется четко выраженная волнистая структура, гребни которых расположены перпендикулярно к направлению движения частиц. При угле меньше 55 градусов покрытие уже не формируется, а наблюдается только эрозия частиц подложки, поскольку при углах $40 - 70^\circ$ значительно вырастает коэффициент эрозии, возникает сильный вращающий момент при контакте частица с обрабатываемой поверхностью [36].

По данной главе можно сделать следующие выводы:

- металлографический анализ слоя покрытия показывает, что пористость в покрытие присутствует и полностью избавиться от нее не удастся. Для снижения значения пористости к минимуму необходимо увеличивать скорость транспортирующего потока воздуха из сопла металлатора до диапазона 350–500 м/с [10];
- экспериментально доказано, что методом электродуговой металлизации можно получить покрытия с хорошими прочностными характеристиками и низкой пористостью, применяю в качестве напыляемого материала смесь металлов цинка и алюминия.
- оптимальный угол для нанесения покрытия, который должен быть соблюден, составляет 90° к обрабатываемой поверхности [35];
- окисление частиц напыляемого металла и поверхности изделия резко снижают прочность сцепления напыленного слоя и обрабатываемой поверхности. Для снижения этого эффекта необходимо ограничить ток до минимально возможного для распыления [34];
- по результатам испытаний и исследованиям структуры покрытия сегментов сварных соединений труб можно рекомендовать проволоку Zn85/Al15. Экспериментально доказано, что методом электродуговой металлизации можно получить покрытия с хорошей коррозионной стойкостью;
- установлено, что металлизация цинк-алюминием ($\delta = 250 \dots 300$ мкм) и последующая изоляция сварных соединений термоусаживающими полимерными манжетами обеспечивает более длительную и надежную защиту от коррозии в кислых и щелочных растворах (рН 6,5...8,5) по сравнению с изоляцией сварных соединений термоусаживающими полимерными манжетами [37].

Заключение

В работе была проведена оценка существующих технологий и оборудования по газопламенному напылению и электродуговой металлизации для возможности их применения по напылению коррозионностойких покрытий на сварные соединения магистральных газопроводов. Рассмотрена имеющаяся нормативная база технологического процесса и опыт применения на аналогичных объектах. Показаны высокоэффективные технологические приемы напыления коррозионностойких покрытий сварных швов магистральных газопроводов. Проведена оценка рисков возможных аварийных ситуаций по разгерметизации магистральных газопроводов.

Определено, что для повышения срока эксплуатации и надежности нефтегазопромыслового оборудования, эффективным способом защиты от коррозии сварных швов в трассовых условиях, является напыление покрытий методом электродуговой металлизации.

Определена возможность применения оборудования ручной дуговой металлизации кольцевых сварных швов после проведения ремонта линейной части МГ, а также ремонта наружной поверхности труб. Целесообразность применения электродуговой металлизации подтверждается повышением коррозионных свойств сварных соединений труб. Применение оборудования возможно в различных условиях эксплуатации магистральных газопроводов.

Получение качественного покрытия и хорошую адгезию металлов невозможно получить без качественной подготовки поверхности изделия к электродуговой металлизации. Из рассмотренных способов подготовки поверхности обеспечивающий наиболее эффективное удаление загрязнений и заданную шероховатость поверхности явилось применение дробеструйной обработки.

Сверхзвуковая металлизация со скоростью воздушного потока до 500 м/с позволяет получить частицы проволоки Zn85/Al15 размером менее 20 мкм. А это значит, что покрытие будет формироваться из частиц металла меньшего размера по сравнению с электродуговой металлизацией на скоростях воздушного потока до 300 м/с.

Покрытие из цинк-алюминия повышает коррозионную стойкость металла трубы в 10÷30 раз в кислотных и соляных средах.

Для обеспечения наибольшей прочности сцепления наносимого покрытия с поверхностью необходимо выдерживать расстояние от сопла металлизатора до обрабатываемой поверхности не более 140 мм.

Оптимальный угол для нанесения покрытия, который должен быть соблюден, составляет 90° к обрабатываемой поверхности.

Окисление частиц напыляемого металла и поверхности изделия резко снижают прочность сцепления напыленного слоя и обрабатываемой поверхности. Для снижения этого эффекта необходимо ограничить ток до минимально возможного для распыления.

Пористость в покрытие присутствует и полностью избавиться от нее не удастся. Для снижения значения пористости к минимуму необходимо увеличивать скорость транспортирующего потока воздуха из сопла металлизатора до диапазона 350–500 м/с.

Увеличение скорости воздушного потока позволяет значительно уменьшить размер напыляемых частиц металла. Это позволяет защитить поверхность частиц от преждевременного окисления, а обрабатываемую поверхность от окисления в процессе металлизации. Тем самым можно обеспечить более высокие физико-технологические свойства напыляемых покрытий.

Установлено, что на стойкость образцов оказывает влияние не только вид покрытия, но и его толщина, а, следовательно, пористость, уровень остаточных напряжений и адгезионная прочность.

Метод электродугового напыления применительно к трубам позволяет утверждать о его перспективности для нанесения антикоррозионных покрытий на внешние поверхности магистральных и промысловых газопроводов.

Экспериментально доказано, что методом электродуговой металлизации можно получить покрытия с хорошими прочностными характеристиками и низкой пористостью, применяю в качестве напыляемого материала смесь металлов цинка и алюминия.

Установлено, что металлизация цинк-алюминием ($\delta = 250 \dots 300$ мкм) и последующая изоляция сварных соединений термоусаживающими полимерными манжетами обеспечивает более длительную и надежную защиту от коррозии.

Технология электродугового напыления является наиболее эффективным способом нанесения коррозионностойких покрытий на сварные соединения газопроводов. Доказала необходимость применения для увеличения срока их эксплуатации и снижение затрат на ремонт и обслуживание за счет повышения коррозионной стойкости сварных соединений.

Рассмотренная технология нанесения антикоррозионных покрытий открывает большие возможности для защиты магистральных и промысловых газопроводов от коррозии с целью повышения их надежности и экологической безопасности.

В дальнейшем необходимо нарастить опыт практического применения данной технологии и провести исследования на реальных объектах газотранспортной системы.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте [Текст]: учеб. пособие для вузов / под ред. Б.Е. Прусенко, В.Ф. Мартынюк. – М.: ООО «Анализ опасностей», 2003. – 351 с.
2. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление [Текст]: учебное пособие / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин; под общ. ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
3. Бахвалов Ю. О. Газотермическое нанесение специальных покрытий. М.: ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, 2008. 23 с.
4. *Бороненков В. Н., Коробов Ю. С.* Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности: монография. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 268 с.
5. Вопнерук А. А., Валиев Р. М., Ведищев Ю. Г. и др. Абразивная износостойкость покрытий, нанесенных методом высокоскоростного газопламенного напыления // Известия Самарского научного центра российской академии наук. 2010. Том 12. № 1–2. С. 317–320.
6. Гончаров, В.С. Методы получения защитных покрытий [Текст] / В.С. Гончаров // Машиностроитель. – 2001. – №5 – С. 30 – 33
7. Гончаров, В.С. Физические основы взаимодействия в защитных покрытиях [Текст] / В.С. Гончаров // Повышение эффективности сварочного производства: сб. тр. междунар. конфер. – Липецк: ЛГТУ, 1996, С. 126 – 132.
8. Гончаров, В.С. Технология коррозионной защиты трубопроводов [Текст] / В.С. Гончаров, Е.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Том 14, № 1(3) – 852 – 857 с.
9. ГОСТ 6032-2003 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии».
10. ГОСТ 9.602-2005 Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.

11. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.
12. Журнал «Территория Нефтегаз» март 2009. С.Г. Низьев, ООО «Институт ВНИИСТ». «Состояние и перспективы наружной противокоррозионной защиты сварных стыков трубопроводов современными изоляционными материалами
13. Журнал «Территория Нефтегаз» № 3(11) 2008. В.Г. Антонов, С.А. Соловьев, Ю.С. Рябец ООО «Газпром ВНИИГАЗ. «Оценки применимости противокоррозионных защитных покрытий технологического оборудования и наземных металлоконструкций ОАО «Газпром».
14. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений [Текст]: справочник; В 2 т. Т. 2. / Под ред. А.А. Герасименко. - М.: Машиностроение, 1987. – 784 с.: ил.
15. Защита трубопроводов от коррозии [Текст] / В.С. Ромейко [и др.]; под ред. В.С. Ромейко. – М: ВНИИМП, 1998 – 208 с.
16. Ковалевская Ж. Г. Толмачев А. И. Клименнов В. А., Зайцев К. В., Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 40–43.
17. Коробов Ю. С., Полякова А. М., Яковлева И. Л., Счастливец В. М., Исследование структуры и свойств переходной зоны в алюминиевых деталях с напыленным стальным покрытием // Сварочное производство. 1996. № 12. С. 20–22.
18. Коломейченко А. В., Зайцев С. А. Влияние дистанции напыления на физико-механические свойства при упрочнении газопламенным напылением // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 5. С. 32–33.

19. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование [Текст]: учебник для вузов / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992 – 280 с.
20. Кулик, А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А.Я. Кулик. – Л.: Машиностроение, 1985 – 199 с.
21. Лаборатория металлографии [Текст] / Е.В. Панченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1965 – 439 с.
22. Патент на изобретение РФ № 2081936 «Способ нанесения многокомпонентного покрытия на стальные изделия», авторы: Гончаров В.С., Кравцова Е.А., Ключко С.Л.
23. Патент России № 2047395, МКИ5 В 05В 7/22. Распылительная головка электродугового металлизатора / Ю. С. Коробов, В. Н. Бороненков, В. Э. Барановский // Оpubл. 1995. Бюл. № 31.
24. Патент Российской Федерации N 2004626, кл. С 23 F 13/06, 1993.
25. Прядко, А.С. Влияние подготовки поверхности на качество антикоррозионных покрытий при активированной дуговой металлизации [Текст] / А.С. Прядко, Ю.С. Коробов, А.Е. Черепко // Наплавка и напыление как эффективные способы повышения срока службы деталей машин и оборудования. Тез. докл. Российской НТК. – Екатеринбург, 2002. – С. 96–99.
26. Р.Л. Будкевич. Защита оборудования от коррозии: Учебное пособие. - Альметьевск: Типография Альметьевского Государственного Нефтяного Института, 2007г. - 56 стр.
27. Синайский А.Ю., Мазель А.Г., Маняхина Т.И. Предотвращение разрушений сварных соединений трубопроводов от внутренней коррозии. - Москва, Строительство трубопроводов, 1992, N 7, с.40-42.
28. СТО Газпром 2-3.5-047-2006 Инструкция по расчету и проектированию электрохимической защиты от коррозии магистральных газопроводов.
29. Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии [Текст] / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2002 – 336 с.

30. Сравнение технологий напыления наплавки, гальваники, плакирования, лакокрасочных покрытий // официальный сайт компании ЗАО «Плакарт» [Электронный ресурс], 2015. Режим доступа: <http://www.plackart.com/comparison.html>. (Дата доступа: 27.02.2023).
31. Станислав, Г.Н. Защита трубопроводов от коррозии с использованием современных изоляционных покрытий заводского и трассового нанесения [Текст] / Г.Н. Станислав // Территория Нефтегаз. – 2004/№6.
32. Самсонов, Г.В. Защитные покрытия на металлах [Текст]: сборник статей. – К.: «Наукова думка», 1971.
33. Технологическая инструкция по технологиям ремонта сваркой кольцевых стыковых и угловых соединений промышленных и магистральных газопроводов с применением воздушно-плазменной строжки: разработано ООО "Газпром ВНИИГАЗ", 2012. - 24 с.
34. Токарев А.О. Структурные особенности и фактографический анализ алюминиевого покрытия, полученного методом холодного газодинамического напыления // Технология металлов. – 2000. – № 12. – С. 25-31.
35. Физическая сущность и условия сцепления частиц металлического порошка с подложкой при газодинамическом напылении / В. П. Лялякин, Н. Н. Литовченко, А. С. Саблуков и др. //Технология металлов. 2006. № 5. – С.13–18.
36. Хасуи, А. Наплавка и напыление [Текст] / А. Хасуи, О. Мorigаки. – М: Машиностроение, 1985 – 240 с.
37. Хижняков В.И., Глазов Н.П., Налесник О.И. Исследование коррозии трубной стали во влажных грунтах Среднего Приобья // Коррозия и защита скважин, трубопроводов и морских сооружений в газовой промышленности. М.: ВНИИОЭГазпром, 1982.
38. Andreas Schtze, James Y. Leong, Steven E. Babayan, Jaeyoung Park, Gary S. Selwyn, and Robert F. Hicks. The Atmospheric – Pressure Plasma Jet: A

- Review and Comparison to Other Plasma Sources. IEEE Transactions on Plasma Science, vol 26, N0 6, December 1998, p. 1685-1694.
39. Kovalevskaya Zh.G., Klimenov V.A., Zaitsev K.V. Research of surface activating influence on formation of adhesion between gas-thermal coating and steel substrate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 91. – 8 p.
40. *Kustas F.M., Mirsa M.S.* Application of ion implantation to improve the wear resistance of 52100 bearing steel // Thin Solid Films. 1984. 122. P. 279-286.
41. L. Himics, S. Tóth, M. Veres, A. Tóth, M. Koós Effective implantation of light emitting centers by plasma immersion ion implantation and focused ion beam methods into nanosized diamond // Applied Surface Science, № 328, 2015, - C577–582.
42. S.K. Sharma, P.K. Pujari Embedded Si nanoclusters in α -alumina synthesized by ion implantation: An investigation using depth dependent Doppler broadening spectroscopy // Journal of Alloys and Compounds, № 715, 2017, - C247 – 253.