

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт Машиностроения
(название института полностью)

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

22.04.01. Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование и разработка технологического процесса приварки
выводов электрохимической защиты на газопроводе

Студент Е.А. Барсукова _____ (личная подпись)
(И.О. Фамилия)

Научный к.т.н., доцент, К.В. Моторин _____
руководитель (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Содержание

Введение.....	5
1 Причины разрушения магистральных газопроводов.....	7
1.1 Назначение и классификация трубопроводов.....	7
1.2 Характеристика газопроводов.....	8
1.3 Развитие коррозионной защиты.....	9
1.4 Коррозия и причины ее возникновения.....	10
1.5 Виды коррозионных процессов.....	13
1.6 Коррозия в почвенном электролите.....	16
1.7 Микробиологическая коррозия.....	17
1.8 Коррозия под действием блуждающих токов.....	18
2 Способы защиты магистральных газопроводов от электрохимической коррозии.....	20
2.1 Антикоррозионная защита.....	20
2.2 Изоляционные покрытия.....	20
2.3 Катодная ЭХЗ.....	22
2.4 Протекторная защита.....	26
2.5 Дренажная защита.....	27
3 Критический анализ существующих способов сварки выводов ЭХЗ МГ.....	30
3.1 Ручная дуговая сварка выводов ЭХЗ.....	30
3.2 Конденсаторная приварка выводов ЭХЗ.....	32
3.3 Термитная сварка выводов ЭХЗ.....	34
3.3.1 Сущность процесса термитной сварки.....	34
3.3.2 Возникновение и развитие термитной сварки.....	36
3.3.3 Применение термитной сварки.....	37
4 Виды контроля катодных выводов ЭХЗ, выполненных термитной сваркой.....	44
4.1 Дефекты термитной сварки.....	44

4.2	Возможные металлургические эффекты основного металла.....	46
4.3	Образование интерметаллидов в сварном соединении.....	47
4.4	Микроскопические исследования.....	50
4.5	Переходное контактное сопротивление сварного соединения.....	52
5	Проведение эксперимента по приварке выводов ЭХЗ.....	54
5.1	Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термитной смесью.....	58
5.2	Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением разовой тигель-формы.....	61
5.3	Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой графитовой оправки в комплекте с паяльно-сварочным стержнем.....	63
5.4	Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термокарандашом.....	65
5.5	Сварочное оборудование, сварочные материалы и дополнительная оснастка для выполнения термитной сварки выводов ЭХЗ.....	72
5.6	Визуальный и измерительный контроль.....	74
5.7	Радиографический контроль.....	80
5.8	Микроскопические исследования.....	85
5.9	Глубина проплавления.....	89
5.10	Измерение твердости околошовной зоны.....	90
5.11	Измерения микротвердости.....	95
5.12	Элементный состав зоны сплавления	100
5.13	Механические испытания на сдвиг.....	103
5.14	Контактное электрическое сопротивление.....	108
	Заключение.....	112
	Список используемых источников.....	114

Перечень сокращений и обозначений

АЗ – антикоррозионная защита

МГ – магистральные газопроводы

ЭХЗ – электрохимическая защита

КЗ – катодная защита

ИП – изоляционное покрытие

СКЗ – станция катодной защиты

КИП – контрольно-измерительные пункты

МСЭС – медно-сульфатным электродом сравнения

ПЗ – протекторная защита

ДЗ – дренажная защита

ТС – термитная сварка

ТР – термитная реакция

НД – нормативный документ

ПП – переходная пластина

МТФ – многоразовая тигель-форма

ТК – термокарандаш

РТФ – разовая тигель-форма

ГО – графитовая оправка

ПСС – паяльно-сварочный стержень

ВИК – визуальный и измерительный контроль

Введение

Трубопроводный транспорт – это самый распространенный в мире способ транспортировки жидких, газообразных и сыпучих продуктов. Наибольшее количество эксплуатируемых отечественных трубопроводов – металлические и главной причиной их износа является коррозия, а видов коррозии, множество [1, 2]. Трубопровод, укладываемый в грунт, подвержен почвенной коррозии, а прокладываемый над землей – атмосферной.

К эксплуатируемым трубопроводам предъявляются высокие требования по долговечности и надежности, что определяет необходимость обеспечения их эффективной антикоррозионной защиты (АЗ). На сегодняшний день до 48 % аварий магистральных газопроводов (МГ) в России связано с коррозионными разрушениями [3]. Анализ аварий и несчастных случаев на МГ показывает, что 90 % коррозионных разрушений приходится на сварные соединения вследствие их высокой электрохимической гетерогенности и концентрации напряжений, а также некачественного выполнения сварного шва сварщиком. Таким образом, места приварки выводов АЗ газопроводов являются важной составляющей, от которой зависит их надежность и долговечность [4].

Для защиты МГ от коррозии применяются пассивные и активные методы АЗ. В качестве пассивного используются коррозионностойкие изоляционные покрытия, а к активным методам относится электрохимическая защита (ЭХЗ).

Практика эксплуатации МГ показывает, что даже в качественно выполненном изоляционном покрытии с течением времени ухудшаются диэлектрические свойства, водоустойчивость, адгезия и др. [5, 6]. Также возможны механические повреждения изоляционных покрытий МГ при засыпке в траншее, при их установке на опоры и др. Следовательно, использование только изоляционных покрытий для подземных МГ не гарантирует необходимый уровень АЗ.

На сегодняшний день осуществляется комплексная АЗ подземных газопроводов, а именно изоляционными покрытиями и средствами ЭХЗ.

ЭХЗ должна обеспечивать непрерывную во времени, в течение всего срока эксплуатации газопровода АЗ.

Для защиты МГ от коррозии наиболее подходящим считается катодный метод защиты, при котором к газопроводу привариваются специальные выводы-заземлители ЭХЗ, непосредственно через которые подключается источник внешнего тока, называемый станцией катодной защиты [7].

Надежность ЭХЗ в значительной степени определяется качеством и надежностью присоединения катодных выводов к стенке газопровода.

Наиболее технологически простым и высоконадежным способом присоединения выводов ЭХЗ к МГ является термитная сварка, поскольку она может применяться без прекращения транспорта газа на действующих газопроводах. Термитная сварка применяется с использованием следующего вида оборудования [8]:

- многоразовая тигель-форма с медной термитной смесью;
- многоразовая тигель-форма с термокарандашом;
- многоразовая графитовая оправка с паяльно-сварочным стержнем;
- разовая тигель-форма с медной термитной смесью внутри.

Термитная сварка не лишена недостатков, связанных с жесткими требованиями к содержанию влаги в термитной смеси. Кроме этого, высокая температура термитной сварки приводит к локальному изменению структуры и свойств материала газопровода, что в свою очередь может привести к снижению надежности МГ [9].

Поэтому целью работы является повышение надежности ЭХЗ МГ за счет определения оптимального способа из ныне существующих способов соединения катодных выводов ЭХЗ термитной сваркой, обеспечивающего высокое качество и минимальное изменение структуры и свойств материала трубы.

1 Причины разрушения магистральных газопроводов

1.1 Назначение и классификация газопроводов

По назначению трубопроводы, транспортирующие нефть, газ и нефтепродукты, классифицируются следующим образом [10]:

- «промысловые (для транспортирования продуктов нефтяных скважин из районов их добычи до мест потребления (трубопроводы нефтяных скважин, природного газа или нефтяного углеводородного газа и др.);

- магистральные (для транспортирования нефти, нефтепродуктов и сжиженных углеводородных газов из районов их добычи, производства или хранения до мест потребления (нефтебаз, пунктов налива, газораспределительных станций и др.)) с условным диаметром ≤ 1400 мм с избыточным давлением среды $> 1,2$ МПа (12 кгс/см²) – 10 МПа (100 кгс/см²);

- технологические (для транспортировки в пределах промышленного предприятия различных веществ (сырья, полуфабрикатов, полученных или используемых в технологическом процессе и др.), необходимых для ведения технологического процесса или эксплуатации оборудования)».

Согласно [11] газопроводы подразделяются на классы и категории (таблица 1 и таблица 2).

Таблица 1 – Классы МГ

Назначение газопровода	Класс газопровода
С рабочим давлением $> 2,5 - 10,0$ МПа ($> 25 - 100$ кгс/см ²) включительно	I
С рабочим давлением $> 1,2 - 2,5$ МПа ($> 12 - 25$ кгс/см ²) включительно	II

Таблица 2 – Категории МГ

Назначение газопровода	Категория газопровода	
	При подземной прокладке	При наземной и надземной прокладке
Диаметр < 1200 мм	IV	III
Диаметр ≥ 1200 мм	III	III
В северной строительной-климатической зоне	III	III

1.2 Характеристика газопроводов

До сих пор при обустройстве протяженных газопроводов наиболее востребованным материалом для их изготовления является сталь, обладающая множеством замечательных свойств, таких как механическая прочность, хорошая свариваемость, способность функционировать при больших значениях внутреннего давления и температуры, стойкость к сезонным изменениям погоды и др.

Наружный диаметр и толщина стенки МГ стандартизируются.

«По способу изготовления МГ подразделяются на бесшовные, диаметром < 529 мм и сварные с продольным или спиральным швом при диаметрах ≥ 219 мм [11].

При строительстве и эксплуатации из-за разнообразия климатических условий в России, газопроводы изготавливаются в обычном и северном исполнении. Для газопроводов с температурой эксплуатации ≥ 0 °С и температурой строительства \geq минус 40 °С, применяются трубы обычного исполнения. Трубы в северном исполнении применяются при строительстве газопроводов в северных районах страны с температурой эксплуатации минус 20 °С – минус 40 °С, и температурой строительства минус 60 °С» [12].

Трубы для МГ изготавливаются из углеродистых и низколегированных сталей. В соответствии с исполнением труб выбирается марка стали. Максимальная величина эквивалента углерода для труб первого и второго уровня качества должна быть $< 0,43$ %, а для труб третьего уровня качества – 0,41 %. Группы по классам прочности труб и деталей трубопроводов, применяемых на объектах ОАО «Газпром» указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Группы по классам прочности труб и деталей трубопроводов

Группы свариваемых материалов		Характеристики групп сталей (класс прочности)	Нормативное значение временного сопротивления разрыву основного металла, МПа(кгс/см ²)
1	M01	до K54 включительно	до 530 (54) включительно
2	M03	K55...K60	539...588 (55...60) включительно
3.1	M03	K65	637 (65)
3.2	M03	K70	690 (70)
Примечания: M01 - углеродистые и низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести до 360 МПа; M03 - низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести свыше 360 МПа.			

1.3 Развитие коррозионной защиты

Первые упоминания о коррозии относятся к 4 – 5 в. в. до нашей эры. Древнегреческий мыслитель Платон рассматривал ржавчину, как что-то земное, выделяющееся из металла [13, 14].

Древние римляне придумали покрывать корпуса деревянных судов пластинами из Рb, которые крепили гвоздями из Сu. Пластины подвергались коррозии, в местах их присоединения гвоздями, и отваливались.

Георг Агрикола в своих трудах 1546 г. писал: «... ржавчина является выделением металлического железа». Борьба с ней он предлагал обмазыванием трубопроводов гипсом, смолой и др. [14].

То есть уже тогда для защиты древних трубопроводов применялись пассивные методы АЗ. Методы АЗ все время совершенствовались и в начале 20 в. появилась катодная защита (КЗ), поскольку для ее реализации необходимо наличие защитного электрического тока, а первый источник постоянного тока, был изобретен в конце 18 в. итальянцами Л. Гальвани и А. Вольта [14].

Физиком Майклом Фарадеем были разработаны основы КЗ.

В 1812 г. английский химик Гемфри Дэви выдвинул гипотезу, о том, что вещества соединяются друг с другом только если они имеют противоположные электрические заряды и если положительное вещество

искусственно зарядить отрицательным зарядом, то оно не сможет вступать в коррозионные реакции, следовательно, коррозия Cu может быть остановлена, если придать ей положительный заряд. Fe или Zn оказывают защитное действие для Cu, а Zn защищает Fe. Практическое подтверждение своей гипотезы он получил в 1824 г. когда медная обшивка военных кораблей, вернувшихся с похода, выглядела как новая после того, как к ней прикрепили пластины из Zn и Fe [14].

В 1890 г. изобретателем Томасом Эдисоном была предпринята попытка реализовать КЗ с помощью внешнего источника тока, но несовершенство существующих источников тока и материалов для анода не позволили ему успешно ее завершить.

Непосредственно первая система КЗ для 300 м трубопровода была реализована в 1906 г. директором компании «Штадтверке Карлсруэ» Хербертом Геппертом с помощью генератора постоянного тока и анодных заземлителей [14].

Достоинства КЗ были признаны в мире и с 1928 г. КЗ трубопроводов уже внедрялась в США, в те же годы ЭХЗ получила распространение в Европе. С 1939 г. и по сегодняшний день КЗ успешно применяется в нашей стране [14, 15].

1.4 Коррозия и причины ее возникновения

«Коррозия (от латинского «corrosio» – «разъедание») металлов – это разрушение их поверхности в результате окисляющего воздействия окружающей среды» [2].

«В процессе эксплуатации металлические МГ подвергаются коррозии под воздействием внешних и внутренних факторов таких, как действующая коррозионная среда, статические и динамические напряжения, температура и др., сначала с образованием дефектов, их развитием и непосредственно разрушением» [2, 16].

«Следует отметить, что коррозионный процесс по своей природе – это неизбежный процесс, но необходимо применять специальные методы защиты, способные затормозить, существенно снизить или вообще прекратить воздействие коррозии, тем самым обеспечить наибольшую долговечность и надежность металлических подземных МГ» [17].

Состояние газопроводов определяется степенью коррозионного влияния на них окружающей среды и уровнем защиты от него. Степень коррозионного влияния оценивается свободной скоростью роста коррозионных повреждений в мм/год. Нормальной скоростью роста внутренних коррозионных дефектов считается до 10 мм/год, а наружных – 0,4 – 0,7 мм/год [2, 16]. За уровень защиты отвечают «пассивные и активные методы АЗ. В качестве пассивного используются коррозионностойкие изоляционные покрытия, а к активным методам относится ЭХЗ» [17].

Гарантируемой безопасностью МГ является своевременное выявление опасных коррозионных дефектов. Аварийные отказы МГ (до 48 %) происходит из-за роста коррозионных повреждений стенки газопровода [18]. Даже мелкое сквозное ржавление газопровода нарушает его герметичность, вследствие чего возникает утечка газа и, как следствие взрыв, вызывающий негативное влияние на окружающую среду или влекущий гибель людей. Ниже приводятся некоторые аварии, произошедшие на газопроводах [2].

Взрыв на газопроводе диаметром 1020 мм Бухара-Урал. Общая протяженность газопровода в двухниточном исполнении – 4537 км. Причиной аварии стали множественные коррозионные разрушения на участках значительной протяженности, вызвавшие в итоге многократную разгерметизацию газопровода (рисунок 1) [2].



Рисунок 1 – Разрушение газопровода Бухара-Урал

Взрыв на газопроводе большого диаметра 1200 – 1400 мм Средняя Азия-Центр, произошел в результате длительных перерывов в работе катодной станции, которые повлекли коррозионное разрушение газопровода (рисунок 2) [2].



Рисунок 2 – Разрушение газопровода Средняя Азия-Центр

«Взрыв на газопроводе Карадаг-Тбилиси-Ереван (протяженность – 856 км и пропускная способность – 5 млрд. м³ в год) стал следствием коррозионного влияния блуждающих токов, которые пытались подавить автоматической станцией катодной защиты, не обладающей достаточной для этого мощностью (рисунок 3)» [2, 18, 19].



Рисунок 3 – Разрушение газопровода Карадаг-Тбилиси-Ереван

1.5 Виды коррозионных процессов

«В процессе эксплуатации МГ подвержены продолжительному действию внешних природных факторов. Соответственно в металле развивается коррозия, влекущая за собой разрушение МГ и следующим за ним весомым экономическим затратам, связанных с заменой участков МГ с коррозионными повреждениями. Именно коррозия является определяющей причиной аварий, утечек газа и соответственно загрязнения окружающей среды» [20].

«Коррозия – это физико-химический процесс, вызывающий разрушение металла или изменение его свойств в результате химического или электрохимического воздействия окружающей среды [21]. Результатом этого процесса с течением времени становится изменение формы, размера, структуры и состояния поверхности металла, что, в конечном счете, и приводит к его разрушению [22]» [20]. «По механизму протекания процесса коррозию разделяют на два основных вида: химическую и электрохимическую.

Химическая коррозия образуется в результате химического взаимодействия металлов с неэлектролитами в зоне их непосредственного контакта [2, 23, 24]. Особенностью данного вида коррозии является то, что

этот процесс не сопровождается появлением электрического тока. Такие процессы наблюдаются, например, на внутренней поверхности МГ и резервуаров с нефтью и нефтепродуктами.

Электрохимическая коррозия образуется на поверхности металла при его окислении в электролите. Электролитом может служить грунтовая вода, вода рек, озер, болот, а также различные растворы кислот, щелочей, солей и др. [2, 23, 24]. Электрохимическая коррозия подразделяется на шесть видов (рисунок 4).

Коррозионный процесс данного вида коррозии сопровождается образованием электрического тока. При эксплуатации МГ наибольшее распространение получила электрохимическая коррозия. Ей подвергается наружная поверхность МГ, находящаяся под воздействием атмосферных и почвенных электролитов» [20].

«Поскольку, в МГ перемещаются коррозионно-инертных продукты, то наибольшую опасность для них представляет наружная коррозия, зависящая от способа прокладки трубопровода. Например, атмосферной коррозии подвергаются МГ, прокладываемые надземно. Атмосферная коррозия не бывает интенсивной и предотвращается нанесением на наружную поверхность МГ различных красок» (рисунок 5) [17].



Рисунок 5 – Нанесение защитной краски на наружную поверхность надземного МГ




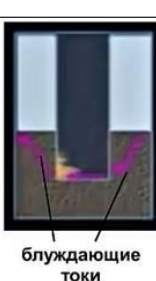
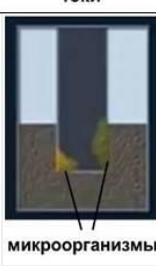
Схема	Виды электрохимической коррозии
 <p>металл электролит</p>	<p>Коррозия в электролитах – коррозия металлов в жидких средах, проводящих электрический ток. Наиболее часто в качестве жидкой среды выступают водные растворы, в которые металлические сооружения погружены полностью, частично или попеременно с течением времени.</p>
 <p>металл 1 2 электролит</p>	<p>Контактная коррозия – это коррозия металлов в присутствии электролита, вызванная непосредственным контактом двух металлов. Как правило, такие процессы происходят на границах контакта двух различающихся по своим свойствам металлов, имеющих разную коррозионную стойкость.</p>
 <p>воздух или газ</p>	<p>Атмосферная коррозия – это коррозия в атмосфере воздуха или другого газа, содержащего пары воды. Особенностью такого процесса является сильное влияние на его скорость и механизм климатических условий от которых зависит толщина слоя влаги на поверхности металла и степень увлажнения образующихся продуктов коррозии.</p>
 <p>почва</p>	<p>Почвенная коррозия – коррозия подземных металлических сооружений под воздействием почвенных электролитов. В коррозионном отношении грунт всегда должен рассматриваться, как своеобразный электролит, различающийся по составу и другим характеристикам на различных участках.</p>
 <p>блуждающие токи</p>	<p>Электрокоррозия – это коррозия металлических подземных сооружений под воздействием блуждающих токов, распространяемых по поверхности почвы от линии электрофицированных железных дорог, линий электропередач и линий катодной защиты.</p>
 <p>микроорганизмы</p>	<p>Биокоррозия – это коррозия, вызванная жизнедеятельностью микроорганизмов, вырабатывающих вещества ускоряющие коррозионные процессы. К таким микроорганизмам относятся различные бактерии, морские водоросли, грибы, лишайники, мхи и др.</p>

Рисунок 4 – Виды электрохимической коррозии

«Как правило, большая часть МГ располагается под землей. Чаще всего при эксплуатации подземных газопроводов наблюдаются следующие виды коррозии, которые чуть ниже будут рассмотрены более подробно:

- коррозия в почвенном электролите;
- микробиологическая коррозия;
- коррозия под действием блуждающих токов» [20].

1.6 Коррозия в почвенном электролите

Наиболее распространенным видом коррозии при эксплуатации МГ является коррозия в почвенном электролите, поскольку «даже качественное ИП имеет неплотности, через которые просачивается влага из почвы.

Развитие коррозии в почвенном электролите имеет ряд особенностей. «Почвенная коррозия определяется действием макропар, возникающих из-за неоднородности протяженной металлической поверхности и микропар, образующихся из-за структурной неоднородности металла по физическим свойствам и химическому составу. Причинами неоднородности являются различная по протяженности глубина залегания МГ, различная воздушная проницаемость и степень увлажнения отдельных участков грунта, разный состав почвы (песок, суглинок, глина и др.). Считается, что почвенная коррозия МГ протекает за счет работы макропар. Все перечисленные особенности приводят к появлению в разных местах МГ анодных и катодных участков, то есть мест с разным электрохимическим потенциалом (рисунок б). В результате на анодах или на участках с более отрицательным потенциалом развивается коррозия и, соответственно, местное разрушение» [17].

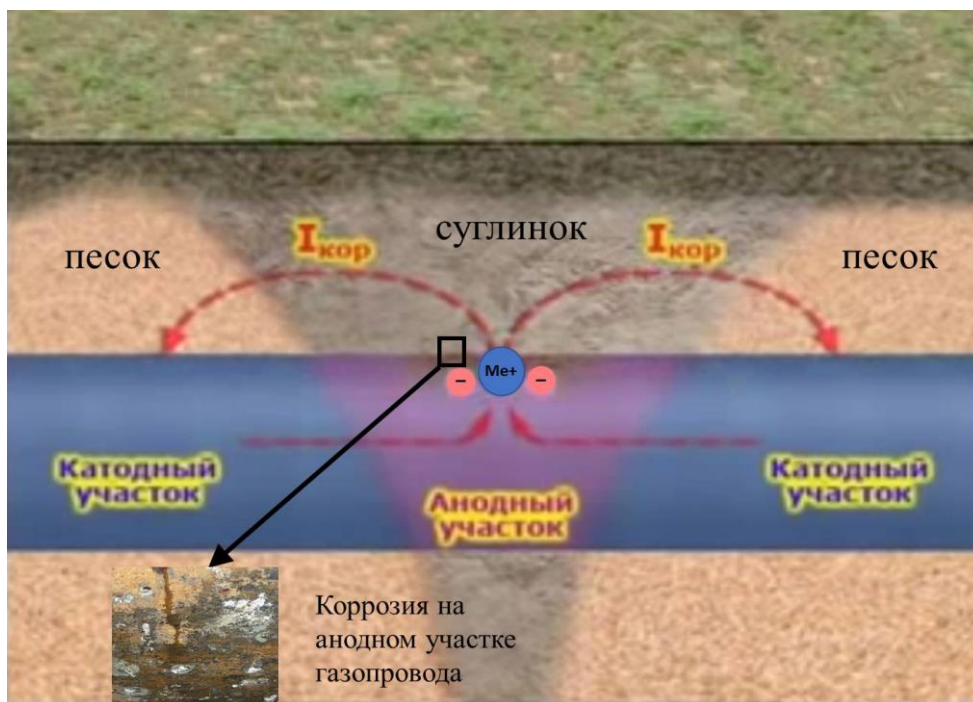


Рисунок 6 – Схема образования коррозии в почвенном электролите

1.7 Микробиологическая коррозия

«Микробиологическая коррозия, связана с продуктами жизнедеятельности бактерий, находящихся в почве и, ускоряющих действие коррозионных процессов вблизи пролегающих МГ.

Существуют два вида бактерий: анаэробы, организмы, способные жить и развиваться при отсутствии свободного кислорода и получающие энергию для жизнедеятельности расщеплением органических и неорганических веществ и аэробы, организмы способные жить и развиваться только при наличии свободного кислорода. Бактерии разрушают ранее созданные пассивные защитные пленки на поверхности МГ.

Также в местах скопления бактерий на МГ образуются участки с продуктами их разложения в виде пленок и, обладающие более высоким потенциалом, чем металл МГ, что, соответственно, приводит к активизации анодного процесса и растворению железа (рисунок 7)» [17].

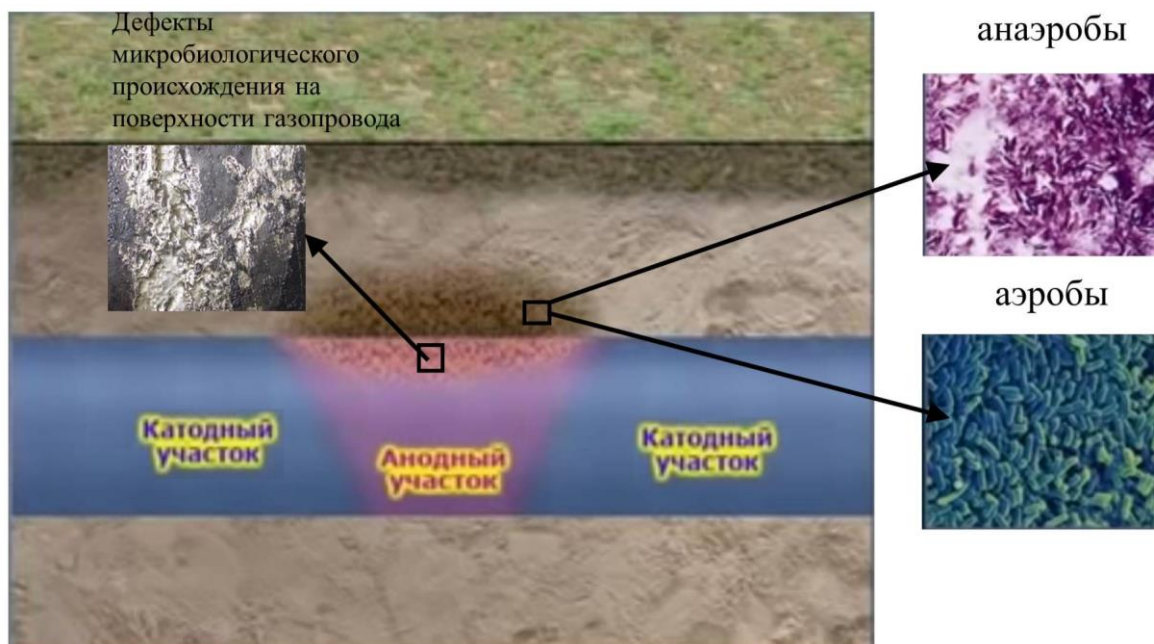


Рисунок 7 – Схема образования микробиологической коррозии

1.8 Коррозия под действием блуждающих токов

«Коррозия металлических подземных сооружений под воздействием блуждающих токов, которые распространяются по поверхности почвы и возникают от следующих источников: линий электрофицированных железных дорог, линий электропередач и линий катодной защиты, поэтому такая коррозия еще называется электрокоррозия.

При работе электротранспорта ток в идеальном случае протекает по цепи: положительная шина тяговой подстанции – контактный провод – токосъемник и двигатель транспортного средства – рельсы – отсасывающая линия – отрицательная шина тяговой подстанции (рисунок 8). Однако, в действительности часть тока, вместо отсасывающей линии, стекает в землю и протекает по расположенному вблизи МГ, из-за увеличения сопротивления рельсовой цепи, низкого переходного сопротивления рельс и грунта. Соответственно, на МГ образуются катодные и анодные участки.

Блуждающие токи протекают по небольшой площади поверхности МГ, что приводит к образованию на металле глубоких язв в течение короткого времени, соответственно, представляют большую опасность и требуют постоянного периодического контроля [25]» [17].

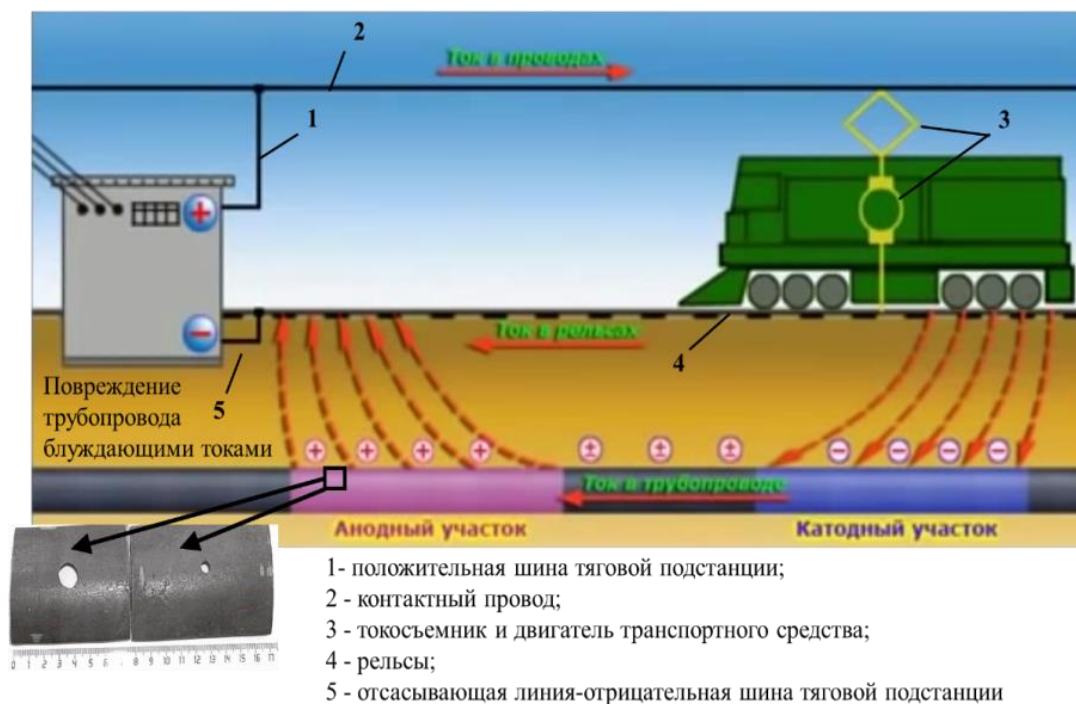


Рисунок 8 – Схема образования блуждающих токов

«В результате проведенного анализа причин образования коррозии, можно сделать вывод, что наибольшую опасность представляет коррозия от блуждающих токов, когда образующиеся глубокие язвы быстро превращаются в сквозные отверстия, влекущие утечки транспортируемого газа и разрушение МГ, сопровождающееся взрывами и пожарами. Но часто на МГ могут воздействовать несколько причин образования коррозии одновременно, что требует использовать комплексной совместной и пассивные и активные антикоррозионной защиты.

Поскольку, как показывает статистика, до 48 % аварий МГ в России связано с коррозионным разрушением, а причиной каждой третьей аварии подземных МГ является электрохимическая коррозия, то вопрос защиты МГ от коррозии весьма актуален» [13].

В первой главе магистерской диссертации дана характеристика МГ и их назначению. Также глава посвящена выявлению причин коррозии МГ, описанию основных видов коррозии, возникающих при подземной прокладке МГ и определение наиболее опасного вида коррозии.

2 Способы защиты магистральных газопроводов от электрохимической коррозии

2.1 Анतिकоррозионная защита

«Коррозия подземных МГ – это неизбежный процесс, однако, применение комплексного механизма АЗ может затормозить коррозионные процессы на длительное время [2]. КЗ МГ должна обеспечивать безаварийную работу на весь период их эксплуатации.

Для защиты МГ от коррозии необходимо применять научно-обоснованные и практически оправданные методы, такие как пассивные и активные методы АЗ [20].

Пассивные методы АЗ основаны на создании непроницаемого барьера между металлом МГ и грунтом, который достигается нанесением специальных защитных покрытий: битум, эпоксидные смолы, полимерные ленты, заводские изоляционные покрытия и др. [2]. Активные методы АЗ основаны на смещении потенциала катода до потенциала анода или в более электроотрицательную сторону, с применением средств ЭХЗ» [20].

2.2 Изоляционные покрытия

Для того, чтобы предотвратить контакт МГ с почвенным электролитом, то есть получить разрыв электрической цепи микро- и макрокоррозионных элементов на поверхность МГ наносят изоляционное покрытие (ИП). ИП должны обладать диэлектрическими свойствами и удовлетворять ряду перечисленным ниже требованиям [16, 26].

Сплошность ИП – предотвращение коррозии по всей длине подземного МГ.

Водонепроницаемость ИП – предохранение от контакта поверхности МГ с электролитом через поры ИП.

Адгезия ИП – обеспечение плотного соединения ИП с поверхностью металла МГ. Потеря адгезии ведет к уменьшению сопротивляемости ИП механическим воздействиям и, соответственно, проникновению под него электролита.

Растяжимость ИП характеризует пластические свойства, а пенетрация ИП – механические свойства покрытия.

Химическая стойкость ИП – обеспечение защиты МГ от наиболее агрессивных почвенных электролитов.

Термостойкость ИП – обеспечение сохранности характеристик при различных температурных режимах и климатических особенностях, то есть ИП не должно размягчаться при высоких температурах и становиться хрупким при низких.

На сегодняшний день применяются двух- и трехслойные ИП заводского исполнения, конструкция которых представлена на рисунке 9. Двухслойные ИП состоят из адгезионного подслоя из термопластичных полимерных композиций и защитного слоя из экструдированного полиэтилена. В трехслойных ИП помимо адгезионного и защитного слоев присутствует грунтовочный слой на основе эпоксидной смолы. Слои ИП наносятся на очищенные и нагретые до определенной температуры трубы методом напыления или экструзии. Минимальная общая толщина покрытия зависит от диаметра трубы и определяется в соответствии с НД [27].

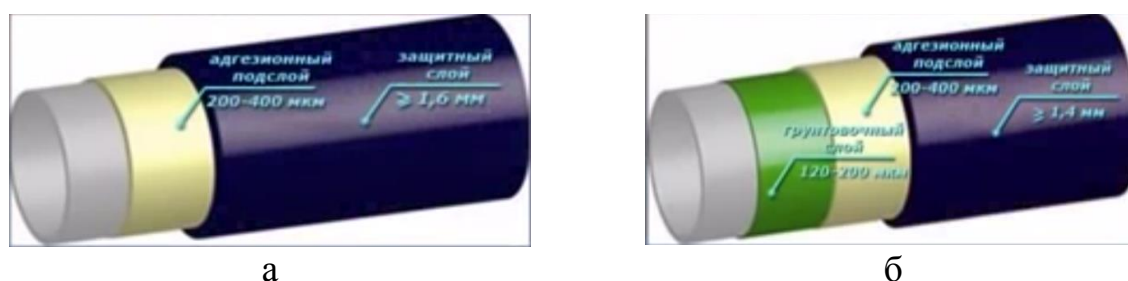


Рисунок 9 – Конструкция двух- (а) и трехслойных (б) ИП заводского исполнения

Несмотря на применение разнообразных ИП, с течением времени их диэлектрические параметры снижаются, что соответственно, приводит к

коррозии МГ. Использование средств ЭХЗ помогают затормозить или совсем прекратить коррозионные процессы, на поверхности МГ, и тем самым, продлить срок службы ИП. ЭХЗ МГ включает три способа защиты:

- катодная;
- протекторная;
- дренажная.

2.3 Катодная ЭХЗ

«КЗ металлических МГ является основным средством ЭХЗ от почвенной коррозии. Основными элементами КЗ считаются:

- источник электроснабжения;
 - станция катодной защиты (СКЗ) – источник защитного тока;
 - дренажные линии постоянного тока (катодная и анодная);
 - анодное заземление;
 - контрольно-измерительные пункты (КИП) в точке дренажа источника защитного тока и на площадке анода-заземления;
 - блоки дистанционного контроля и регулирования параметров защиты
- рисунок 10 [28].



Рисунок 10 – Основные элементы установки катодной защиты

Необходимые условия работы КЗ – это наличие электрических контактов между проводниками и почвенным электролитом, то есть между защищаемым МГ и анодным заземлением.

КЗ – это способ защиты подземных сооружений, в данном случае МГ, принудительно создаваемой «катодной поляризацией с помощью регулируемого внешнего источника постоянного тока, представляющего собой специальный выпрямитель-преобразователь переменного тока промышленной частоты в постоянный ток поляризации» [20].

Ток, протекающий в цепи: положительный полюс источника – анод – грунт – МГ – отрицательный полюс источника, называется защитным током (рисунок 11). «Величина защитного тока должна обеспечивать требуемый диапазон значений поляризационных потенциалов на всем защищаемом участке и в течение всего срока эксплуатации МГ» [20].

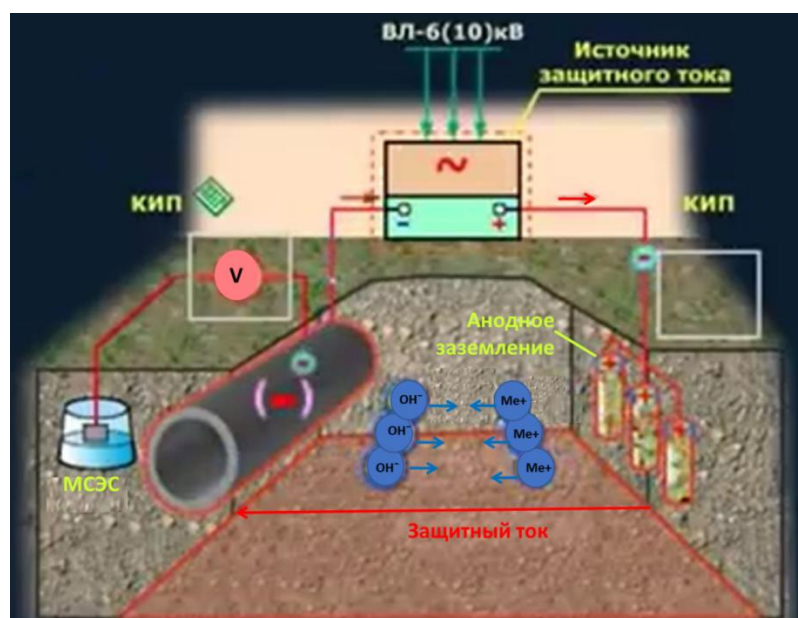


Рисунок 11 – Принципиальная схема катодной защиты

При КЗ МГ поляризуется отрицательно и его потенциал сдвигается до такой величины, при которой «процесс коррозии металла значительно снижается или подавляется полностью» [20]. Для этого МГ присоединяют с отрицательным полюсом источника тока, и становится катодом, а положительный полюс источника присоединяют к анодному заземлению, которое находится в такой же электролитической среде, что и МГ. «В

результате поляризации происходит растворение металла анода, а не МГ» [20].

В качестве растворимых используют поверхностные, глубинные или протяженные аноды (рисунок 12). Выбор анода зависит от удельного сопротивления грунта. Поверхностный анод представляет собой металлический контейнер с коксоминеральным активатором, в котором размещен ферросеридовый электрод. Глубинный анод – это несколько поверхностных заземлителей, собранных в гирлянду и установленных в пробуренную скважину. Протяженный анод – это токопровод с покрытием из эластомерных материалов. Срок службы таких анодов от 15 до 30 лет.

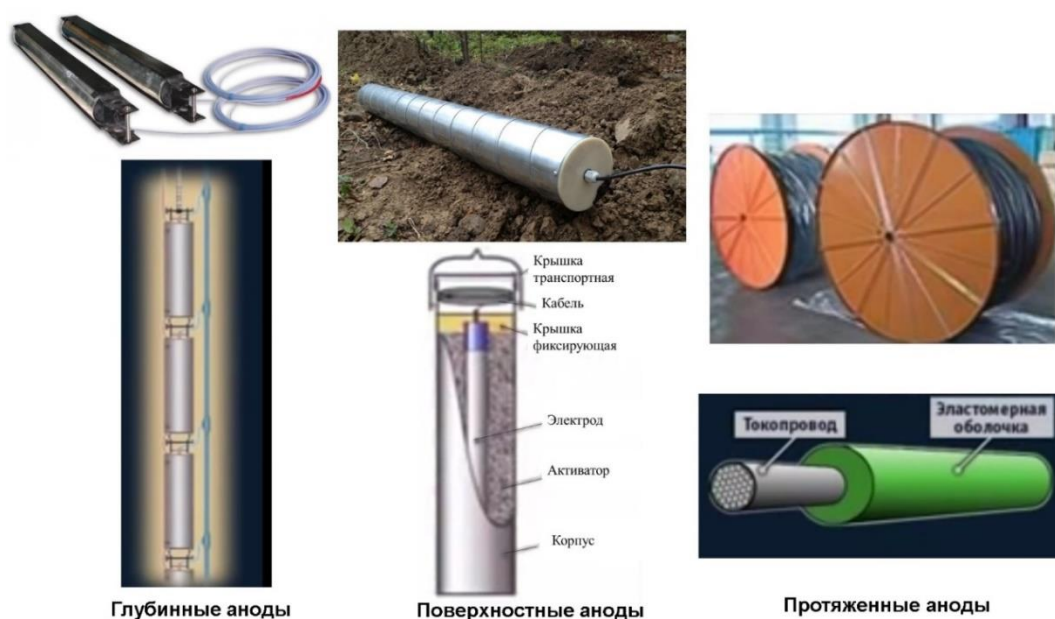


Рисунок 12 – Типы анодных заземлений

Поляризационный потенциал – это потенциал МГ без учета сопротивления грунта, сопротивления поляризации катода и анода. Контроль работы и регулирование КЗ происходит за счет измерения и поддержания на заданном значении поляризационного потенциала для каждого конкретного МГ, который замеряют между МГ и медно-сульфатным электродом сравнения (МСЭС) на КИП. Для этого измеритель потенциала подключается к МГ и переносному или стационарному неполяризующемуся МСЭС с

датчиком электрохимического потенциала [28, 29]. Переносной электрод сравнения изготавливается в виде цилиндрической емкости из изоляционного материала и имеет внутри стержень из красной меди, находящейся в растворе насыщенного медного купороса. Стационарные электроды сравнения устанавливаются в грунт на глубину от 80 см до 3 м с выводом проводников в КИП. КИП располагаются равномерно по всей протяженности МГ, в соответствии с монтажной схемой и конструктивно представляет цилиндрическую стойку из трубы с закрытой клеммной панелью (рисунок 10). Все соединения в измерительных целях ЭХЗ преимущественно выполняются кабелями из меди сечением не менее 6 мм^2 термитной сваркой с образованием привари сечением не менее 35 мм^2 .

Пример схемы системы ЭХЗ подземного МГ с помощью СКЗ представлен на рисунке 13.

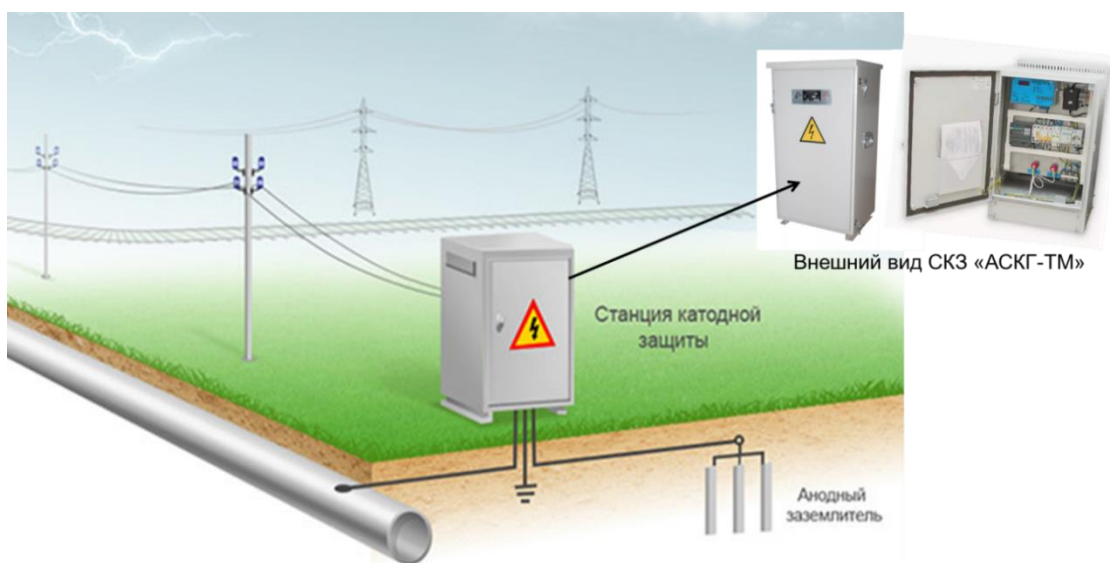


Рисунок 13 – Схема системы ЭХЗ подземного МГ с помощью СКЗ

СКЗ устанавливается на поверхности земли недалеко от газопровода, подключается к электросети 220 В и ей вырабатывается ток КЗ с заданными параметрами по электрической цепи анодное заземление – грунт – изоляция объекта защиты. СКЗ прошлых лет – это громадные трансформаторы,

работающие с частотой 50 Гц и тиристорными выпрямителями. Минусом таких СКЗ является несинусоидальная форма генерируемой энергии.

Современные СКЗ – это инверторные преобразователи с микропроцессорным управлением и их преимуществом является меньшая амплитуда и уровень пульсации производимого тока. СКЗ имеют различные функциональные особенности и технические параметры, которые можно регулировать вручную, заменяя трансформаторные обмотки или автоматизированном, если в схеме станции присутствуют тиристоры [30].

Наиболее совершенные и популярные в России считаются СКЗ «Минерва-3000» и СКЗ «АСКГ-ТМ». Обе станции имеют при весе 50 кг скромные габаритные размеры 500×400×900 мм. Срок эксплуатации современных СКЗ более 20 лет [31].

2.4 Протекторная ЭХЗ

Протекторная защита (ПЗ) подземных МГ от почвенной коррозии применяется для малопротяженных МГ и там, где нет источника электроснабжения. Установка ПЗ обычно состоит из:

- одиночных или группы протекторов;
- протяженных протекторов и их групп;
- соединительных проводов и кабелей;
- КИП;
- блоков регулирования.

ПЗ заключается в образование замкнутой электрической цепи между МГ и протектором, которые размещаются в грунте, то есть в электролитической среде и возникновении между ними электрического тока из-за использования материалов с различными электрохимическими потенциалами (рисунок 14). Таким образом, электроны движутся от анода к катоду через КИП. Ток коррозии протекает от трубопровода к протекторам и далее в грунт. Обязательное условие ПЗ – это наличие перехода ионов

металла с анода в электролит, то есть разрушение металла протектора [32]. Для увеличения ПЗ анод помещают в активаторы из смеси солей, позволяющие увеличить ток и протяженность зоны защиты.

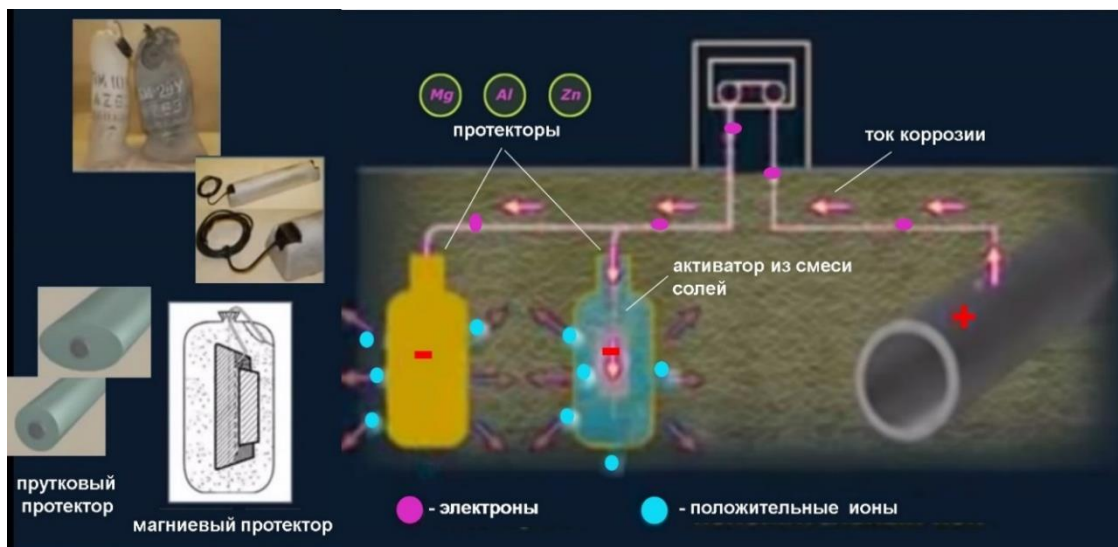


Рисунок 14 – Принципиальная схема ПЗ

Для электрического соединения системы ПЗ применяют проводники из Mg, Al, Zn. Однако, Mg обладает низкой токоотдачей, а Al и Zn склонны к образованию поверхностных оксидных пленок. Поэтому их легируют. Легированные сплавы обладают более отрицательными потенциалами, чем металл Mg.

Протектор – это чаще всего сплав Mg, с порошкообразным активатором, упакованным в хлопчатобумажный мешок (рисунок 14).

2.5 Дренажная защита

Защита от блуждающих токов или дренажная защита (ДЗ) – это основное средство защиты подземных МГ от блуждающих токов.

«ДЗ заключается в отводе блуждающих токов от защищаемого МГ к источнику этих токов через электродренажные соединения (рисунок 8). Электрическое соединение рельсов и анодной зоны МГ называется дренажным, а ток, который будет протекать между ними – ток дренажа» [20].

Принцип действия станций ДЗ схож с работой СКЗ. В состав систем ДЗ входят (рисунок 15):

- установка дренажной защиты;
- соединительные провода и кабели;
- КИП;
- блоки регулирования.



Рисунок 15 – Элементы ДЗ

Ток дренажа зависит от разности потенциалов и дренажного сопротивления между МГ и рельсов. Если электродренажные соединения отсутствуют, то ток, вытекающий с анодной зоны МГ, преодолевает все время, изменяющееся из-за изменения влажности и температуры грунта, большое сопротивление между МГ и рельсами. В результате чего все время изменяется величина тока, вытекающего с рельсов на МГ, а электроны,двигающиеся в направлении противоположном направлению дренажного тока, смещают потенциал анодной зоны МГ в отрицательную область. То есть большая часть тока с МГ будет протекать по дренажному соединению, а не попадать в грунт, что, в конечном счете, и приводит к снижению интенсивности коррозии.

Все станции ДЗ, применяемых на МГ, являются автоматическими и подразделяются по регулированию направления тока или потенциала.

Изменения в режиме работы источника блуждающего тока свидетельствуют о необходимости проведения реконструкции системы ЭХЗ [33].

Во второй главе магистерской диссертации рассмотрены известные способы защиты МГ от электрохимической коррозии.

Таким образом, на сегодняшний день для защиты подземных газопроводов от электрохимической коррозии применяется непрерывная во времени и в течение всего срока эксплуатации комплексная АЗ. А именно, изоляционные покрытия и катодная ЭХЗ, при которой к газопроводу привариваются специальные катодные выводы-заземлители, через которые подключается источник внешнего тока – СКЗ. Надежность ЭХЗ в значительной степени определяется качеством и надежностью присоединения катодных выводов к стенке газопровода. Все соединения в цепях ЭХЗ выполняются преимущественно проводами из меди сечением не менее $6,0 \text{ мм}^2$.

3 Критический анализ существующих способов сварки выводов ЭХЗ к магистральным газопроводам

Допустимыми способами присоединения выводов ЭХЗ к МГ, согласно действующим нормативным документам (НД) [34, 35, 36, 37] являются:

- ручная дуговая сварка, обычно с основным покрытием электродов;
- конденсаторная сварка;
- термитная сварка.

3.1 Ручная дуговая сварка выводов ЭХЗ

Схема ручной дуговой сварки с основным видом покрытия (РД) вывода ЭХЗ к кольцевому стыковому сварному шву МГ через переходную пластину (ПП) представлена на рисунке 16 [34].

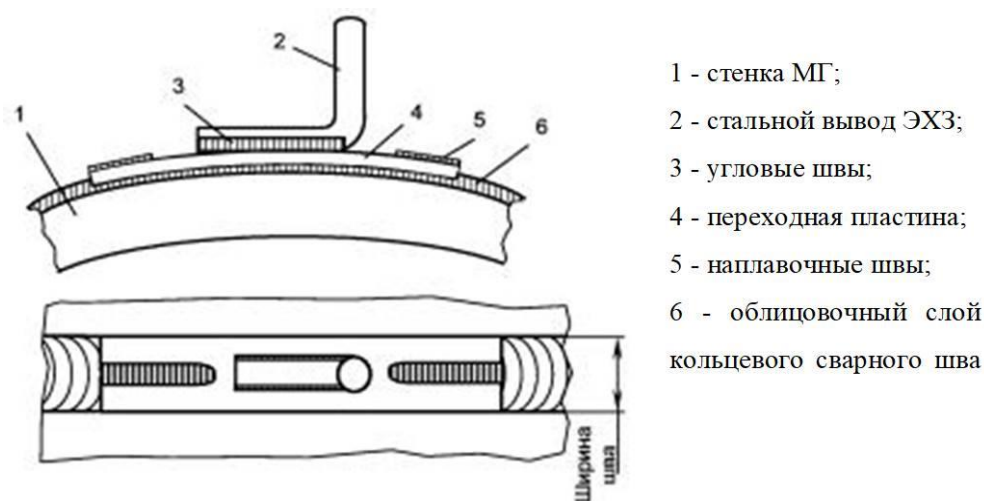


Рисунок 16 – Схема приварки вывода ЭХЗ к кольцевому стыковому сварному шву МГ через ПП

Сначала необходимо подготовить ПП из низкоуглеродистой стали (ВСтЗсп, сталь 10, сталь 20 и др.) толщиной 3,0 – 4,0 мм. Конструктивные размеры ПП приводятся на рисунке 17. Поперечное сечение ПП должно соответствовать форме усиления кольцевого стыкового сварного шва МГ, а продольное – форме диаметра МГ.

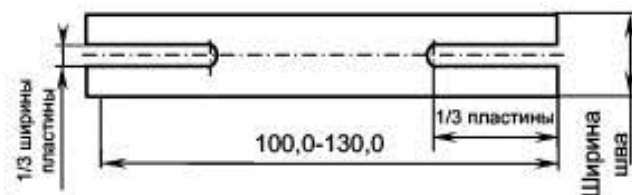


Рисунок 17 – Конструктивные размеры ПП для приварки выводов ЭХЗ к кольцевому стыковому сварному шву МГ

Затем «зачистить механическим способом поверхности ПП с наружной и внутренней стороны до металлического блеска. Удалить усиление облицовочного слоя кольцевого стыкового сварного шва МГ напильником или шлифовальной машинкой до образования гладкой поверхности шириной не менее ширины пазов ПП и длиной не менее длины ПП. ПП установить по оси кольцевого стыкового сварного шва МГ и в центре пазов ПП произвести по одной прихватки с каждой стороны. Прихватки и последующую сварку производить РД электродами диаметром 2,6 – 3,2 мм, которые разрешены к применению при сварке заполняющих и облицовочных слоев кольцевых стыковых сварных швов МГ. Затем произвести сварку ПП к кольцевому сварному шву МГ с полным заполнением пазов и проплавлением металла не менее чем 1,5 мм с каждой стороны» [34]. Глубина проплавления металла при РД может достигать 6,0 мм, в отличие от ТС, при которой она не превышает 2,0 мм [37]. По этой причине, «приварка выводов ЭХЗ РД осуществляется к кольцевому шву, а не к продольному, поскольку при эксплуатации МГ возникающие в нем напряжения в два раза меньше. Зафиксировать вывод ЭХЗ по оси центральной части ПП и произвести сварку угловыми швами. Катет углового шва должен соответствовать диаметру вывода ЭХЗ.

После сварки все сварные швы ПП зачищаются металлической щеткой от шлака и брызг металла и проводится визуальный измерительный контроль» в соответствии с [34].

Прочность наплавки проверяется путем многократного изгиба приваренного катодного вывода.

Достоинствами данного способа присоединения выводов ЭХЗ являются достаточно высокая прочность и надежность соединения. К недостаткам данного способа можно отнести высокое переходное сопротивление в месте контакта, нежелательные металлургические процессы, приводящие к изменению структуры и свойств околошовной зоны кольцевого сварного соединения, а также увеличение металлоемкости, за счет приварки ПП.

3.2 Конденсаторная приварка выводов ЭХЗ

«Конденсаторная приварка выводов ЭХЗ может применяться по отдельным технологическим инструкциям, согласованным с ПАО «Газпром» и разработчиком стандарта» [34].

Приварка осуществляется в определенной последовательности. Сначала конец контактного вывода, который будет присоединяться к МГ, заостряется под конус с углом при вершине $170 - 175^\circ$ механическим путем. Затем «кольцевой шов в месте присоединения отвода должен быть очищен от изоляции и обработан напильником на глубину не более $0,5 - 0,7$ мм». На подготовленное место для приварки устанавливается контактный вывод. Сварочный пистолет устанавливается на контактный вывод и производится приварка путем нажатия кнопки на пистолете, цепь замыкается и под воздействием электрического тока осуществляется приварка. Продолжительность сварки составляет 3 мс. По окончании сварки место присоединения отвода осматривается и проверяется надежность присоединения путем двух- или трехкратного изгиба. Пример конденсаторной приварки выводов ЭХЗ представлен на рисунке 18.

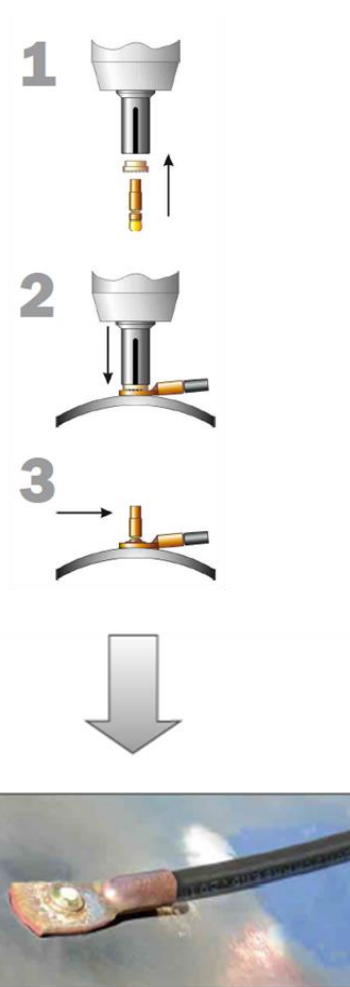


Рисунок 18 – Конденсаторная приварка выводов ЭХЗ

Применяются следующие отечественные установки для конденсаторной приварки выводов ЭХЗ: К747МВ, ЭХЗ-КТС, НГК-УКПВ ЭХЗ, УТП-ДУ-НГК. Пример комплекта оборудования ЭХЗ-КТС представлен на рисунке 19.

К работе на установке допускаются операторы, прошедшие специальную подготовку.

Данный метод присоединения выводов ЭХЗ исключает перегрев металла МГ и обеспечивает минимально возможное проплавление металла МГ от 0,3 до 0,5 мм.

Минусом является закупка специализированного дорогостоящего оборудования, кабельных наконечников, пресс-клещей.

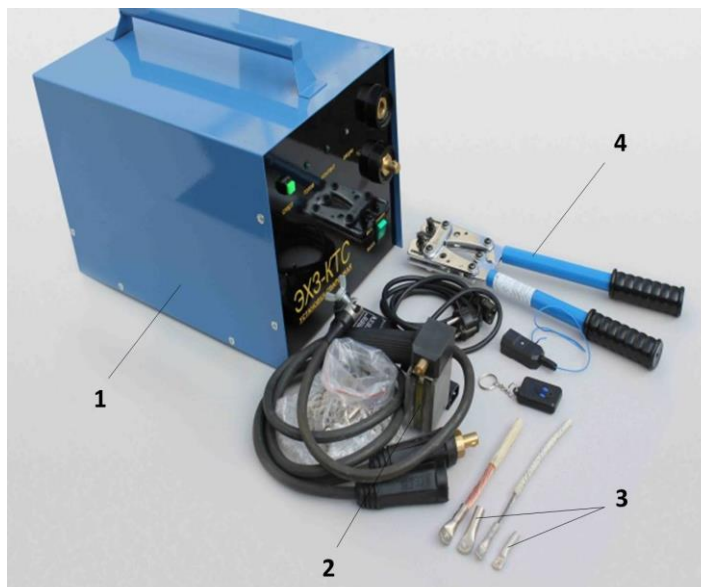


Рисунок 19 – Комплект оборудования ЭХЗ-КТС для конденсаторной сварки:
 1 - блок управления и зарядки, 2 - сварочный пистолет,
 3 - кабельные наконечники, 4 - пресс-клещи

3.3 Термитная сварка выводов ЭХЗ

3.3.1 Сущность процесса термитной сварки

«Термитная сварка (ТС) – процесс сварки металлических деталей жидким металлом заданного химического состава, получаемого в результате термитной реакции (ТР)» [38, 39, 40].

«Сущность термитной или по-другому алюминотермической реакции заключается в возможности Al восстанавливать оксиды металлов с выделением тепла, за счет чего, потенциальная энергия компонентов реакции изменяется, и они рекристаллизуются. Выделившаяся теплота некоторое время сохраняет металл в жидком перегретом состоянии, что позволяет применять данный расплав для специальных технологических целей» [38, 39].

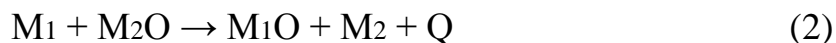
$$Q = (U_1 - U_2) - A \quad (1)$$

где Q – теплота реакции.

$U_1 - U_2$ – изменение энергетического состояния материалов;

A – работа рекристаллизации компонентов

ТР горения отличается от обычной реакции горения тем, что она может протекать в замкнутых системах или даже в вакууме, поскольку происходит за счет кислорода, содержащегося в оксидах металлов. ТР протекает следующим образом [38, 39]:



где M_1 – Al или любой другой металл, стоящий левее в ряду напряжений химических элементов: K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Si, Cr, S, Fe, Co, Ni, Sn, Pb, H, Cu;

M_2O – окислы железа FeO и Fe₂O₃;

M_1O – окись алюминия Al₂O₃;

M_2 – Fe или любой другой металл, стоящий правее в ряду напряжений химических элементов;

Q – теплота реакции.

В качестве горючего ТР, называемого термитной смесью или термитом, применяется порошкообразный металлический Al с различными добавками для легирования свариваемой стали, и FeO или Fe₂O₃ в виде окалины. Применение Al обусловлено тем, что он является одним из самых распространенным химическим элементом. Порошок Al при нагревании быстро окисляется, образуя Al₂O₃, с выделением тепла порядка 378 ккал/моль, и температуры порядка 3000 °С.

Для начала ТР необходимы следующие условия [38]:

- «количество термитной смеси должно быть достаточным для перегрева и расплавления продуктов ТР.

- термитная смесь перед сваркой должна быть тщательно перемешана.

- началом быстрого распространения реакции служит температура ≥ 1350 °С».

«В процессе ТР часть тепла расходуется на нагревание стенок тигля, лучеиспускание и др., но, тем не менее, продукты реакции имеют температуру 2600 – 2700 °С, которой достаточно для получения чистого

металла, который опускающегося на дно тигля, а жидкий шлак всплывает на поверхность» [41].

Качество наплавленного металла определяется свойствами компонентов смеси. Например, легирующие элементы Si, Mn раскисляют термитную сталь, ферросплавы повышают прочность за счет образования мелкозернистой карбидной фазы Ti и V.

Продолжительность ТР с момента зажигания термита до отделения металла от шлака зависит от количества используемого термита и составляет 15 – 50 с.

По назначению термитные смеси условно разделяют на шесть групп [38, 42]:

- «элементарная (окалина Fe и Al порошок);
- для сварки рельсов. В шихту вводятся стальная малоуглеродистая стружка, ферромарганец, порошкообразный графит;
- для сварки легированных сталей. В качестве присадки используются ферротитан, феррованадий и др.;
- для сварки чугуна. В присадку вводится значительное количество Si;
- для сварки высокомарганцовистых сталей. В термит вводится ферромарганец и чугунная стружка;
- специального назначения».

3.3.2 Возникновение и развитие термитной сварки

История ТС ведет свое начало с 1865 г., когда русский химик Н. Н. Бекетов, изучая явление вытеснения одних элементов другими установил, что Al может восстанавливать металлы, стоящие правее его в таблице напряжений химических элементов (см. выше) из их оксидов. Н. Н. Бекетов доказал, что шихта из Al и оксида Fe горит при температуре несколько тысяч градусов и превращается в Fe и шлак. Реакция протекает с выделением большого количества теплоты, поэтому от греческого *therme* (тепло, теплота)

реакция получила название термитная. Вместо Al можно также использовать Mg, а восстанавливать Cr, V, Ti и др. [39, 41, 43].

В 1898 г. в Германии Г. Гольдшмидт впервые произвел ТС двух железных брусков, а через три года сварку рельсов. В 1904 г. в США ТС уже применялась при изготовлении перекрытий мостов, двигателей корабельных якорей, паровых машин и др., а во Франции при прокладке путей Парижского метрополитена [39, 40, 41, 43, 44].

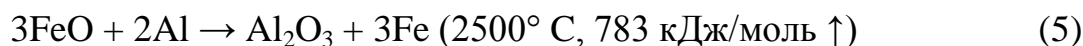
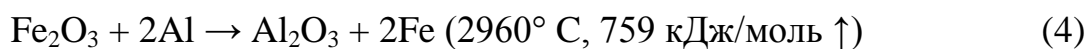
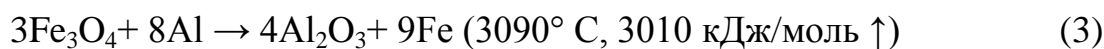
В 1915 г. ТС применили при строительстве Московского метро тогда было сварено 126 стыков.

До 1925 г. ТС производилась с помощью импортных термитов, пока инженер М. А. Карасев не предложил рациональный способ производства отечественных термитных смесей, которые показали свое преимущество перед импортными при сварке рельсов метрополитена.

3.3.3 Применение термитной сварки

ТС является уникальным методом благодаря тому, что для ее выполнения не нужно наличие электрической энергии, ее можно производить непосредственно на месте монтажа, процесс сварки происходит за короткое время, сварные соединения имеют хорошую механическую прочность и коррозионную стойкость. В некоторых случаях ТС является лучшим, а иногда и единственно возможным методом при решении конкретных задач [44 – 48]. Например, ТС используется для стыковой сварки железнодорожных рельсов, соединения электропроводников, а также разнородных металлов и крупных деталей из чугуна или стали (рулевых рам, карданных валов, шестерен прокатного стана, валов и др.) [49]. Ремонтная сварка тяжелых отливок является еще одной важной областью применения для ТС, при которой тигель-форма изготавливается индивидуально для каждого конкретного сварного шва, чтобы соответствовать форме деталей.

Наибольшее распространение ТС получила при сварке рельсов. Сущность технологического процесса ТС практически не изменялся уже больше ста лет. Реакции этого процесса, следующие [46, 47, 48, 50, 51]:



Чаще всего используется первая из этих реакций. Такая смесь обычно содержит 3 весовые части оксида железа и одну часть алюминиевого порошка. При воспламенении получаем теоретическую температуру 3090 °С.

Тигель-форма для осуществления термитной сварки рельса представлена на рисунке 20.



а



б

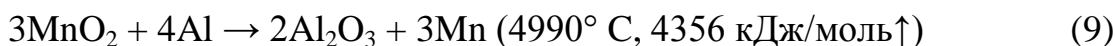
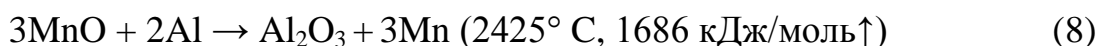
Рисунок 20 – Тигель-форма во время проведения термитной сварки рельса (а), получившийся сварной шов термитной сварки рельса (б)

Сначала выполняется обрезка рельса механическим способом. Концы рельсов устанавливаются с зазором 25 ± 1 мм, и производится их выравнивание по вертикальной и горизонтальной плоскостям. Затем торцы рельсов тщательно очищаются от ржавчины, масел и других загрязнений металлической щеткой. Для компенсации усадочных деформаций сварного соединения на концах рельсов создается обратный изгиб путем их поднятия в 1,5 – 2,5 мм зоне формирования сварного соединения.

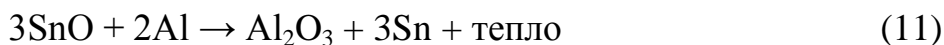
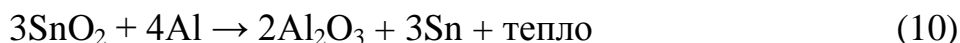
На образовавшийся зазор устанавливаются две специальные огнеупорные литейные полуформы. Места контакта литейных полуформ с рельсами уплотняются песком. Для осуществления предварительного

подогрева концов рельс на специальных стойках располагают газовую горелку, а над литейными формами размещают предварительно просушенный тигель. В тигель засыпается термитная смесь, состав которой по химическому составу схож со свариваемым рельсом и поджигается термитной спичкой. ТР протекает порядка 20 – 28 с. Расплавленная сталь выливается в зазор, заполняя объем между рельсами, а шлак отводится за пределы сечения сварного соединения. По мере остывания сталь кристаллизуется и концы рельсов свариваются между собой. После чего производится демонтаж оснастки и литейного оборудования. Сваренный стык сначала шлифуется по горячему металлу, а после полного остывания шлифуется окончательно в соответствии с требованиями к допускам по геометрии профиля рельса.

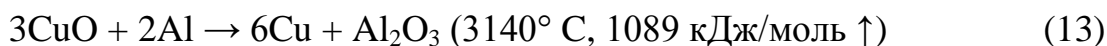
Хотя при ТС в основном используется оксид железа, однако оксиды хрома, никеля и марганца также могут быть использованы:



М. F. Rejdaк использовал метод ТС для оксида олова с использованием следующих реакций [52]:



Другое важное применение ТС – сварка алюминиевых и медных электропроводников. М. Suban и др. выполнили соединение стальной поверхности и медного проводника по следующей химической реакции [53]:



Процесс ТС электропроводников показан на рисунке 21 и включает в себя следующие этапы:

- два конца электропроводника, которые необходимо соединить, устанавливаются в графитовую форму (рисунок 21, а);
- в графитовую форму укладывается без перекосов металлическая мембрана и засыпается термитная смесь (рисунок 21, б, в);
- крышка графитовой формы закрывается, производится поджиг термитной смеси и начинается экзотермическая реакция (рисунок 21, г, д);
- графитовая форма, а затем и шлак удаляются.
- готовое сварное соединение (рисунок 21, е).

Для изготовления сварочной многоразовой графитовой формы используется графит с низкой адгезией, способный применяться при высоких температурах и использоваться длительный срок легкая очистка от шлака, Основным недостатком графитовой формы является высокая теплопроводность графита.

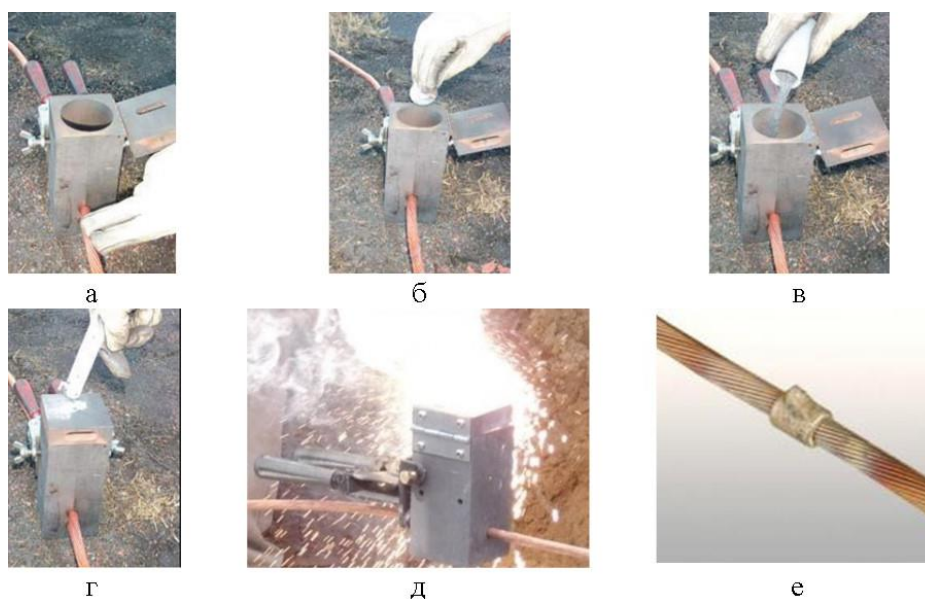


Рисунок 21 – Последовательность термитной сварки алюминиевых электропроводников

После воспламенения время ТР составляет около 10 – 20 с. Образующееся тепло вызывает расплавление термитного порошка и концов двух электропроводников, располагающихся в нижней части графитовой формы. После затвердевания расплавленного металла два проводника соединяются вместе.

В качестве соединения разнородных материалов, рассматривается приварка выводов ЭХЗ. Вывод ЭХЗ представляет собой медный или латунный провод, который укладывают на поверхность трубы из низколегированной стали и приваривают ТС.

Процесс ТС по приварке выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы и медной термитной смеси к МГ показан на рисунке 22 и включает в себя следующие этапы:

- очистка, шлифование и сушка поверхности газопровода, и установка предварительно зачищенного от изоляции вывода ЭХЗ (рисунок 22, а);
- установка на очищенную от изоляции часть провода сварочной многоразовой тигель-формы и заполнение ее термитной смесью из порошка CuO , железной окалины типа Fe_3O_4 и др. наполнителей (рисунок 22, б);
- воспламенение термитной смеси термитной спичкой и сжигание термитной смеси, то есть непосредственно процесс сварки (рисунок 22, в);
- удаление сварочной тигель-формы и шлака;
- формируется готовое сварное соединение высотой наплавки 3,0 – 7,0 мм, диаметром 25,0 – 35,0 мм (рисунок 22, г).



а



б



в



г

Рисунок 22 – Последовательность термитной сварки выводов ЭХЗ

НД [34] устанавливает требования на проведение ТС выводов ЭХЗ при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте промышленных газопроводов с рабочим давлением $\geq 1,2 - 9,8$ МПа, магистральных газопроводов и конденсаторов с рабочим давлением $\geq 1,2 - 8,3$ МПа, изготовленных из сталей с нормативным значением временного сопротивления на разрыв до 590 МПа (60 кгс/мм) условным диаметром 20 – 1400 мм с толщиной стенки 2,0 – 32,0 мм.

НД [35] устанавливает требования на проведение ТС выводов ЭХЗ при ремонтно-восстановительных работах промышленных газопроводов с рабочим давлением $\geq 1,2 - 9,8$ МПа, а также МГ и конденсаторов с рабочим давлением $\geq 1,2 - 8,3$ МПа, изготовленных из сталей с нормативным значением временного сопротивления на разрыв до 590 МПа (60 кгс/мм) условным диаметром 20 – 1400 мм с толщиной стенки 2,0 – 32,0 мм.

НД [36] устанавливает требования на проведение ТС выводов ЭХЗ при строительстве МГ с рабочим давлением $\geq 8,3 - 9,8$ МПа, изготовленных из сталей с нормативным значением временного сопротивления на разрыв до 590 МПа (60 кгс/мм) наружным диаметром 1020 – 1420 мм, с толщиной стенки 18,0 – 32,0 мм.

Требования к материалу, его электрическому сопротивлению, длине, сечению и др. выводов ЭХЗ определяются НД [34].

К работам по приварке выводов ЭХЗ допускаются сварщики, аттестованные в соответствии с [54], которым присвоен I уровень профессиональной подготовки и имеющие удостоверение, оформленное в соответствии с требованиями [54].

В третьей главе магистерской диссертации проведен критический анализ существующих способов приварки выводов ЭХЗ к МГ.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее целесообразным с экономической точки зрения, технологически простым и высоконадежным способом присоединения катодных выводов к МГ считается ТС поскольку глубина проплавления металла при ТС в три раза меньше, чем для РД, вывод

приваривается непосредственно к МГ и не требует дополнительных ПП. Конденсаторная приварка хотя и обеспечивает минимально возможное проплавление металла МГ, но при этом требует применения специализированного дорогостоящего оборудования, зависящих от диаметра используемого кабеля и к тому же может применяться не на всех МГ.

4. Виды контроля катодных выводов ЭХЗ, выполненных термитной сваркой




4.1 Дефекты термитной сварки

Возможные дефекты при ТС выводов ЭХЗ, их причины и способы устранения приведены в таблице 4 [34, 55].


Таблица 4 – Возможные дефекты при ТС выводов ЭХЗ, их причины и способы устранения

№ п/п	Дефекты	Причины дефектов	Способы устранения дефектов
1	2	3	4
1.	<p>Низкая прочность сварного соединения, вывод отрывается от трубы при сгибании или при удалении шлака</p> 	<p>Некачественная зачистка поверхности трубы или конца привариваемого вывода.</p>	<p>Тщательно зачистить место приварки и конец вывода. Сварку повторить.</p>
		<p>В формирующую полость тигель-формы попала термитная смесь.</p>	<p>Проверить плотность соединения графитовых вкладышей тигель-формы. При возможности заменить тигель-форму на другую или новую. Проверить правильность установки мембраны (без перекосов). Сварку повторить. Сварку повторить.</p>
2.	<p>Наплавленный металл пористый</p> 	<p>Влага на трубе или на привариваемом конце вывода.</p>	<p>Газовой горелкой удалить влагу со свариваемых элементов. Сварку повторить.</p>
		<p>Влага попала в тигель-форму.</p>	<p>Просушить тигель-форму. Сварку повторить.</p>

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
3.	<p>Форма термитного контакта неправильная</p> 	<p>Плохо перемешана термитная смесь, расслоение состава смеси.</p> <p>Разовая тигель-форма или многоразовая графитовая оправка установлена с отклонением от зенита трубы.</p> <p>Разовая тигель форма или многоразовая графитовая оправка не притерта к поверхности трубы.</p>	<p>Тщательно перемешать термитную смесь перед засыпкой в тигель-форму. Сварку повторить.</p> <p>Установить разовую тигель-форму или многоразовую графитовую оправку в верхней четверти периметра трубы с отклонением от зенита $\pm 10^\circ$. Сварку повторить.</p> <p>Притереть основание разовой тигель формы или многоразовой графитовой оправки на наждачной бумаге, уложенной на наружной поверхности трубы рядом с местом сварки. Сварку повторить.</p>
4.	<p>Недостаточное количество наплавленного металла</p> 	<p>Термитная смесь засыпана без необходимого уплотнения.</p> <p>Неправильно выбраны размеры многоразовой графитовой оправки и паяльно-сварочного стержня.</p> <p>Металл вытек вследствие наклона оправки.</p>	<p>Произвести засыпку термитной смеси с оптимальным уплотнением, согласно НД. Сварку повторить.</p> <p>Произвести сварку паяльно-сварочным стержнем большей длины.</p> <p>Установить оправку в верхней четверти периметра трубы с отклонением от зенита $\pm 10^\circ$. Сварку повторить.</p>
5.	<p>В тигель-форме образуется пробка из металла и шлака</p> 	<p>Термитная смесь отсырела</p>	<p>Термитную смесь просушить в течение 40 - 50 минут при температуре 100 – 120 °С. Сварку повторить.</p>

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
6.	<p>Отжиг теплоотводящей трубки с выводом ЭХЗ</p> 	<p>Неправильно выбран материал теплоотводящей трубки.</p>	<p>Выбрать более тугоплавкий тип теплоотводящей трубки. Сварку повторить.</p>

4.2 Возможные металлургические эффекты

ТС выводов ЭХЗ к трубопроводной стали, влечет изменения металлургического состояния основного металла из-за локализованного нагрева в процессе сварки и разных теплофизических свойств свариваемых материалов.

В процессе ТС происходит контакт жидкого металла (Cu) с твердой сталью (разница в температуре плавления составляет около 450 °С), что приводит к появлению в структуре сварного соединения твердой мартенситной микроструктуры и интерметаллидных включений которые, в конечном счете, приводят к появлению трещин и вызывают явление, известное как охрупчивание жидким металлом.

Явление охрупчивания жидкими металлами, достаточно хорошо изучено в процессах сварки, пайки [56 – 60], но подобных исследований для ТС в доступной литературе не было найдено.

Острый угол между твердой и жидкой, хорошо смачивающейся, фазами действует как концентратор напряжений [61], а происходящее, вследствие адсорбции, ослабление атомных связей в устье трещины, приводит к чрезвычайно высоким темпам распространения трещины до 100 мм/с [62 – 64] и эти явления усиливаются с ростом прочности стали [65].

Наиболее сильно воздействия жидкой меди проявляется на аустенитных и аустенитно-ферритных сталях с содержанием феррита менее 20 % [61]. При переходе к сталям ферритно-мартенситного, ферритного и перлитного классов глубина межкристаллитных проникновений достигает минимальных значений и мало сказывается на механических свойствах [66, 67]. Это объясняется плохой смачиваемостью феррита [56, 57] и меньшими термическими напряжениями в сталях ферритного и перлитного классов по сравнению с аустенитными [67].

Следует также отметить, что мартенситная микроструктура, присутствующая в поверхностном слое стали, также может подвергаться диффузии водорода и вызывать водородное охрупчивание [68].

За изменениями металлургического состояния стали помогают следить глубина проникновения меди и изменения микротвердости, которые были исследованы в настоящей работе.

4.3 Образование интерметаллидов в сварном соединении

Согласно ТУ 1793-002-12719185-2009, состав медной термитной смеси следующей:

- 64% медной окалины $\text{CuO} + \text{Cu}_2\text{O}$;
- 20% $\text{Al} + \text{Cu}$ в соотношении 1:1,17;
- 16% $\text{Fe} + \text{Mn}$ ферромарганца.

Ниже представлены диаграммы состояния Cu с компонентами термитной смеси [37].

Al и Cu трудно свариваются из-за значительной разницы в их химическом составе и физических свойствах. Основной проблемой, является образование в сварном соединении хрупких интерметаллических соединений.

Используя фазовую диаграмму Al и Cu (рисунок 23) можно избежать образования интерметаллидов, выбирая подходящие параметры для сварочного процесса [69, 70].

Из фазовой диаграммы видно, что максимальная растворимость Cu в Al для твердого раствора составляет 5,65 масс. % Cu [71]. Взаимная растворимость между Al и Cu возникает в жидком состоянии, а после затвердевания могут образовываться следующие хрупкие интерметаллические соединения: Cu_9Al_4 , Cu_4Al_3 , CuAl , CuAl_2 .

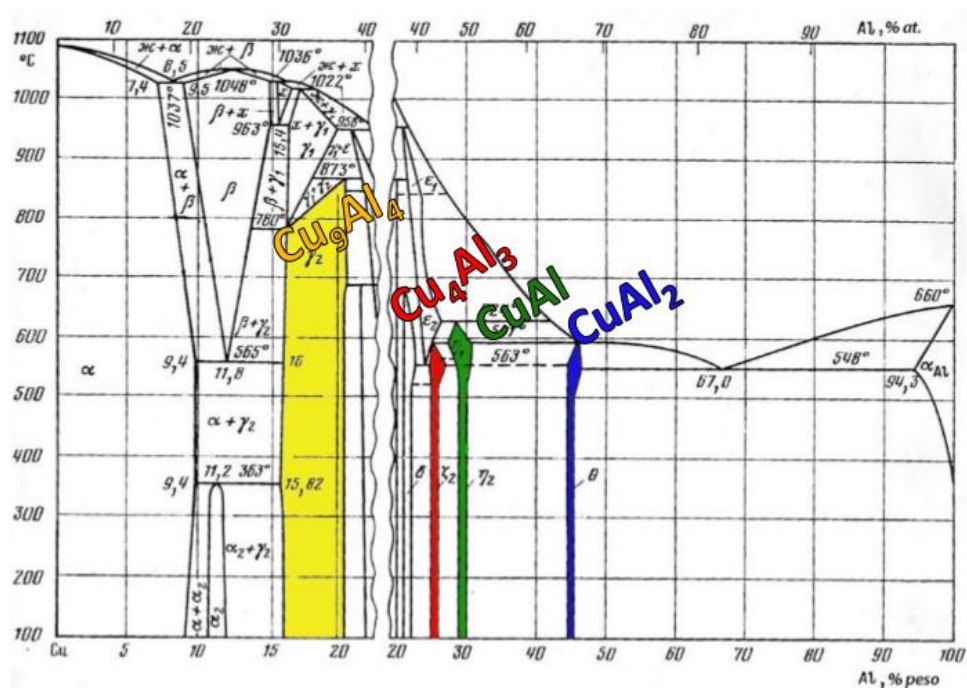


Рисунок 23 – Диаграмма состояния системы Cu-Al [68, 69]

Эти хрупкие интерметаллические соединения могут инициировать трещины из-за значительной разницы в температуре плавления, теплопроводности и тепловом расширении металлов, миграции элементов и микроструктуры [72 – 76], а также они растут во время эксплуатации, снижают механические свойства соединения [77] тем самым ухудшая свойства сварного шва.

Фазовая диаграмма системы Al – Fe представлена на рисунке 24 [78].

Al и Fe в равновесных условиях образуют твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектику. Растворимость Fe в Al всего

0,03 ат. % при эвтектической температуре 654° С, а растворимость Al в Fe составляет 32 %. При увеличении в сплаве Fe, образуются следующие химические соединения: FeAl₃ (77,5 ат. % Al), Fe₄Al₁₃ (74 ат. % Al), Fe₂Al₅ (71 ат. % Al), FeAl₂ (67,59 ат. % Al), Fe₅Al₈, FeAl₆, а также FeAl (45,2 ат. % Al), Fe₃Al (25 – 34 ат. % Al), Fe₂Al при небольшом содержании Al [79].

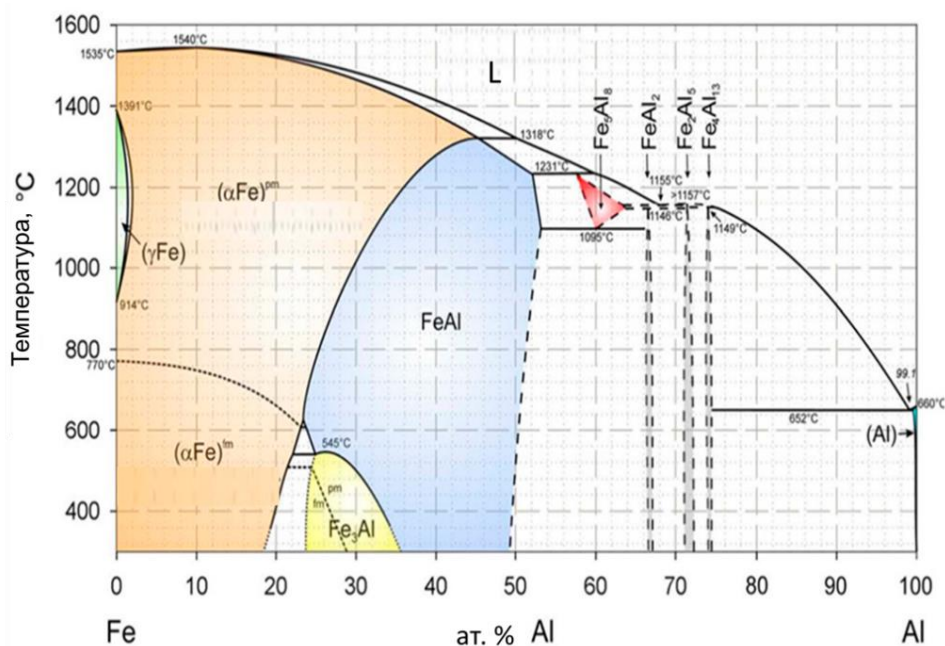


Рисунок 24 – Диаграмма состояния системы Fe-Al [78].

На основе Al и Fe возможно образование пяти интерметаллидов: Fe₃Al, FeAl, FeAl₂, Fe₂Al₅, FeAl₃. Поскольку Fe находится в Al в виде химических соединений это приводит к увеличению твердости и прочности сплава. «Для фазы Fe₃Al микротвердости составляет 2,7 ГПа, для FeAl – 6 ГПа, фазы FeAl₃, FeAl₂, Fe₂Al₅ обладают максимальной микротвердостью 9,6 – 11,5 ГПа» [79].

Fe может образовывать интерметаллиды с различными элементами. Например, с Mn это MnFe, MnFe₂.

Диаграмма состояния системы Al-Mn приведена на рисунке 25 [80]. Она построена на основании металлографического, рентгенографического и др. методов.

В системе существуют следующие промежуточные фазы: Al_6Mn , λ и μ на основе соединения Al_4Mn , низкотемпературная и высокотемпературная модификации фазы $Al_{11}Mn_4$, фазы γ , γ_1 и γ_2 в интервале концентраций 30 – 51 ат. % Mn и ε -фаза, стабильная в интервале концентраций 53 – 60 ат. % Mn.

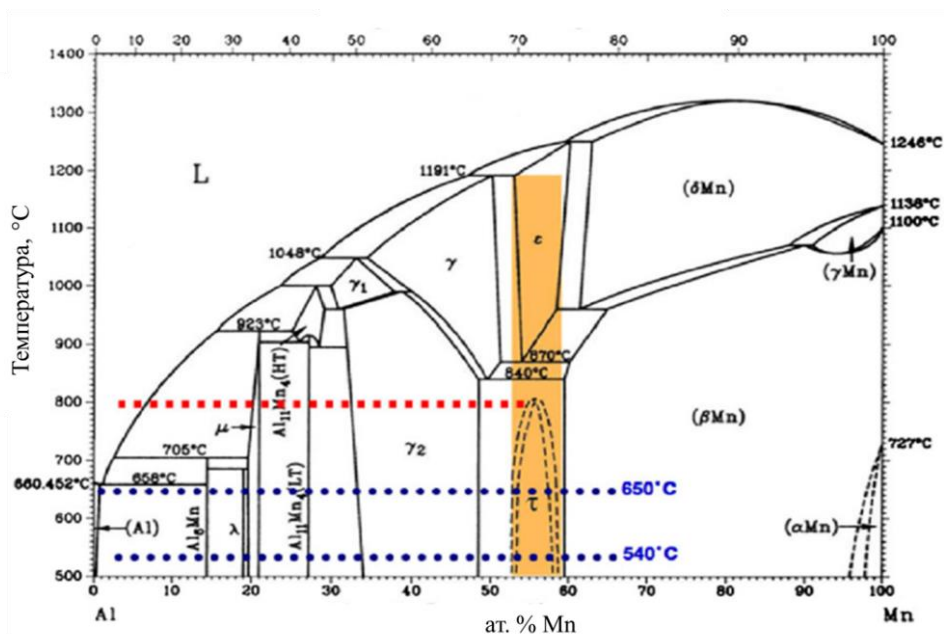


Рисунок 25 – Диаграмма состояния системы Mn – Al [79].

Al_6Mn образует эвтектику с Al примерно при 1,8 мас. % Mn при $658,5^\circ C$ и имеет ограниченный диапазон первичной кристаллизации. Выше 4,1 масс. % Mn образуется по перитектической реакции Al_4Mn [80, 81].

Интерметаллид Al_6Mn отрицательно влияет на свойства сплавов, в частности, снижает их пластичность.

В основном исследовано образование интерметаллидных фаз в тройных системах Cu-Mn-Al, Al-Mn-Si, Al-Mn-Fe и др. Наиболее известным считается интерметаллид Cu_2MnAl , обладающий магнитными свойствами.

4.4 Микроскопические исследования

В работе [82] проводились микроскопические исследования поперечных сечений образцов, полученных в результате приварки медного

проводника NYU 1 x 16 мм, приваренного ТС к 24 дюймовой стальной трубе SCH 40 изготовленной по ASTM A106 Gr. B (P255G1TH). Для ТС использовались новые и ранее используемые МТФ фирмы Cadweld. Температура предварительного нагрева стальной трубы составляла: 15, 40, 60 и 80 °С.

Исследования показали, что ниже поверхности стали, наблюдается мартенситная микроструктура, возникающая из-за быстрого охлаждения сварного соединения (рисунок 26). Также наблюдается промежуточный слой из стали и меди толщиной 10 – 20 мкм (рисунок 26).

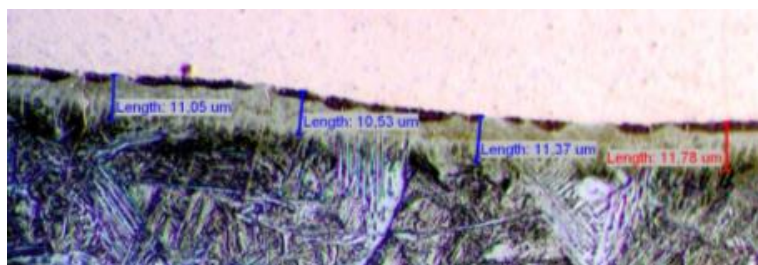


Рисунок 26 – Иллюстрация промежуточного слоя зоны сплавления Cu-Fe

Твердость является одним из основных показателей механических свойств материала.

В процессе исследования механических свойств, измерение твердости – наиболее легкий, экономичный и быстрый способ. Так как твердость связана с другими механическими свойствами, следовательно, на основании твердости могут быть примерно определены такие свойства металлических материалов как прочность, усталость, вязкость, износ и др.

В работе [82] производились измерения микротвердости ниже края сварного шва, выполненного ТС. Исследования показали, что значения твердости в мартенсите могут достигать 367 HV в случае использования старой тигель-формы при температуре предварительного нагрева стальной трубы 15 °С.

4.5 Переходное контактное сопротивление сварного соединения

Сваренный контакт представляет интерес с точки зрения того электрического сопротивления, которое он создает при прохождении через него электрического тока.

«Сопротивление в месте перехода тока из одной контактной поверхности в другую называется переходным контактным сопротивлением.

В процессе эксплуатации под действием разнообразных факторов внешнего и внутреннего характера контактное соединение может настолько ухудшиться, что иногда становится источником аварии.

Соединительные контакты, в данном случае приварка выводов, являются неотъемлемой частью электрической цепи, и от них зависит стабильная работа ЭХЗ МГ.

Самое хорошее контактное соединение – это то, с помощью которого переходное сопротивление образует небольшое значение на длительное время.

Сопротивление контакта не зависит от размера контактных поверхностей и определяется прежде всего силой давления (контактного нажатия) степенью чистоты поверхностей и их шероховатости.

Переходное сопротивление контактов также зависит и от температуры. Чем сильнее нагревается устройство, тем интенсивнее идет процесс окисления, которое в свою очередь также влияет на увеличение переходного сопротивления. Так, например, медная проволока активно окисляется при температуре от 70 °С. При обычной комнатной температуре (порядка 20 °С) Си окисляется незначительно, и образующаяся окислительная пленка легко разрушается при нажатии» [83].

В работе [49] производилось исследование электрического сопротивления двух проводников из чистого Al (> 99 %) диаметром 9,3 мм и длиной 12,5 см, сваренных с помощью ТС с различным содержанием Си в термитной смеси от 0,73 до 2,4 масс. %.

Исследования показали, что увеличение процентного содержания доли меди в термитном порошке с 0,73 до 2,4 приводит к повышению электросопротивления сварных образцов с 0,09 до 0,41 мОм.

Электрическое сопротивление увеличивается при увеличении процентного содержания меди и, следовательно, уменьшается электрическая проводимость из-за отложений Al_2O_3 . Кроме того, растворенный Cu в Al искажает кристаллическую решетку алюминия, что препятствует скорости дрейфа, и тогда подвижность электронов будет уменьшаться.

В четвертой главе магистерской диссертации выполнен обзор научно-технической литературы в области исследования катодных выводов ЭХЗ, выполненных термитной сваркой.

Подводя итог, следует отметить, что коррозионный процесс по своей природе – это неизбежный процесс, но существует ряд методов способных затормозить, существенно снизить воздействие коррозии, тем самым обеспечить наибольшую долговечность и надежность металлических подземных МГ.

Для достижения поставленной цели, то есть повышение надежности приварки выводов ЭХЗ термитной сваркой в магистерской диссертации необходимо решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ существующих способов термитной сварки выводов ЭХЗ к МГ.
2. Изготовить модельные образцы приварок катодных выводов ЭХЗ возможными способами термитной сварки.
3. Изучить механические свойства соединения и околошовной зоны приварок, выполненных различными способами термитной сварки.
4. Основываясь на полученные результаты, разработать технологическую карту термитной сварки вывода ЭХЗ к МГ для оптимального способа приварки.

5 Проведение эксперимента по приварке выводов ЭХЗ

Образцы для исследования выполняли термитной сваркой с применением различного сварочного оборудования и обозначали следующим образом:

Р – с использованием разовой тигель-формы (ТУ 522152-033-12719185-2011);

М – с использованием многоразовой тигель-формы (ТУ-1539-026-12719185-2010), термитной смеси (ТУ 1793-002-12719185-2009) и термитных спичек (ТУ 84-07513209-25-96);

К – с использованием многоразовой тигель-формы (ТУ-1539-026-12719185-2010) и термитного карандаша (ТУ 1793-071-12719185-2015);

С – с использованием многоразовой графитовой оправки МГ-1 (ТУ 48-4802-86-97) в комплекте с паяльно-сварочным стержнем ЭХЗ-1150 (ТУ 1718-001-56222072-2005).

Выполнили по 3 образца каждой серии.

Приварку катодных выводов ЭХЗ осуществляли к пластине размером 150 × 150 мм из стали 09Г2С толщиной 10,0 мм. В качестве вывода ЭХЗ использовали одножильный медный провод диаметром 3,0 мм марки М1.

«Сталь 09Г2С конструкционная низколегированная, не флокеночувствительна, не склонна к отпускной хрупкости, температура начала – окончанияковки 1250 – 850 °С соответственно, сваривается без ограничений» [84].

«Режим термообработки стали назначается согласно критическим точкам из таблицы 5» [84].

Таблица 5 – Критические точки стали 09Г2С

Обозначение критической точки	Ac1	Ac3(Ac _m)	Ar3(Ar _c _m)	Ar1
Температура, °С	725	860	780	625
Ac1 – точка превращения перлита в аустенит; Ac3 – точка конца растворения феррита в аустените при нагреве; Ac3(Ac _m) – точка конца растворения вторичного цементита в аустените; Ar3 – точка начала выделения феррита из аустенита при охлаждении; Ar3(Ar _c _m) – точка начала выделения вторичного цементита из аустенита; Ar1 – точка превращения аустенита в перлит.				

«Различные детали и элементы сварных металлоконструкций из стали 09Г2С могут работать при температуре от минус 70 до плюс 425° С под давлением» [84].

«Плотность стали 09Г2С составляет 7850 кг/м³. Изменение коэффициента линейного расширения (КЛР) приводится в таблице 6» [84].

Таблица 6 – Значение коэффициента линейного расширения стали 09Г2С

Показатель	Температура, °С				
	100	200	300	400	500
КЛР, 10 ⁻⁵ 1/°С	1,14	1,22	1,26	1,32	1,38

«Химический состав стали 09Г2С приводится в таблице 7» [85].

Таблица 7 – Химический состав стали 09Г2С

Содержание химического элемента, %										
Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	As	N
96-97	≤0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	≤0,04	≤0,035	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤0,08	≤0,008

«Механические свойства стали 09Г2С для листового проката сечением до 10 мм² приводятся в таблице 8» [85].

Таблица 8 – Механические свойства стали 09Г2С

Механическая характеристика	Температура, °С				
	-60	-40	+20	+250	+350
Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	-	-	345	-	-
Относительное удлинение δ_5 , %	-	-	21	-	-
Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²	34	39	64	-	-
Предел текучести, σ_T , Н/мм ²	-	-	-	225	175

При катодной ЭХЗ к газопроводу привариваются катодные выводы-заземлители, через которые подключается СКЗ. Все соединения в цепях ЭХЗ выполняются преимущественно проводами из Си. Высокая проводимость и стойкость к атмосферной коррозии в сочетании с высокой пластичностью делают Си основным материалом для проводников.

«Химический состав Cu марки М1 приводится в таблице 9, физические и технологические свойства – в таблице 10, а механические свойства – в таблице 11» [86].

Таблица 9 – Химический состав М1

Содержание химического элемента, %											
Cu	O	Bi	Sb	S	As	Pb	Ni	Fe	Sn	Zn	Ag
99,9	0,05	0,001	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,003

Примеси, даже в ничтожных количествах, резко снижают электропроводность Cu. Наличие Bi и Pb в больших количествах, чем указано в таблице 9, делают невозможным горячую прокатку. Ni, Ag, Zn и Sn повышают механическую прочность и термическую стойкость. S повышает хрупкость на холоде. Кислород, как примесь, несколько повышает проводимость Cu, из-за окисления других примесей и выведения их из твердого раствора.

Таблица 10 – Физические и технологические свойства М1

Свойства	Состояние	Показатель
Плотность, кг/м ³	при 20 °С	8930
Температура плавления, °С	-	1083 ± 0,1
КЛР, °С ⁻¹	при 20 - 100 °С	16,42·10 ⁻⁶
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	-	375 - 380
Удельное электросопротивление, мкОм·м	при 20 °С	0,01724
То же (твердая проволока)	то же	0,0180 - 0,0177
Температурный коэффициент сопротивления, °С ⁻¹	при 0-150 °С	0,00411
Температура горячей обработки, °С	твердое	900 - 1050
Температура начала рекристаллизации, °С	наклепанное	160 - 200
Атмосфера при плавлении	-	восстановительная
Температура литья, °С	-	1150 - 1200
Температура отжига, °С	-	500 - 700
Температура кипения, °С	-	2300 - 2590
Теплота плавления, Дж/кг	-	215
Теплота испарения, Дж/кг	-	5400
Объемная усадка, %	при кристаллизации	4,1

Таблица 11 – Механические свойства М1

Свойства	Температура, °С									
	20	100	200	300	20	100	200	250	300	
	Твердотянутая				Отожженная (650 °С, 0,5 ч)					
Предел прочности при растяжении, МПа	400	365	312	143	234	204	172	161	141	
Истинный предел прочности при растяжении, МПа	670	600	540	290	680	570	350	340	255	
Удлинение, %	5,4	5,5	6,6	54,3	38,6	40	42,6	46,4	47,2	
Сужение площади поперечного сечения, %	53,8	56,1	59,3	73	51,6	60,6	61,3	71,4	72,1	
Модуль упругости статический, ГПа	119	106	102	96	116	115	109	100	100	
Модуль упругости динамический, ГПа	110	89	87	74	71	67	62	-	-	
Предел текучести, МПа	380	355	290	46	56	49	41	39	38	
Предел вибрационной усталости, МПа	93	74	58	34	72	65	51	-	-	
Предел ползучести, МПа	-	-	-	-	70	-	-	-	-	

«Предварительную подготовку поверхности производили согласно» [34].

Место приварки и не менее 50 мм в каждую сторону от предполагаемого места приварки зачищали шлифовальной машинкой Makita 9565CV с дисковыми проволочными щетками и обезжировали. Обезжиривание проводилось техническим ацетоном (ГОСТ 2768-84).

Конец привариваемого проводника катодной защиты оголяли от изоляционного покрытия на длину 50 мм и зачищали наждачной бумагой.

Температуру предварительного нагрева поверхности металла устанавливали 20 °С и достигали путем подогрева газоздушнoй горелкой KRASS ГВ-111-Р.

Измерение температуры поверхности пластины осуществляли с помощью бесконтактного инфракрасного термометра Fluke 59 MAX+ ERTA с выводом результатов измерения на жидкокристаллический дисплей.

Схемы, по которым производилась ТС, подробно описывались в разделах 5.1 – 5.4, используемое сварочное оборудование представлено в таблице 12, внешний вид наплавok приведен в таблице 13.

5.1 Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термитной смесью

«Требования к выводам ЭХЗ (материал, электросопротивление материала, сечение, длина и др.) должны соответствовать» [34].

«Место сварки (далее по тексту – приварки) выводов ЭХЗ располагаем в верхней четверти периметра трубопровода с отклонением от зенита $\pm 10^\circ$ на расстоянии не менее 100 мм от продольных, кольцевых сварных швов и их пересечения. Требования к количеству мест приварок и их расположению прописываются в проектной документации.

При наличии на поверхности трубопровода изоляционного покрытия, с помощью шаблона и мелка намечаем на его поверхности удаляемую площадь 100 x 150 мм. Очищаем намеченное место от земли, снега, капель дождя и др. Разогреваем газоздушной горелкой удаляемое покрытие до температуры 70 – 80 °С. Температуру контролируем бесконтактным инфракрасным термометром. Удаляем изоляционное покрытие и его остатки (адгезив, грунтовка).

Зачищаем механическим способом до металлического блеска предполагаемое место приварки на расстоянии не менее 50 мм в каждую сторону. Обезжириваем зачищенную поверхность ацетоном. Оголяем жилы кабеля от изоляционного покрытия на длину не менее 50 мм и зачищаем наждачной бумагой.

Закрепляем с помощью скотча кабель по изоляционному покрытию так, чтобы жила кабеля была прижата к поверхности трубопровода в зоне сварки и не меняла своего положения в процессе сварки.

Перед проведением приварки, проводим контроль внешнего вида многоразовой тигель-формы (МТФ). Не допускается применять МТФ с недопустимыми трещинами, сколами опорного торца, неплотностями поверхностей замыкания полутиглей».

Схема установки МТФ в комплекте с термитной смесью для приварки выводов ЭХЗ представлена на рисунке 27 [37].

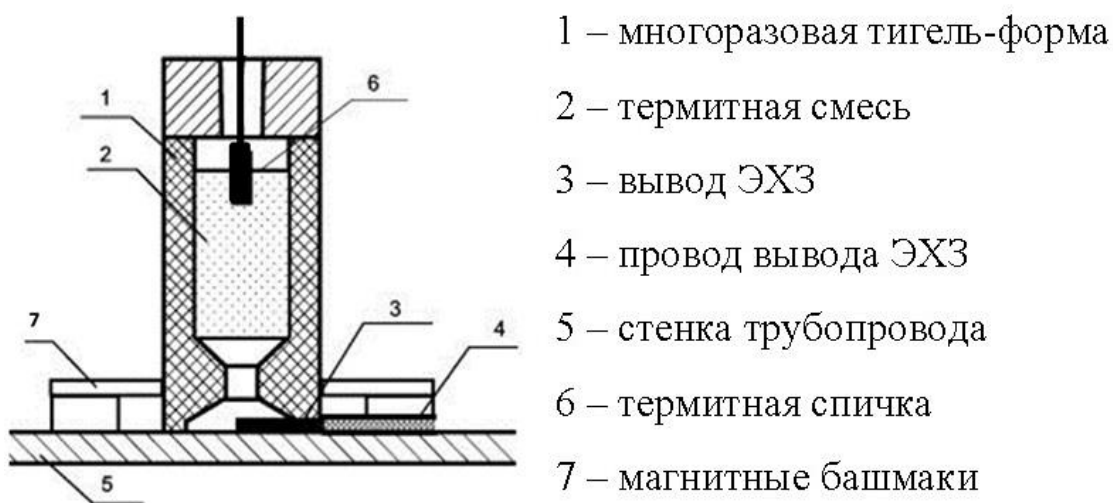


Рисунок 27 – Схема установки МТФ в комплекте с термитной смесью для приварки выводов ЭХЗ

Конструктивные размеры МТФ представлены на рисунке 28.

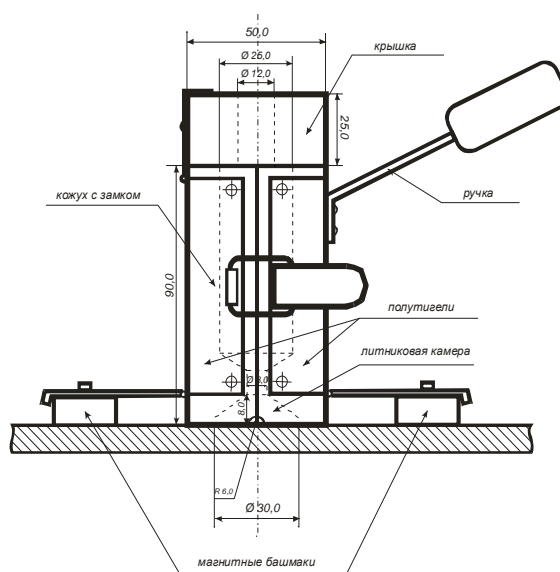


Рисунок 28 – Конструктивные размеры МТФ для приварки выводов ЭХЗ

На предварительно зачищенное механическим способом и обезжиренное место приварки устанавливаем МТФ с помощью магнитных башмаков. Проверяем надежность присоединения магнитов к поверхности трубопровода. Нижнее боковое отверстие тигель-формы для установки вывода ЭХЗ располагаем по оси трубопровода.

Открываем верхнюю крышку МТФ и помещаем без перекосов на дно камеры сгорания МТФ стальную мембрану толщиной $0,3 \pm 0,02$ мм с целью исключения попадания термитной смеси в литниковую камеру МТФ.

Встряхиваем банку с термитной смесью. Насыпаем порцию термитной смеси (54 – 56 г) в мерный стаканчик и высыпаем ее в камеру сгорания МТФ. Утрамбовываем термитную смесь металлическим стержнем или электродом. Закрываем верхнюю крышку МТФ.

Если приварка вывода ЭХЗ осуществляется к трубопроводу без изоляционного покрытия, то защищаем его поверхность рядом с местом сварки защитными экранами из несгораемого материала радиусом 200 – 300 мм, или мокрым песком.

Проверяем, помещается ли термитная спичка в запальное отверстие тигель-формы. Поджигаем термитной спичкой термитную смесь через верхнее запальное отверстие МТФ.

Даем остыть месту приварки. Открываем замок МТФ. Снимаем тигель-форму легкими пошатывающими движениями. Зачищаем сварное соединение металлической щеткой от шлака, брызг расплавленной меди и др. Снимаем скотч. Очищаем МТФ от шлака, брызг расплавленной меди и др. наждачной бумагой и напильником.

«Проверяем прочность приварки вывода ЭХЗ трех-четырёх кратным изгибом рукой в направлении касательном к поверхности трубопровода.

Оцениваем получившуюся приварку визуальным и измерительным методами контроля согласно [34]. Высота шва приварки должна составлять 5 ± 2 мм, диаметр 30 ± 5 мм. Допускаются отдельные поры на поверхности шва диаметром не более 1 мм».

Ниже приводится последовательность операций при ТС выводов ЭХЗ с применением МТФ в комплекте с термитной смесью рисунок 29.

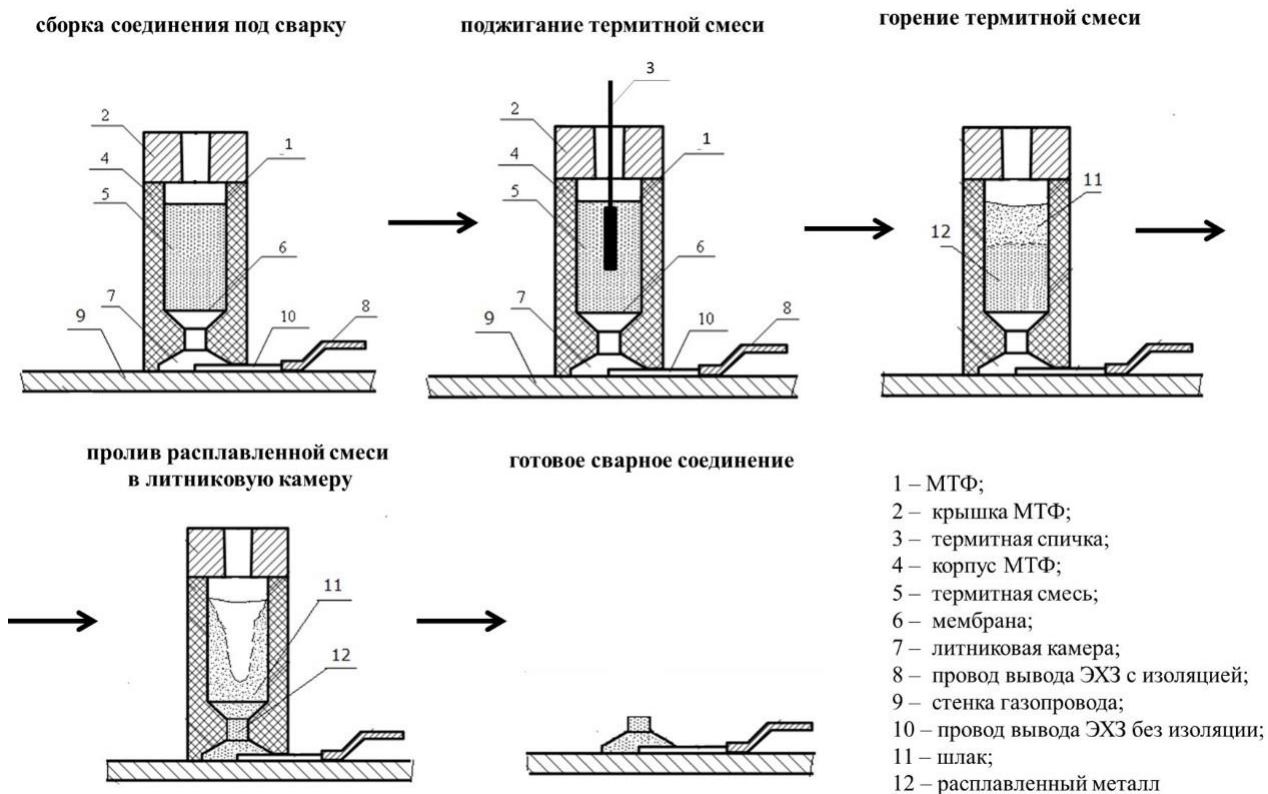
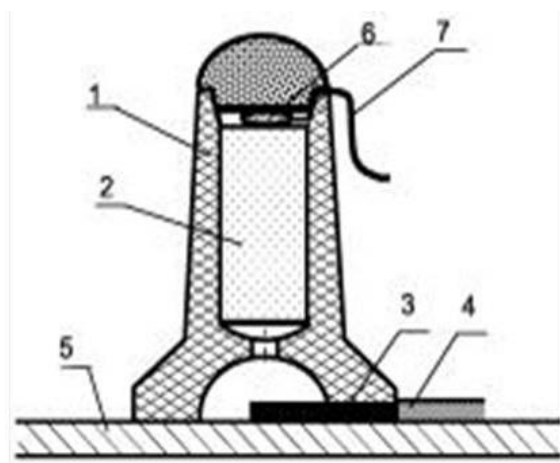


Рисунок 29 – Последовательность операций при ТС выводов ЭХЗ с применением МТФ в комплекте с термитной смесью

5.2 Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением разовой тигель-формы

Схема установки и конструктивные размеры разовой тигель-формы (РТФ) представлены на рисунке 30 и рисунке 31 [37].



- 1 - РТФ,
- 2 - термитная смесь,
- 3 - вывод ЭХЗ,
- 4 - провод вывода ЭХЗ,
- 5 - стенка МГ,
- 6 - термоподжиг,
- 7- огнепроводный шнур

Рисунок 30 – Схема установки РТФ

«Вскрываем индивидуальную упаковку и производим контроль внешнего вида РТФ перед непосредственным использованием.

Встряхиваем РТФ перед ее установкой на место сварки.

Притираем основание РТФ при помощи наждачной бумаги, уложенной на трубопровод.

Устанавливаем РТФ на предварительно зачищенное механическим способом и обезжиренное место сварки».

Требования к месту приварки, подготовке поверхности МГ и вывода ЭХЗ к сварке с применением РТФ производится также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).

«Располагаем нижнее боковое отверстие РТФ для установки вывода ЭХЗ по оси трубопровода.

Помещаем очищенную часть кабеля до середины литниковой камеры РТФ в нижнее боковое отверстие.

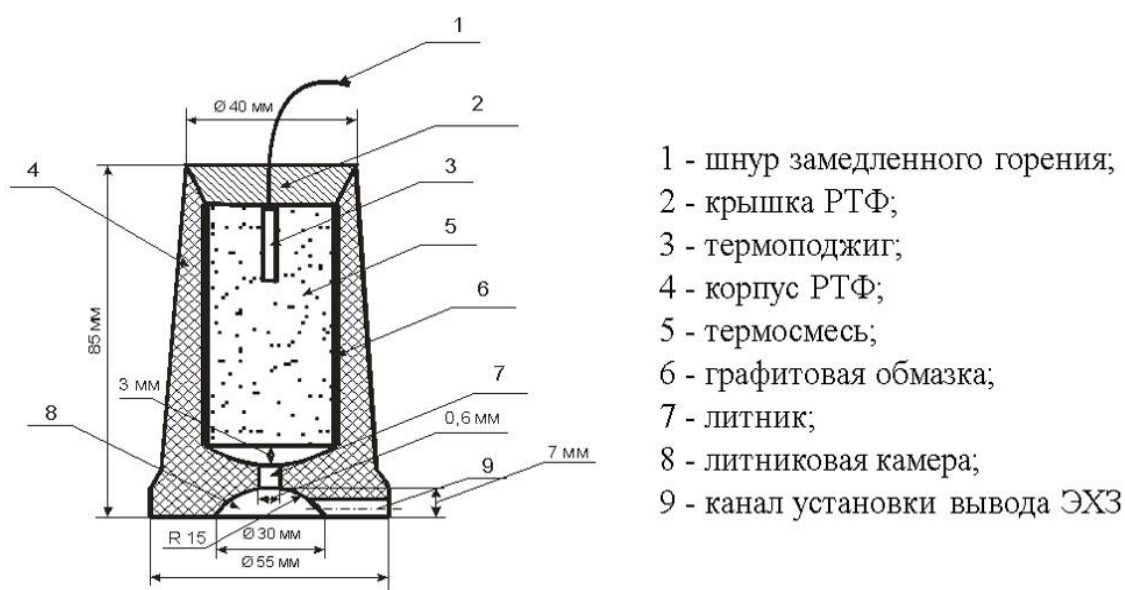


Рисунок 31 – Конструктивные размеры РТФ

Если приварка вывода ЭХЗ осуществляется к трубопроводу без изоляционного покрытия, то защищаем его поверхность рядом с местом сварки защитными экранами из несгораемого материала радиусом 200 – 300 мм, или мокрым песком.

Поджигаем шнур замедленного горения тигель-формы обычной спичкой и быстро отходим на безопасное расстояние от места сварки (не менее 5 м)».

Даем остыть месту приварки. Снимаем РТФ легкими пошатывающими движениями и ее утилизируем.

Зачищаем сварное соединение от шлака, брызг расплавленной меди и др. металлической щеткой.

Прочность приварки вывода ЭХЗ, визуальный и измерительный контроль производим также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).

5.3 Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой графитовой оправки в комплекте с паяльно-сварочным стержнем

Схема установки графитовой оправки (ГО) и паяльно-сварочного стержня (ПСС) для приварки выводов ЭХЗ представлена на рисунке 32. Конструктивные размеры ГО и ПСС представлены на рисунке 33.



Рисунок 32 – Схема установки графитовой оправки и паяльно-сварочного стержня

ПСС извлекаем из защитного колпака непосредственно перед применением. Разбирать и нарушать целостность самих стержней запрещается.

Предварительно зачищенный от изоляции конец вывода ЭХЗ устанавливаем в теплоотводящую трубку длиной 30 мм и фиксируется.

«Опорную плоскость ГО притираем с помощью наждачной бумаги, расположенной рядом с местом сварки на наружной поверхности МГ, до плотного прилегания.

Затем ПСС через центральное отверстие вставляем в ГО таким образом, чтобы огнепроводный шнур выводился наружу через один из боковых шлакоотводящих каналов» (рисунок 33).

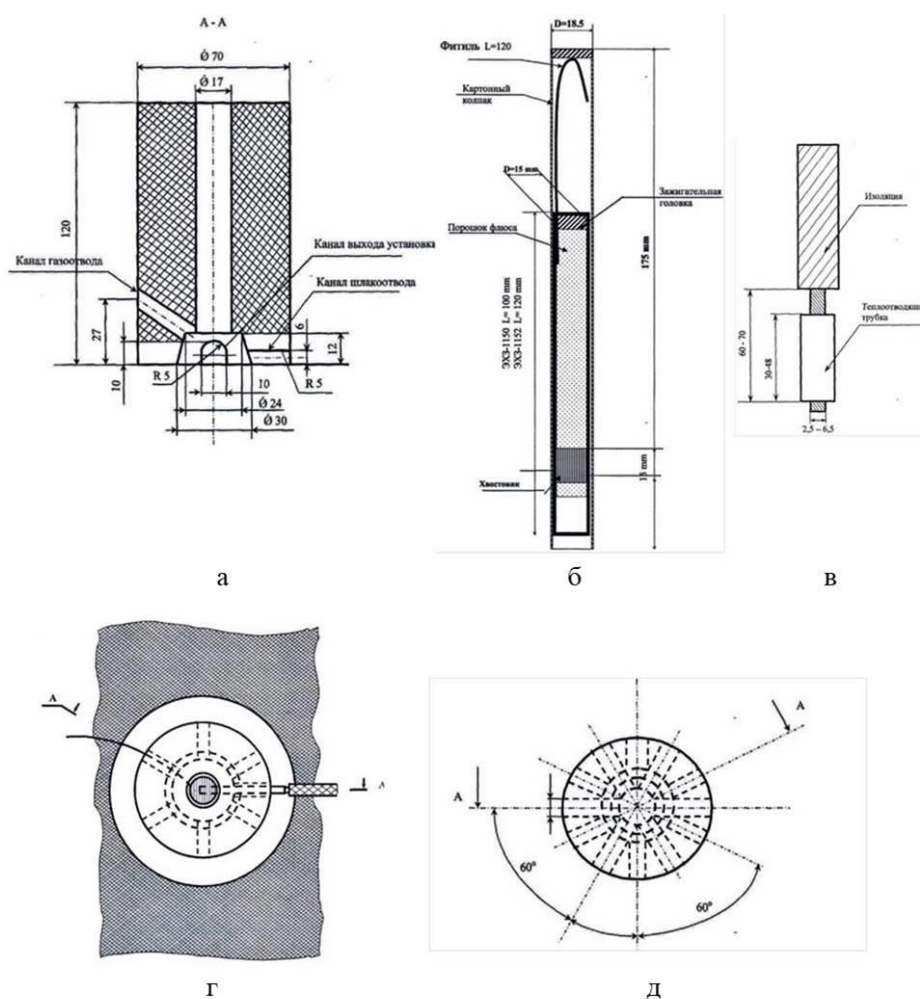


Рисунок 33 – Конструктивные размеры графитовой оправки и паяльно-сварочного стержня

Требования к месту приварки, подготовке поверхности МГ и вывода ЭХЗ к сварке с применением многоразовой ГО и ПСС производится также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).

Затем ГО с ПСС устанавливаем в зените МГ, при этом канал для установки выводов ЭХЗ должен располагаться по оси МГ.

Установленный в оправке ПСС приподнимаем на 10 – 12 мм, для возможности установки теплоотводящей трубки с выводом ЭХЗ, затем ПСС снова опускается.

Огнепроводной шнур поджигается обычной спичкой или зажигалкой и быстро отходим на безопасное расстояние от места сварки (не менее 5 м).

Месту сварки даем остыть 2 минуты, ГО убираем легкими пошатывающими движениями, а место приварки зачищается от шлака, брызг расплавленной меди и др. металлической щеткой.

Для последующего использования ГО, центральный канал и газоотводящие канавки ГО тщательно очищаем с помощью электрода диаметром 3 – 4 мм.

Прочность приварки вывода ЭХЗ, визуальный и измерительный контроль производим также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).

5.4 Технология термитной сварки выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термокарандашом

Схема установки МТФ в комплекте с термокарандашом (ТК) для приварки выводов ЭХЗ представлена на рисунке 34 [37].

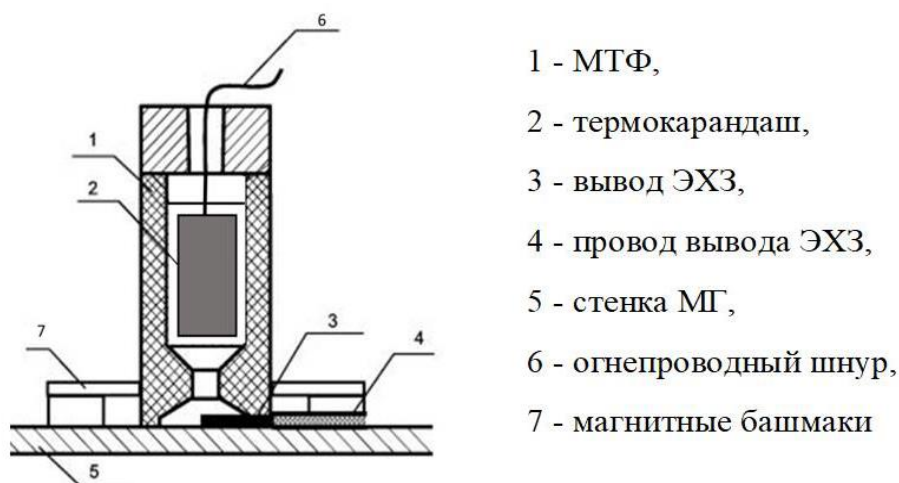


Рисунок 34 – Схема установки МТФ в комплекте с ТК для приварки выводов ЭХЗ

Конструктивные размеры и строение ТК представлены на рисунке 35.

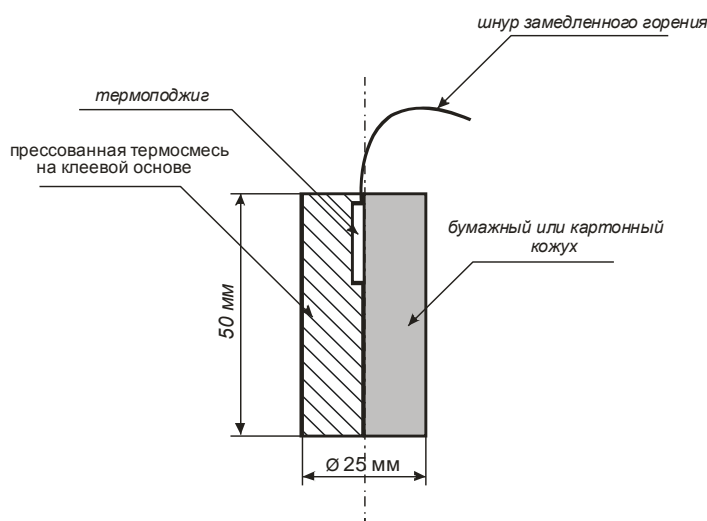


Рисунок 35 – Конструктивные размеры ТК

«На предварительно зачищенное механическим способом и обезжиренное место приварки устанавливаем МТФ с помощью магнитных башмаков. Проверяем надежность присоединения магнитов к поверхности трубопровода. Нижнее боковое отверстие тигель-формы для установки вывода ЭХЗ располагаем по оси трубопровода.

Вскрываем индивидуальную упаковку и производим контроль внешнего вида ТК непосредственно перед применением».

В остальном требования к месту приварки, подготовке поверхности МГ и вывода ЭХЗ к сварке с применением ТК производится также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).

Открываем верхнюю крышку МТФ, помещаем ТК в запальное отверстие МТФ и закрываем крышку. Выводим шнур замедленного горения ТК наружу через отверстие верхней крышки МТФ и поджигаем обычной спичкой или зажигалкой, при этом сварщику нужно быстро отойти от места приварки на безопасное расстояние (не менее 5 м).



Если приварка вывода ЭХЗ осуществляется к трубопроводу без изоляционного покрытия, то защищаем его поверхность рядом с местом сварки защитными экранами из несгораемого материала радиусом 200 – 300 мм, или мокрым песком.



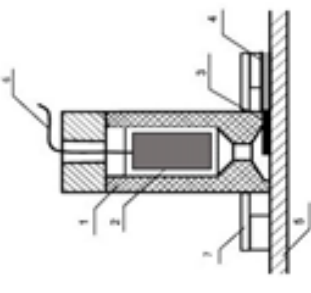
Даем остыть месту приварки. Открываем замок МТФ. Снимаем тигель-форму легкими пошатывающими движениями. Зачищаем сварное соединение металлической щеткой от шлака, брызг расплавленной меди и др. Снимаем скотч. Очищаем МТФ от шлака, брызг расплавленной меди и др. наждачной бумагой и напильником.

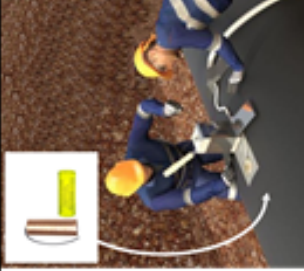

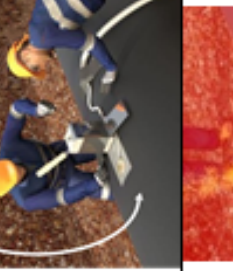
Прочность приварки вывода ЭХЗ, визуальный и измерительный контроль производим также как с медной термитной смесью (см. раздел 5.1).


Ниже приводится «Технология термитной сварки катодных выводов ЭХЗ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термокарандашом».

**Технология термитной сварки катодных вводов ЭХЗ
с применением многоразовой тигель-формы в комплекте термокарандашом**

№ п/п	Операция	Эскиз	Оборудование, приспособление и материалы	Режимы	Технологические требования
1	Определить место приварки		Проектная документация	Вручную	Место приварки располагать в верхней четверти периметра газопровода с отклонением от зенита $\pm 10^\circ$ на расстоянии не менее 100 мм от продольных, кольцевых сварных швов и их пересечения.
2	Удалить изоляционное покрытие		Шаблон 100×150 мм или линейка 300 мм, мелок, щетка-сметка, газозоодушная горелка KRASS ГВ-111-Р, бесконтактный инфракрасный термометр Fluke 59 MAX + ERTA, скребок, щетка металлическая, ведро	Разогреть удаляемое покрытие до температуры $170 - 80^\circ\text{C}$	При наличии на поверхности газопровода изоляционного покрытия, разметить на поверхности покрытия удаляемую площадь 100×150 мм. Очистить намеченное место от загрязнений (земля, снег, каши, дождя и др.). Удалить изоляционное покрытие. Смести остатки изоляционного покрытия (адгезив, грунтоска).
3	Зачистить поверхность газопровода		Шлифмашинка Makita 9565CV	Потребляемая мощность 1400 Вт, максимальная частота вращения диска 11000 об/мин, максимальный диаметр диска 125 мм, длина вorsa 40 мм	Зачистить механическим способом поверхность газопровода до металлического блеска на расстоянии не менее 50 мм в каждую сторону от предполагаемого места приварки.

№ п/п	Операция	Эскиз	Оборудование, приспособление и материалы	Режимы	Технологические требования
4	Обезжирить		Ацетон, емкость для ацетона, ветошь	Вручную	Обезжирить зачищенную поверхность ацетоном
5	Зачистить кабель		Нож монтажный, пассатижи монтажные, наждачная бумага	Вручную	Оголить жилы кабеля от изоляционного покрытия на длину не менее 50 мм и зачистить наждачной бумагой
6	Закрепить кабель		Скотч шириной 50 мм	Вручную	Закрепить кабель по изоляционному покрытию газопровода при помощи скотча так, чтобы жила кабеля была прижата к поверхности газопровода в зоне сварки и не мешала своего положения в процессе сварки.
7	Подготовить рабочую поверхность тигель-формы к сварке		Многогранная тигель-форма по ТУ-1539-026-12719185-2010, наждачная бумага	Вручную	Притереть рабочую поверхность тигель-формы при помощи наждачной бумаги, уложенной на газопровод. Установить тигель-форму на место приварки с помощью магнитных башмаков. Проверить надежность присоединения магнитов к поверхности газопровода. Расположить нижнее боковое отверстие для установки вывода ЭХЗ по оси газопровода.

№ п/п	Операция	Эскиз	Оборудование, приспособление и материалы	Режимы	Технологические требования
8	Установить термо-карандаш		Термокарандаш сварочный со шнуром замедленного горения по ТУ 1793-071-12719185-2015	Вручную	Открыть крышку тигель-формы, установить в нее термокарандаш, чтобы шнур замедленного горения был сверху.
9	Приварить кабель		Защитные экраны радиусом 200 – 300 мм из негорячего материала, спички или зажигалка	Время сварки 20 – 30 с.	Закреть крышку тигель-формы Защитить поверхность газопровода без изоляционного покрытия защитными экранами из негорячего материала. Поджечь шнур замедленного горения спичкой или зажигалкой и отойти от места сварки на безопасное расстояние – 5 м
10	Зачистить сварное соединение		Щетка мет аллическая, наждачная бумага, напильник плоский	Вручную	Открыть замок тигель-формы. Дать остыть месту приварки. Снять тигель-форму легкими пошатывающими движениями. Зачистить сварное соединение от шлака, брызг расплавленной меди и др. металлической щеткой. Снять скотч. Очистить тигель-форму от шлака, брызг расплавленной меди и др. наждачной бумагой и напильником Проверить прочность приварки вывода ЭХЗ трех-четырех кратным изгибом рукой в направлении касательном к поверхности газопровода.

№ п/п	Операция	Эскиз	Оборудование, приспособление и материалы	Режимы	Технологические требования
11	Контроль		<p>Лупа измерительная 4-7-кратное увеличение, шт ангенциркуль, универсальный шаблон сварщика УШС-3.</p>	<p>Произвести визуальный и измерительный контроль в объеме 100%.</p>	<p>Высота шва приварки должна составлять 5 ± 2 мм, диаметр 30 ± 5 мм Допускаются отдельные поры на поверхности шва диаметром не более 1 мм.</p>

5.5 Сварочное оборудование, сварочные материалы и дополнительная оснастка для выполнения термитной сварки выводов ЭХЗ



Для выполнения сварочных работ по ТС выводов ЭХЗ на объектах МГ применяются следующие сварочные материалы и дополнительная оснастка, представлены в таблице 12 [37, 87].

Все перечисленные сварочные материалы должны быть аттестованы в соответствии с требованиями [88].

Таблица 12 – Сварочные материалы и дополнительная оснастка для ТС выводов ЭХЗ, применяемые на объектах МГ

№ п/п	Внешний вид	Наименование
1	2	3
1.	 Медная термитная смесь в таре  Медная термитная смесь в герметичной упаковке  Мерный стаканчик и медные мембраны	<p align="center">Термитная смесь медная</p> <p>Соответствует ТУ 1793-002-12719185-2009.</p> <p>Представляет смесь порошкообразного металлического Al и CuO в виде окалина и различных добавок.</p> <p>Выпускается в герметичной упаковке или расфасовывается в пластиковую тару по 1 кг. В комплект поставки входит мерный стаканчик и 20 шт. медных мембран.</p> <p>Применяется в комплекте с МТФ и термитными спичками.</p> <p>Должна храниться в сухом помещении с влажностью до 80% и температурой не более 30 °С, вдали от нагревательных приборов.</p>
2.	 Термитные спички в коробке	<p align="center">Спички термитные</p> <p>Соответствует ТУ 84-07513209-25-96. Состоят из соломенной «ножки», на один конец которой наносится вещество, способное в несколько раз усилить процесс воспламенения трудно воспламеняющихся веществ.</p> <p>Предназначены для зажигания термитных патронов, термитно-муфельных шашек, костров. Зажигаются о шероховатую поверхность на торцах упаковки. Температура горения достигает + 1000 °С. Выпускаются в коробках по 20 штук.</p> <p>Должны храниться в металлических боксах при температуре от – 50 до + 50 °С и влажности не выше 80 %.</p>

Продолжение таблицы 12

1	2	3
3.	 <p>МТФ в открытом состоянии</p> <p>МТФ с опущенными магнитными башмаками</p>	<p>Многоразовая тигель-форма (МТФ)</p> <p>Соответствует ТУ-1539-026-12719185-2010.</p> <p>Представляет собой изделие многоразового использования (до 100 соединений) в виде раскрывающейся литевой формы из огнеупорного материала (высокотемпературного графита), с магнитами, позволяющими удерживать изделие на трубе во время сварки.</p> <p>Конструкция МТФ специально разработана для обеспечения минимального теплового воздействия на металл трубопровода</p> <p>Выпускаются несколько модификаций МТФ, отличающиеся радиусом поверхности литевой камеры, прилегающей к трубе. После использования необходимо аккуратно зачищать.</p>
4.	 <p>Термитный карандаш</p>	<p>Термитный карандаш</p> <p>Соответствует ТУ 1793-071-12719185-2015.</p> <p>Представляет готовое для приварки изделие цилиндрической формы с медной оболочкой заполненной термитной массой, в которую запрессован воспламеняющий элемент и огнепроводный шнур замедленного горения.</p> <p>Конец шнура замедленного горения выводится наружу через отверстие крышки МТФ и поджигается обычной спичкой.</p> <p>Применяется в комплекте с МТФ.</p>
5.	 <p>Стержни ЭХЗ-1150, ЭХЗ-1152 в футлярах</p>	<p>Паяльно-сварочные стержни из медных термитных смесей (ПСС)</p> <p>Соответствуют ТУ 1718-001-56222072-2005.</p> <p>ПСС выпускаются трех марок ЭХЗ-1150А, ЭХЗ-1150, ЭХЗ-1152, предназначенных для приварки ЭХЗ на трубах с разной толщиной стенки: от 3,5 до 10,0 мм, от 4,0 до 10,0 мм, от 10,0 мм до 40,0 мм соответственно.</p> <p>ПСС применяется в комплекте многоразовой графитовой оправкой.</p> <p>Поджиг огнепроводного шнура ПСС осуществляется обычной спичкой.</p>
6.	 <p>ГО на трубу Ø 50-110 мм</p>	<p>Многоразовая графитовая оправка (ГО)</p> <p>Соответствуют ТУ 48-4802-86-97. Марка графита МГ-1.</p> <p>Предназначена для фиксации паяльно-сварочного стержня ЭХЗ в вертикальном положении, а также для защиты места наплавки от потери тепловой энергии.</p> <p>Оправка формирует наплавку, для отвода жидких шлаков и газов имеются 6 каналов.</p>

Продолжение таблицы 12

1	2	3
		ГО может использоваться на 150-200 приварок в комплекте с теплоотводящей трубкой.
7.	 <p>Стальные теплоотводящие трубки</p>	<p>Стальные теплоотводящие трубки для защиты кабелей</p> <p>Стальные теплоотводящие трубки М1 для защиты кабелей 6-10 мм².</p>
8.	 <p>Исполнение РТФ-К</p> <p>Исполнение РТФ</p>	<p>Разовая тигель-форма (РТФ)</p> <p>Соответствует ТУ 522152-033-12719185-2011.</p> <p>РТФ представляет полностью готовое для приварки изделие из керамического стакана специальной формы одноразового использования, внутрь которого помещена мембрана, порция медной термитной смеси и воспламеняющий элемент (термоподжиг). Воспламенение термитной смеси осуществляется путем поджига огнеупорного шнура замедленного горения, конец которого выведен наружу.</p> <p>Хранение должно осуществляться в герметичной упаковке при температуре от – 10 до +50 °С и относительной влажности до 80 %. В случае воспламенения тушение производить песком или сухой землей. Чувствительна к ударным нагрузкам.</p>

5.6 Визуальный и измерительный контроль

«Сварные соединения МГ, выполненные при строительстве, реконструкции и ремонте, подлежат визуальному и измерительному контролю (ВИК) в объеме 100 %» [34].

ВИК основного металла и сварных соединений проводится невооруженным глазом и с применением оптических приборов (луп, эндоскопов, зеркал, и др.).

По результатам ВИК, высота наплавки должна составлять $5,0 \pm 2,0$ мм, диаметр $30 \pm 5,0$ мм и на поверхности наплавки допускаются отдельные поры диаметром до 1,0 мм [34].

В данной исследовательской работе ВИК основного металла и сварных соединений проводили объеме 100 % невооруженным глазом и с применением оптических приборов:

- лупа измерительная (ГОСТ 25706) с 4-7-кратным увеличением;
- штангенциркуль (ГОСТ 166);
- универсальный шаблон сварщика типа УШС-3.

При проведении ВИК приварок выводов ЭХЗ на макрошлифах наблюдали следующие характеристики сварных соединений [34]:

- форма сварного шва;
- размеры сварного шва;
- внешняя пористость сварного шва;
- отсутствие сплавления с основным металлом.

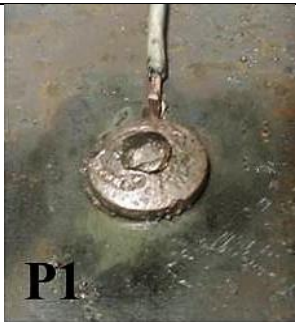
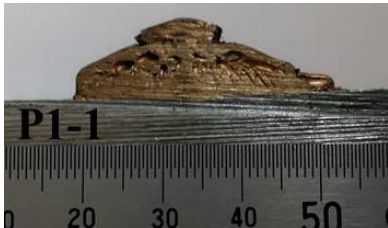

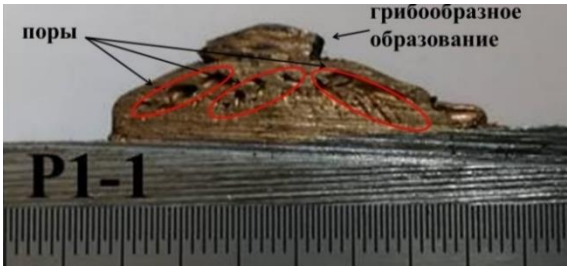
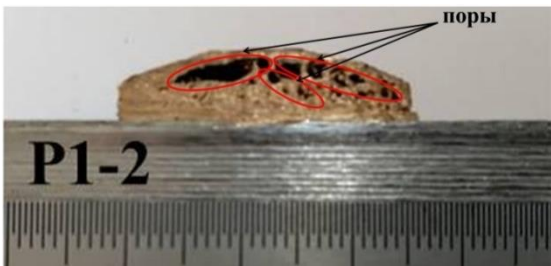
Серия образцов для проведения ВИК имеет следующие обозначения: Р1, М1, К1, С1.

Сначала производили оценку формы и размеров приварок. Далее оценивали и описывали внешние дефекты. Затем образцы разрезали на две половинки отрезным станком ТН-100 (фирма Remet, Италия) с водяным охлаждением и оценивали и описывали внутренние дефекты.


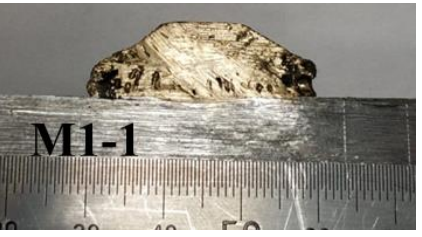
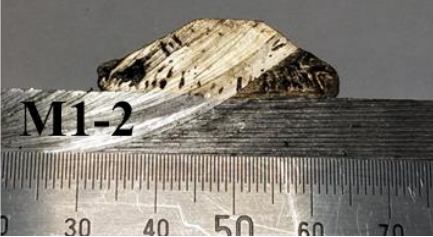
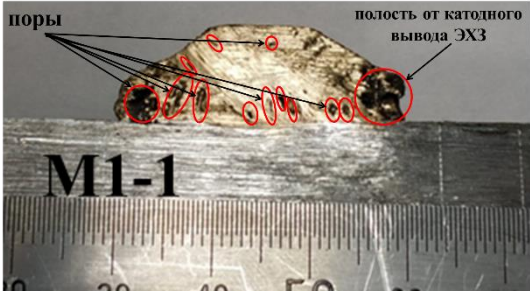
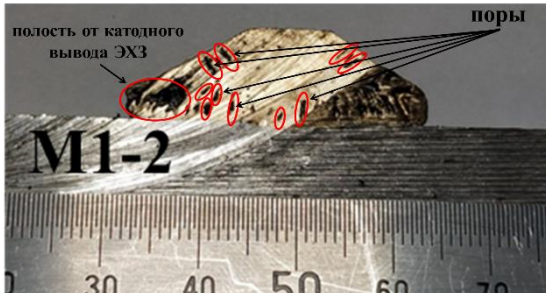
После разрезания образцы имеют аналогичные обозначения, только с добавлением индекса «1» для левой половинки и индекса «2» для правой половинки.

В таблице 13 приводится внешний вид наплавов до и после разрезания, результаты ВИК сварного соединения с подробным описанием типа, размера и количества дефектов.


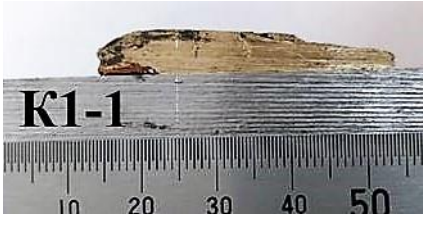

Таблица 13 – Результаты ВИК сварного соединения

№ п/п	Вид сверху	Разрез	
		Левая часть	Правая часть
1	2	3	4
1.			
<p>Поверхность приварки P1 имеет круглую форму с грибовидным образованием в верхней центральной части диаметром от 12,0 до 14 мм и высотой до 3,5 мм. В остальном внешняя поверхность приварки без несплавлений и выходящих наружу пор. Диаметр приварки составляет 29,5 мм, высота 7,0 мм без учета грибовидного образования и 10,5 мм с учетом грибовидного образования.</p>			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>P1-1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>P1-2</p> </div> </div>			
<p>На срезе P1-1 видно, что сплавление приварки с основным металлом составляет 100 %. Наблюдается равномерная внутренняя пористость с порами удлиненной и округлой формами и размерами до 1,0 мм в диаметре и длиной от 0,5 мм до 8,0 мм.</p> <p>На срезе P1-2 на рассматриваемом участке длиной 27,0 мм сплавление с основным металлом также составляет 100 %. На срезе наплавленного металла наблюдается внутренняя пористость, сосредоточенная в верхней части рассматриваемого среза с размерами пор до 2,0 мм в диаметре и длиной от 0,5 мм до 8,0 мм.</p>			




Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
2.	 <p>M1</p>	 <p>M1-1</p>	 <p>M1-2</p>
<p>Приварка М1 имеет круглую форму с гладкой внешней поверхностью. Диаметр приварки составляет 31,0 мм, высота 10,5 мм. В сечении имеет трапецевидную форму с полным сплавлением с основным металлом.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="336 860 868 1151">  <p>поры</p> <p>полость от катодного вывода ЭХЗ</p> <p>M1-1</p> </div> <div data-bbox="922 860 1469 1151">  <p>полость от катодного вывода ЭХЗ</p> <p>поры</p> <p>M1-2</p> </div> </div> <p>На срезе М1-1 наблюдается единичная газовая полость типа пора размером 3,0 x 3,0 мм и единичная удлиненная пора размером не более 0,6 мм длиной до 2,5 мм. В средней части имеется небольшая пористость, порядка 10 шт. размером 0,6 x 2,0 мм и одна разветвленная пора размером 2,5 x 3,0 мм.</p> <p>С левого края среза М1-2 имеется единичная газовая полость типа пора размером 3,0 x 3,0 мм и порядка 10 шт. пор размером 0,7 x 2,0 мм и, с другой стороны, также имеется полость, но это не считаем дефектом, так как она образовалась на месте приварки вывода, после разрезания образца на станке.</p>			

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
3.	 <p>K1</p>	 <p>K1-1</p>	 <p>K1-2</p>
<p>Приварка К1 имеет круглую форму с равномерной по высоте внешней поверхностью. Диаметр приварки составляет 30,0 мм, высота от 6,0 до 6,5 мм. Обнаружены две поры, выходящие на поверхность наплавленного металла размером 1,5 мм каждая.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div data-bbox="323 898 884 1144" style="text-align: center;"> <p>K1-1</p> </div> <div data-bbox="922 898 1474 1133" style="text-align: center;"> <p>K1-2</p> </div> </div> <p>На срезе К1-1 выявлено несплавление размером 9,0 мм, что составляет 30 % от рассматриваемого участка без учета разреза кабеля катодного вывода, а также три канальные поры протяженностью порядка 4,0 мм и шириной 1,0 мм.</p> <p>На срезе К1-2 выявлены две внутренние поры, одна подповерхностная канальная пора длиной 9,0 мм и шириной 1,0 мм и одна внутренняя пора длиной 4 мм и шириной 0,5 мм.</p>			

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
4.			
<p>Приварка С1 имеет форму неидеального круга с неравномерной по высоте внешней поверхностью и кратером размером $4,0 \times 5,0$ мм. Максимальный диаметр составляет 28,0 мм, а высота 10,0 мм.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="323 819 863 1099">  </div> <div data-bbox="924 819 1477 1099">  </div> </div> <p>На срезе С1-1 выявлено сплавление 15,0 мм и несплавление размером 12,5 мм, что составляет 45 % от рассматриваемого участка. Также обнаружены подповерхностные дефекты в виде пяти канальных пор протяженностью от 10,0 до 13,0 мм и диаметром 1,5 мм, а также одна пора округлой формы размером $1,5 \times 1,5$ мм.</p> <p>На срезе С1-2 выявлено сплавление 18,0 мм из представленного участка длиной 26,0 мм, которое составляет 69 %. Соответственно участок несплавления составляет 31 %. Наблюдается равномерная пористость, сосредоточенная в основном в левой половине рассматриваемого среза наплавленного металла. Размер пор составляет $0,5 \times 3,0$ мм.</p>			

В наплавках, выполненных ТС, отсутствуют недопустимые поверхностные дефекты и размеры наплавков не превышают в диаметре 28,0 – 31,0 мм, что соответствует требованиям [34].

Высота образцов М1, С1 и Р1 несколько превышает максимально допустимую высоту приварки согласно [34] и для проведения дальнейших испытаний образцы подверглись шлифованию до высоты 7,0 мм.

Сварные соединения, признанные годными по результатам ВИК далее подлежат неразрушающему контролю физическими методами. В данной исследовательской работе образцы подвергались радиографическому контролю.

5.7 Радиографический контроль

В то время как «в действующих НД для сварного шва, выполненного ТС применяется только ВИК и механические испытания на срез [34]» [89].

В данной исследовательской работе считаем, что проведение только ВИК недостаточно, поскольку он не позволяет выявить внутренние дефекты. Поэтому помимо перечисленных методов контроля, контроль был расширен другими методами, которые позволяют обнаруживать и идентифицировать внутренние дефекты приварки, а именно:

- радиографический контроль;
- макроскопическое исследования поперечного сечения сварного шва;
- микроскопическое исследование поперечного сечения сварного шва;
- измерения твердости на соответствующих участках поперечного сечения сварного шва.

При радиографическом контроле необходимо использовать маркировочные знаки, поэтому серия образцов для проведения радиографического контроля обозначали следующим образом: Р2, М2, К2, С2.

«Радиографический контроль проводили с использованием рентгеновского генератора RAYCRAFT модели GP-200» [89] (рисунок 36), который включает: рентгеновскую трубку; высоковольтный трансформатор; термореле; манометр; низковольтный кабель; вентилятор охлаждения.

Дополнительно рентгеновский генератор комплектуется пультом управления, соединительным кабелем, силовым кабелем длиной 10 м, заземляющим кабелем длиной 5 м и руководством по эксплуатации.



а



б

Рисунок 36 – Рентгеновский генератор RAYCRAFT модель GP-200:
а – вид спереди, б – вид сверху

Основные характеристики рентгеновского генератора RAYCRAFT модели GP-200 приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Характеристики рентгеновского генератора RAYCRAFT модели GP-200

Серийный номер	14604
Рентгеновская чувствительность	$\leq 2\%$ (А3 сталь)
Рентгеновское излучение	в заданных пределах
Максимальное проникновение по стали на пленку	24 мм
Диапазон регулирования напряжения	100 - 200 кВ
Защита от перенапряжения	260 В
Защита от перегрузки по току	7,5 мА
Заключение калибровки	соответствует

При РК используются источники ионизирующих излучений, энергия и анодное напряжение на рентгеновской трубке, которых зависит от толщины металла просвечиваемых изделий и типа применяемой рентгеновской пленки

и при всем этом обеспечивать требуемая чувствительность контроля 0,3 – 0,5 мм. На контролируемых участках устанавливаются эталоны чувствительности. При просвечивании разнотолщинного сварного соединения чувствительность контроля выбирают по наиболее толстой детали, а максимальный допустимый размер дефекта выбирают по меньшей толщине.

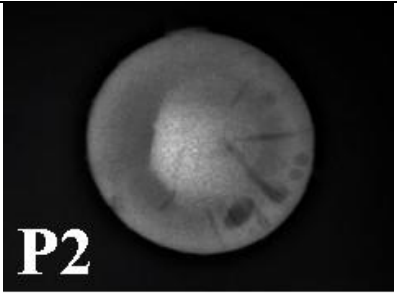
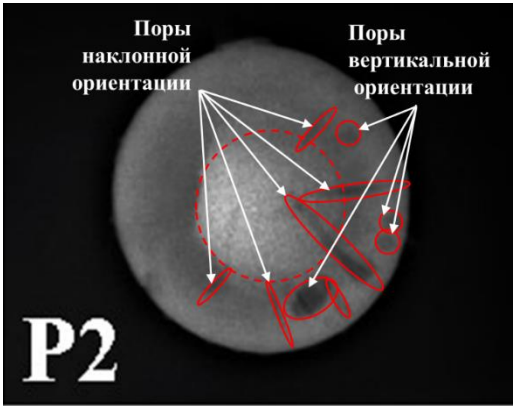
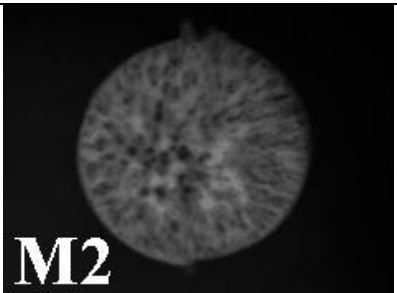
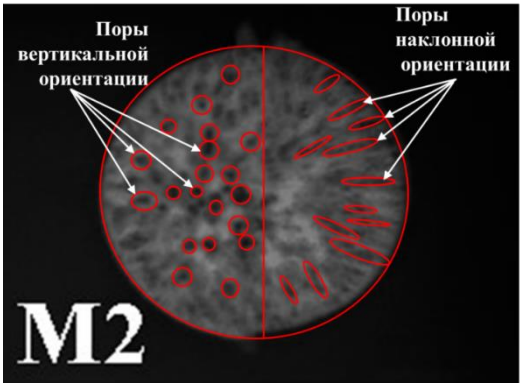
При РК сварных соединений МГ применяются высококонтрастные технические пленки отечественного или импортного производства в данном случае пленка INDUSTREX AA400 Film шириной 70 мм. Величина оптической плотности рентгеновского снимка не менее 1,5 единиц оптической плотности.

«Режим проведения РК: напряжение 190 В, сила тока 5 мА, фокусное расстояние 400 мм, время экспозиции 2,7 мин.


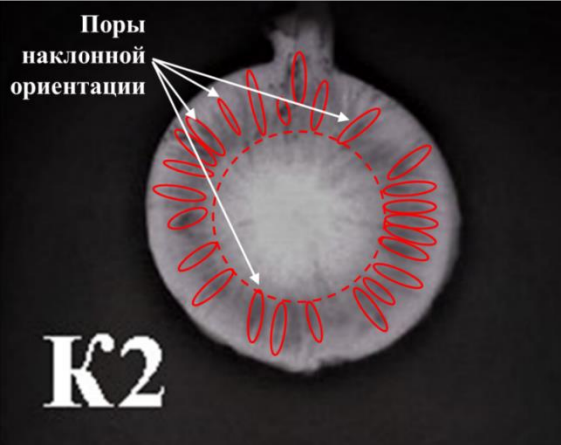
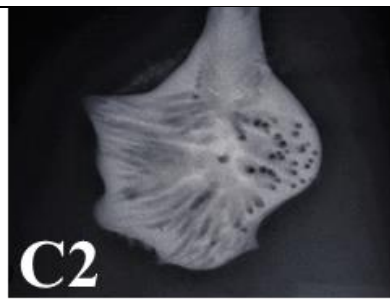

После просвечивания проводили проявочный процесс и расшифровку снимков» [89].

Расшифровка снимков с подробным описанием типа, размера и количества внутренних дефектов представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Расшифровка снимков после РК

№ п/п	Фото пленки с негатоскопа	Описание внутренних дефектов
1	2	3
1.	 <p>P2</p>	<p>Приварка P2 имеет круглую форму диаметром 30,0 мм.</p> <p>Наблюдаются внутренняя крупная пора размером 3,0 x 2,0 мм, три поры округлой формы диаметром 1,5 мм и три наклонные поры размером 10,2 x 2,0 мм, 6,0 x 1,5мм, 4,0 x 1,0 мм.</p>  <p>P2</p>
2.	 <p>M2</p>	<p>Приварка M2 имеет круглую форму диаметром 32,0 мм. Наблюдается множество внутренних пор различной ориентации. В левой половине снимка преимущественно вертикальной ориентации с диаметром от 0,3 до 1 мм, а в правой – наклонной ориентации протяженностью до 5,0 мм.</p>  <p>M2</p>

Продолжение таблицы 15

1	2	3
3.	 <p>K2</p>	<p>Приварка К2 имеет круглую форму диаметром 31,0 мм. Наблюдаются внутренние поры наклонной ориентации примерно одинакового размера протяженностью до 6,0 мм и диаметром 1,0 мм сосредоточенные по внешней части круга.</p>  <p>K2</p>
4.	 <p>C2</p>	<p>Приварка С2 имеет форму неидеального круга размером от 24,0 мм до 32,0 мм средний размер составляет 29,0 мм.</p> <p>Наблюдаются внутренние поры различной ориентации. В правой половине снимка преимущественно вертикальной ориентации с диаметром от 0,3 до 1 мм, а в левой – наклонной ориентации протяженностью от 4,0 до 6,0 мм.</p>  <p>C2</p>

«По результатам РК основным обнаруженным дефектом во всех приварках являются газовые и усадочные поры» [89]. Причиной внутренней пористости могут служить небольшое количество расплавленного металла в зоне сварки и высокие скорости охлаждения (затвердевания) зоны сварки, напрямую связанные с материалом, из которого изготовлены тигель-формы. Материалом РТФ является керамика, а МТФ – графит. Теплофизические свойства этих материалов отличаются. «Керамика обладает более низкой теплопроводностью, по сравнению с графитом, соответственно и воздействие на материал приварки и основной металл будет различным.

Установлено, что наилучшее формирование приварки по пористости является у образца Р2, сваренного с применением РТФ. Наблюдаются штучные поры, а в остальном формирование без внутренних дефектов.

Пористость образца К2 примерно одинакового размера и равномерного распределения по всему внешнему диаметру приварки.

Приварки М2 и С2 имеют неравномерную внутреннюю пористость разной ориентации – вертикальную в одной части приварки и наклонную в другой, что можно объяснить неоднократным использованием тигель-форм [82]» [89].

Для образования минимальной усадочной пористости в зоне сварки, по мнению авторов [49] необходимо использовать строго определенную долю термитной смеси.

5.8 Микроскопические исследования

Для оценки микроструктуры зоны сварки сечение образцов изучали металлографическим методом.

Образцы запрессовывали в полимерный материал на прессе IPA 30 (фирма Remet, Италия) при температуре менее 150 °С, не приводящей к структурным изменениям. Шлифование, грубое и тонкое полирование

проводили на станке LSA (фирма Remet, Италия). Внешний вид комплекса для изготовления металлографических шлифов представлен на рисунке 37.



Рисунок 37 – Внешний вид комплекса для изготовления металлографических шлифов:
а – пресс, б – шлифовальный станок

Серия образцов для металлографических исследований приведена на рисунке 38, [90] и имеет следующие обозначения: РЗ, МЗ, КЗ, СЗ.

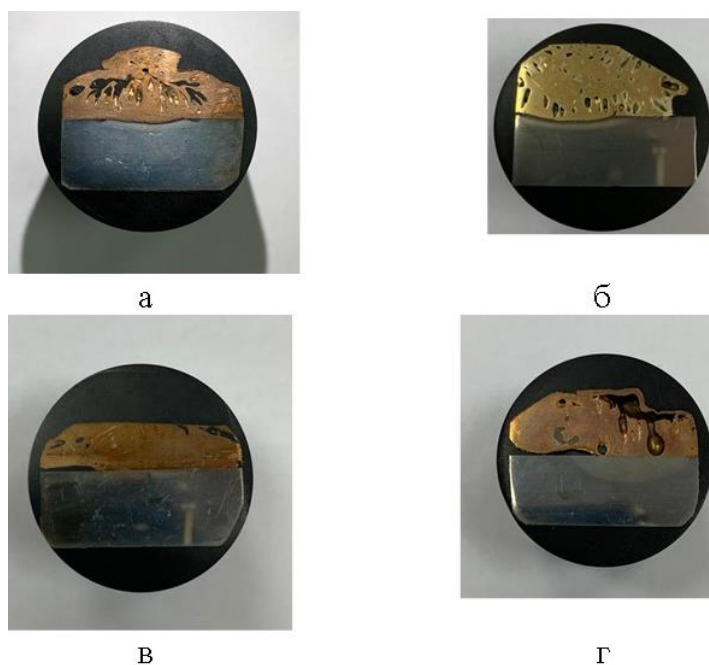


Рисунок 38 – Внешний вид образцов для микроскопического исследования:
а – РЗ, б – МЗ, в – КЗ, г – СЗ

Затем протравленную поверхность образцов исследовали с использованием оптического микроскопа и программного обеспечения для анализа изображений.

Исследование структуры проводили методом оптической микроскопии на универсальном металлографическом микроскопе «Axiovert 200MAT» (фирма Carl Zeiss, Германия) на поперечных срезах всех вариантов образцов при различных увеличениях. Внешний вид металлографического микроскопа «Axiovert 200MAT» представлен на рисунке 39.



Рисунок 39 – Внешний вид металлографического микроскопа «Axiovert 200MAT»

Количественные оценки параметров микроструктур проводили с помощью программного продукта AxioVision версия 4.6, который позволяет с высокой долей вероятности оценить морфологические особенности исследуемой структуры. В данной работе оценивали глубину проплавления и толщину переходной зоны.

При первичном анализе шлифов выявили, что во всех образцах при ТС образуется сварочная ванна, в которой кристаллизуется Cu (рисунок 40).

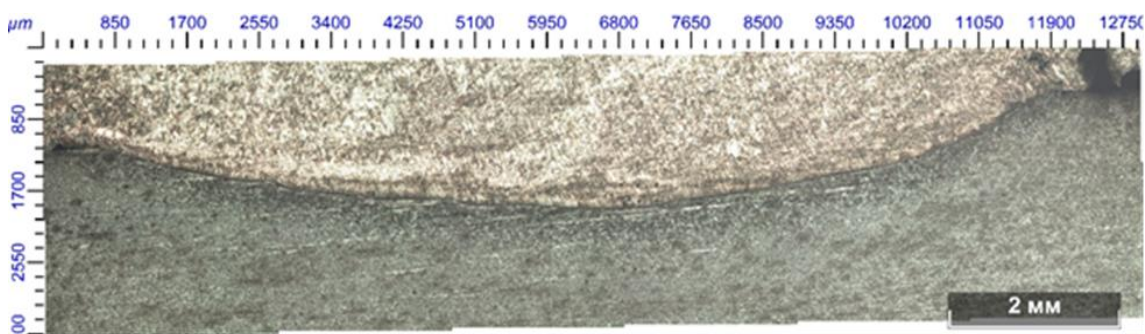


Рисунок 40 – Сварочная ванна при термитной сварке. Образец МЗ, $\times 50$

Считаем, что Си кристаллизуется в сварочной ванне в силу того, что у Си больший удельный вес, чем у стали и поэтому Си вытесняет сталь.

Микроструктуры исследуемых образцов представлены на рисунке 41 [90].

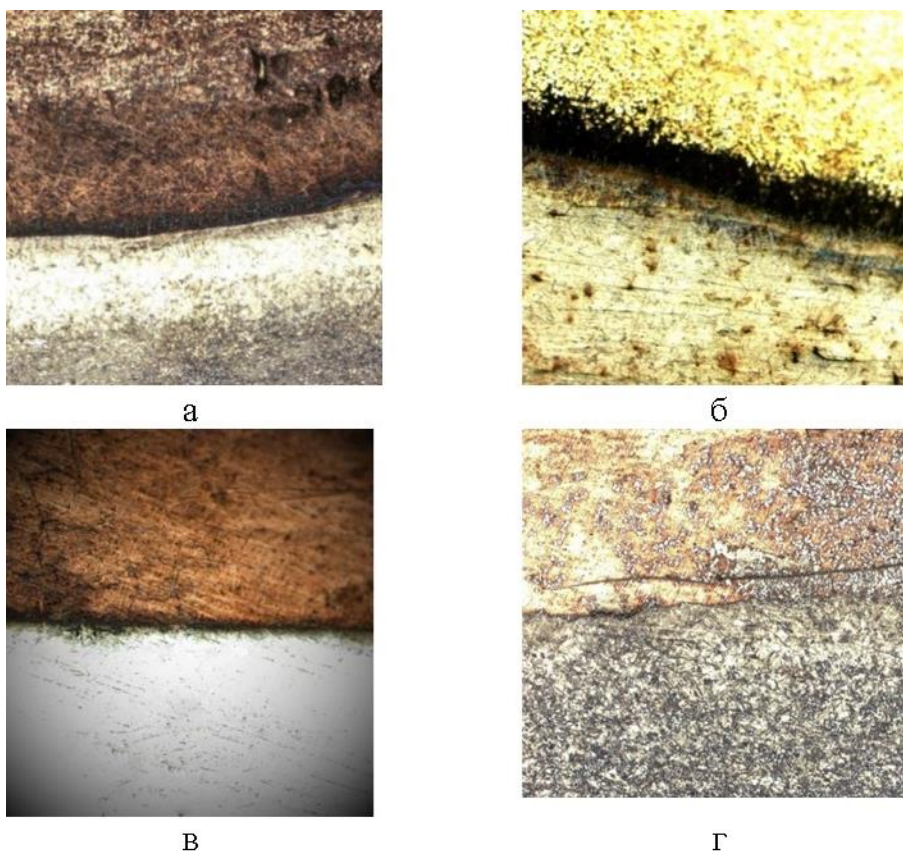


Рисунок 41 – Микроструктура исследуемых образцов:
а – РЗ, б – МЗ, в – КЗ, г – СЗ, $\times 100$

«Анализ микроструктур показал, что в каждом образце сплавление приварки с основным металлом составляет 100 % (рисунок 41).

Структура Си литая, поскольку сформирована из жидкой фазы.

Структура стали соответствует структуре стали 09Г2С в отожженном состоянии.

Си и сталь образуют промежуточный слой толщиной от 10 до 20 мкм.

Структура перехода между сталью и медью мелкозернистая и вероятнее всего состоит из кристаллов интерметаллидов» [90]. Аналогичные результаты были получены авторами в [49].

5.9 Глубина проплавления

ТС используется для приварки выводов ЭХЗ непосредственно к телу трубы, в отличие от РД. Поскольку температура жидкого металла в тигель-форме не превышает 2500 °С [49] и из-за отсутствия постороннего источника нагрева «глубина проплавления основного металла при ТС будет меньше, чем при РД. В литературных источниках значений размеров глубины проплавления при ТС не было найдено» [37]. Поэтому в данной работе было предпринято решение, чтобы измерить глубину проплавления всех исследуемых образцов.

Измерение глубины проплавления (рисунок 42) проводили на универсальном металлографическом микроскопе «Axiovert 200MAT» (фирма Carl Zeiss, Германия) (рисунок 39).

Считаем, что «на глубину проплавления при ТС влияет температура расплава, которая зависит от теплофизических свойств материала тигля при других одинаковых условиях. Согласно [34] материалом РТФ является керамика, а МТФ – графит. Теплофизические свойства этих материалов резко отличаются, следовательно, следует ожидать и различную глубину проплавления стали [37].

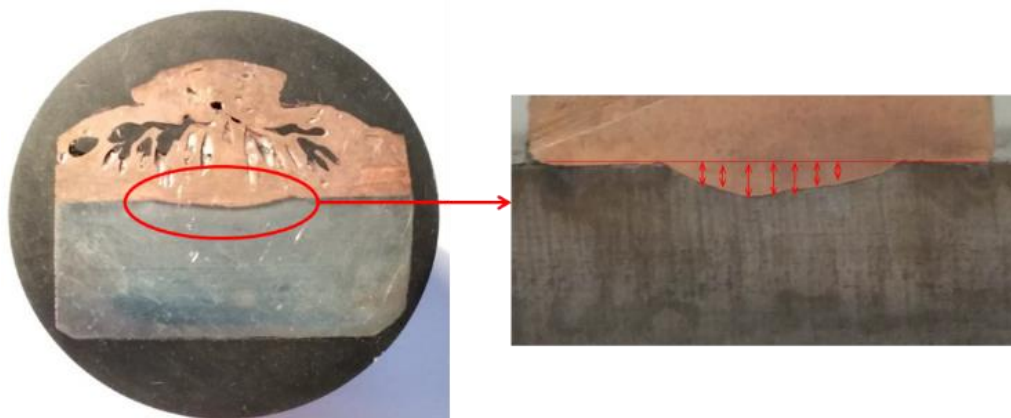


Рисунок 42 – Глубина проплавления основного металла после приварки термитной сваркой вывода ЭХЗ. Образец РЗ, $\times 2$

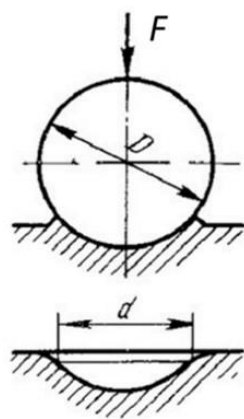
«Поскольку керамика обладает более низкой теплопроводностью, по сравнению с графитом, для образца РЗ температура расплава предполагается выше, чем для образцов МЗ, КЗ, СЗ, что и подтверждают значения глубины проплавления: для образца РЗ – 1,06 мм; МЗ – 0,89 мм; КЗ – 0,80 мм; СЗ – 0,81 мм.

В [71, 78 – 81] показано, что Al может образовывать интерметаллиды с элементами, входящими в состав термитной смеси: Cu, после ее восстановления из окисла, Mn и Fe, которые входят в состав смеси в виде ферромарганца. Интерметаллиды имеют большую твердость, чем чистые металлы [91], поэтому в дальнейшем образцы подвергались измерению твердости и микротвердости» [37].

5.10 Измерение твердости околошовной зоны

«Твердость металла сварных соединений определялась с помощью универсального твердомера HBRV – 187.5 (рисунок 43) методом измерения по Бринеллю» в соответствии с ГОСТ 9012-59[92].

Твердомер HBRV - 187.5 (HBRVU - 187.5) состоит из вращательного механизма, оптической системы индикации измерений и измерительного микроскопа.



а



б

Рисунок 43 – Универсальный твердомер HBRV – 187.5:
а – схема определения твердости по Бринеллю, б – внешний вид твердомера

Рабочее пространство: 160 мм по горизонтали и 180 мм по вертикали
Габаритные размеры твердомера: длина 560 мм; ширина 260 мм; высота 760 мм. Масса 120 кг.

Измерения возможно производить при температуре воздуха плюс 10 до плюс 35 °С и относительной влажности воздуха 50 – 80 %.

Питание: напряжение 220 ± 20 В, частота 50 – 60 Гц.

Измерительная нагрузка – 1839 Н.

В твердомере HBRV - 187.5 (HBRVU - 187.5) подходит для определения твердости черных металлов (сталь, чугунное литье, малоуглеродистая сталь и закаленная сталь) и цветных металлов (сплавы алюминия и меди) для этого предусмотрена многоступенчатая нагрузка и различные виды инденторов.

В данной исследовательской работе применялся индентор Бринелля – стальной шарик диаметром 5 мм.

Диапазоны измерений твердости по шкале Бринелля от 95 до 450 НВ.

Абсолютная погрешность измерения от 6 до 18 %.

Таблица 16 – Результаты измерения твердости образцов, НВ

№ слоя	Замер согласно схеме измерения твердости									
	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
Образец Р3										
1	206	194	218	207	209	183	203	201	170	148
2	208	187	183	208	213	181	180	202	140	137
3	204	207	202	204	212	199	218	204	172	163
Образец М3										
1	162	180	183	199	225	227	208	205	193	165
2	166	179	198	217	219	208	215	198	167	207
3	169	159	203	217	220	239	219	205	188	211
Образец К3										
1	188	168	220	205	203	200	162	160	141	127
2	142	152	162	173	198	192	195	174	160	158
3	159	163	184	210	190	191	193	190	184	185
Образец С3										
1	111	115	126	208	260	273	155	131	116	117
2	127	127	110	190	162	143	144	132	106	109
3	124	206	182	196	268	168	162	147	143	133

В таблице 17 приведена статистическая обработка результатов измерения твердости металла в околошовной зоне и вне зоны присоединения вывода ЭХЗ для всех образцов и степенные уравнения трендов, описывающие распределения, представленные на рисунке 45 [92].

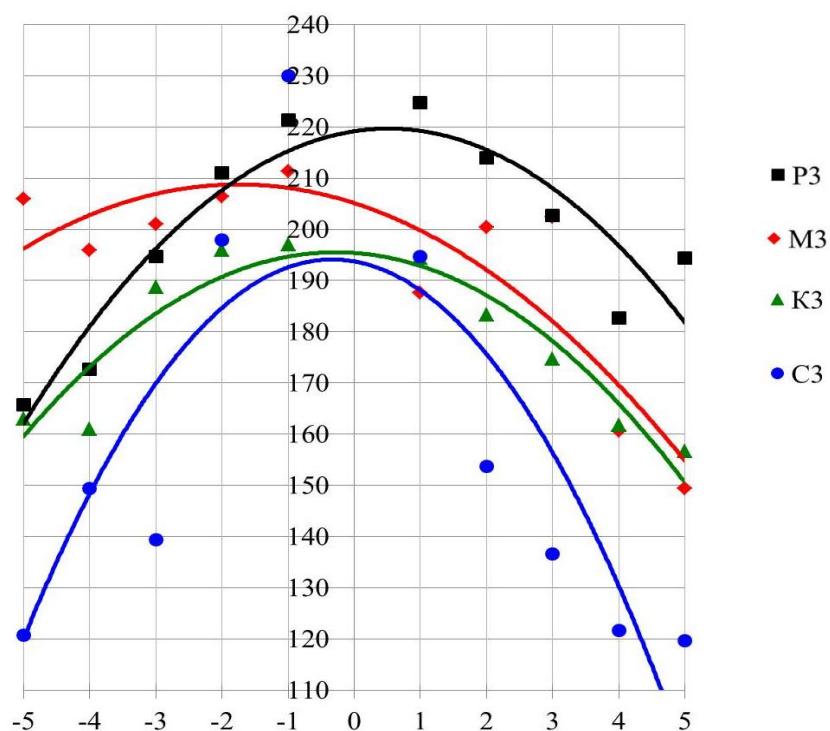


Рисунок 45 – Изменение твердости исследуемых образцов

Таблица 17 – Статистическая обработка результатов измерения твердости (HV) всех образцов

Обозначение образца	$X_d = X_{cp} \pm \Delta X$, кгс/см ²	S_n	W	$S(X_{cp})$	Уравнение линии тренда
P3	198±14	20	10	6	$HV = -1,889x^2 + 1,9697x + 219,15$ $R^2 = 0,8487$
M3	192±15	21	11	7	$HV = -1,1836x^2 - 4,1485x + 205,12$ $R^2 = 0,7601$
K3	178±12	16	9	5	$HV = -1,6132x^2 - 0,9x + 195,38$ $R^2 = 0,8701$
C3	156±27	38	24	12	$HV = -3,3966x^2 - 2,2515x + 193,73$ $R^2 = 0,6969$

где S_n – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений; W – коэффициент вариации; $S(X_{cp})$ – средняя квадратическая погрешность результата измерения среднего арифметического значения; X_{cp} – среднее арифметическое значение; ΔX – полуширина доверительной погрешности; X_d – окончательный результат измерения с вероятностью $P = 0,95$; R^2 – коэффициент стандартного отклонения, показывающий степень близости экспериментальных точек к аппроксимирующей кривой.

«Приварка катодных выводов ЭХЗ влечет изменение свойств основного металла околошовной зоны (рисунок 45)» [92]. Результаты измерения твердости показывают максимальные значения твердости по

Бринеллю в зоне сварки и постепенное снижение этих значений в зоне термического влияния и стабилизацией в основном металле во всех образцах.

«Авторы предполагают, что при термитной сварке на глубину проплавления основного металла влияет температура расплава, зависящая от теплофизических свойств материала тигель-формы.

Наибольшая твердость околошовной зоны наблюдается в образце РЗ, сваренного с применением разовой тигель-формы. Твердость околошовной зоны образцов МЗ, КЗ, СЗ, сваренных с применением многоразовых тигель-форм несколько меньше» [92].

Увеличение твердости в зоне сварки авторы [49] связывают с увеличением выделения твердой и хрупкой фазы Al_2Cu .

Авторы [71] объясняют различные значения твердости для основного металла и сварного шва быстрым охлаждением сварного шва после ТС. Поверхность сварного шва охлаждается быстрее, чем его центральная часть, что способствует образованию мартенсита, сконцентрированного на поверхности сварного шва, и твердого сварного шва на дне.

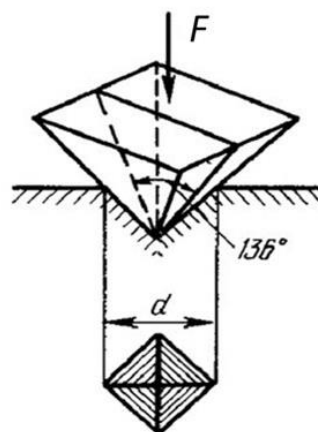
5.11 Измерения микротвердости

«Микротвердость исследовали на твердомере-микроскопе НХ1000ТМ (Remet, Италия) с использованием индентора Виккерса (ГОСТ 9450-76)» [93]. Внешний вид твердомера-микроскопа НХ1000ТМ представлен на рисунке 46.

В данной модели твердомера нагружение, выдержка груза и подъем индентора осуществляется автоматически. Это позволяет создавать одинаковые условия измерения микротвердости и уменьшает погрешность измерений.



а



б

Рисунок 46 – Твердомер-микроскоп НХ1000ТМ:
а – внешний вид, б – схема определения микротвердости по Виккерсу

Число микротвердости для индентора Виккерса (HV, МПа) определялась по формуле:

$$HV = \frac{0.1888 F}{d^2} \quad (15)$$

где F – нагрузка на индентор, Н;

d – среднее значение диагонали отпечатка индентора, мкм (рисунок 47, б).

Микротвердость определяли на образцах с тщательно отшлифованной и полированной поверхностью в соответствии с [94] при нагрузке 100 г и времени нагружения 10 с. Схема измерения микротвердости после приварки катодного вывода ЭХЗ термитной сваркой представлено на рисунке 47.

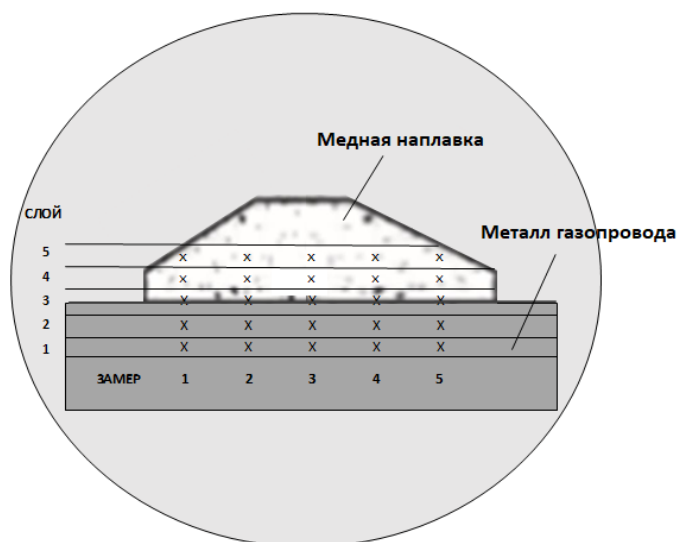


Рисунок 47 – Схема измерения микротвердости в пяти слоях:
 1 – сталь; 2 – переходная зона (сталь – зона сплавления);
 3 – зона сплавления; 4 – переходная зона (зона сплавления – медь); 5 – медь

Микроструктуры исследуемых образцов с отпечатками индентора при измерении микротвердости представлены на рисунке 48 и 49 [93].

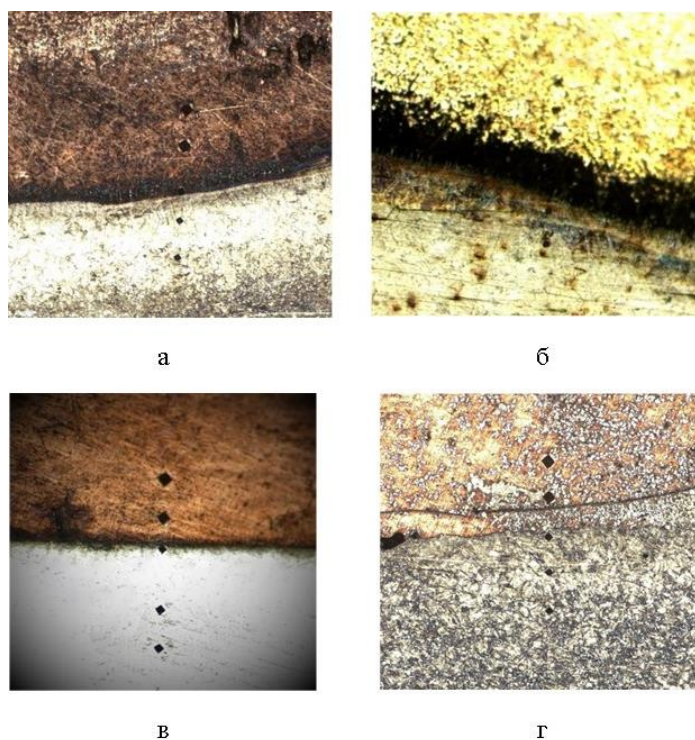


Рисунок 48 – Микроструктуры исследуемых образцов с отпечатками индентора при измерении микротвердости: а – РЗ, б – МЗ, в – КЗ, г – СЗ, $\times 100$

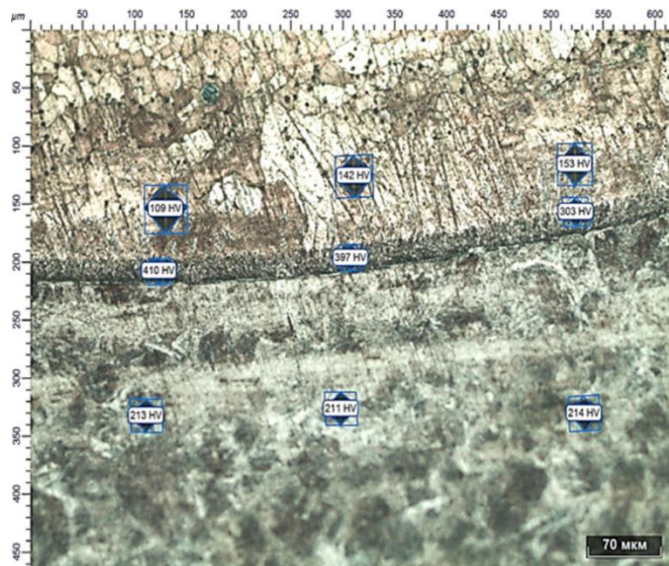


Рисунок 49 – Микроструктура образца К3 с отпечатками индентора при измерении микротвердости, $\times 1000$

Результаты измерения микротвердости в пяти зонах сварного соединения представлены в таблице 18 и на рисунке 50 [90, 93].

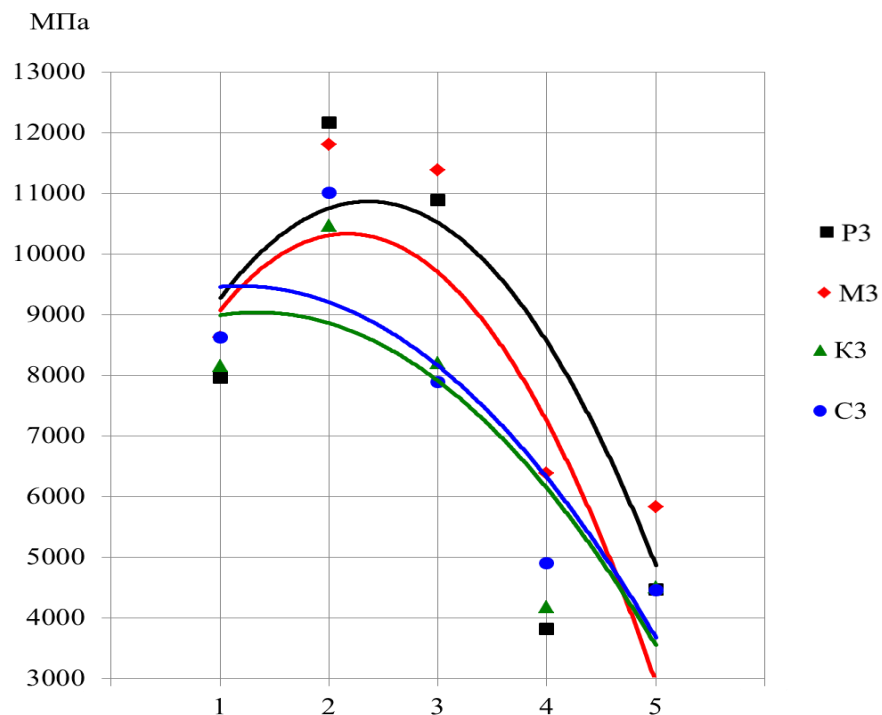


Рисунок 50 – Изменение микротвердости по сечению шва:
 1 – сталь; 2 – переходная зона (сталь – зона сплавления);
 3 – зона сплавления; 4 – переходная зона (зона сплавления – медь); 5 – медь

В таблице 18 приведена также статистическая обработка результатов измерения микротвердости в пяти зонах сварного соединения всех образцов и степенные уравнения трендов, описывающие распределения, представленные на рисунке 50.

Таблица 18 – Статистическая обработка результатов измерения микротвердости

Зона измерения	$X_d = X_{cp} \pm \Delta X$, МПа	S_n	W	$S(X_{cp})$	Уравнение линии тренда
Образец РЗ					
1	7949 ± 868	1130	14	377	$HV = -409,5x^2 + 1097,1x + 8302,6$ $R^2 = 0,7208$
2	12157 ± 1519	1976	16	659	
3	10881 ± 4173	1680	15	970	
4	3810 ± 242	315	8	105	
5	4458 ± 232	301	7	100	
Образец МЗ					
1	8607 ± 484	630	7	210	$HV = -1040,1x^2 + 4890,1x + 5311,5$ $R^2 = 0,8534$
2	11791 ± 758	987	8	329	
3	11375 ± 2685	1081	10	624	
4	6368 ± 943	1227	19	409	
5	5819 ± 587	764	13	255	
Образец КЗ					
1	8147 ± 725	944	12	315	$HV = -861,18x^2 + 4067,3x + 6062,9$ $R^2 = 0,7391$
2	10451 ± 1706	2220	21	740	
3	8190 ± 8049	3240	40	1871	
4	4172 ± 187	244	6	81	
5	4487 ± 431	561	12	187	
Образец СЗ					
1	8607 ± 484	630	7	210	$HV = -396,82x^2 + 935,98x + 8920$ $R^2 = 0,7763$
2	11002 ± 798	1038	9	346	
3	7879 ± 3725	1499	19	866	
4	4887 ± 447	426	9	174	
5	4439 ± 441	573	13	191	
<p>где S_n – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений; W – коэффициент вариации; $S(X_{cp})$ – средняя квадратическая погрешность результата измерения среднего арифметического значения; X_{cp} – среднее арифметическое значение; ΔX – полуширина доверительной погрешности; X_d – окончательный результат измерения с вероятностью $P = 0,95$; R^2 – коэффициент стандартного отклонения, показывающий степень близости экспериментальных точек к аппроксимирующей кривой.</p>					

«Влияние материала тигель-форм на микротвердость присутствует, что отражено на рисунке 50 и в таблице 18. При приварке выводов ЭХЗ с помощью РТФ микротвердость несколько выше, чем при использовании МТФ. Вероятнее всего это связано с различными теплофизическими свойствами материала тигель-форм. РТФ выполнена из керамики, а МТФ из графита» [93]. Следовательно, следует ожидать и различную глубину проплавления материала и соответственно, разную микротвердость сварного соединения.

«Из таблицы и графика видно, что наибольшая микротвердость наблюдается в зоне сплавления из-за образования интерметаллидов» [93].

«В [95, 96] показано, что алюминий может образовывать интерметаллиды с многими элементами, в частности, входящими в состав термитной смеси: медью, после ее восстановления из окисла, марганцем и железом, которые входят в состав смеси в виде ферромарганца. Интерметаллиды имеют большую твердость [96], чем чистые металлы» [93].

«В [97] было предположено, что такую твердость дают интерметаллиды, алюминий – медь. Однако после результатов СЭМ мы имеем, что такую твердость дает образование интерметаллида ферромарганец (MnFe), который входит в состав термитной смеси. А более высокая микротвердость в зоне сплавления со стороны железа, чем со стороны меди, вероятнее всего объясняется его более высоким содержанием» [90].

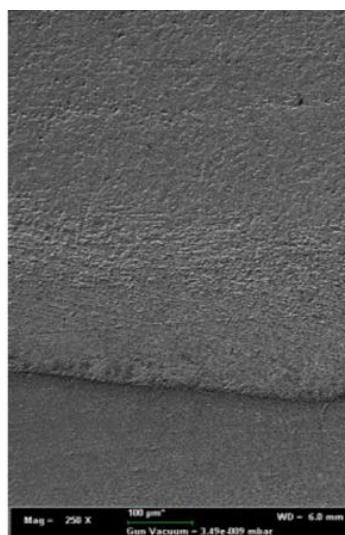
5.12 Элементный состав зоны сплавления

«Элементный состав зоны сплавления был определен на универсальном аналитическом комплексе сканирующей автоэмиссионной электронной микроскопии Merlin (фирма Carl Zeiss, Германия) с энерго-дисперсионным спектрометром, который позволяет проводить элементный анализ (рисунок 51) [90].

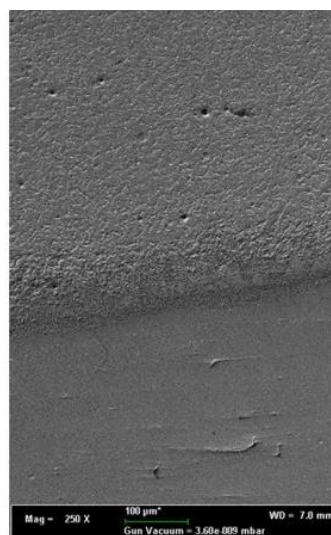


Рисунок 51 – Универсальный аналитический комплекс сканирующей автоэмиссионной электронной микроскопии Merlin

«На рисунке 52 приведены снимки образцов, выполненных на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (CarlZeiss)» [93].



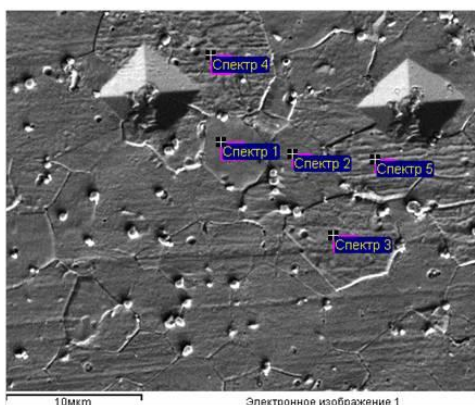
а



б

Рисунок 52 – Фото поверхности образцов: а – РЗ, б – МЗ, СЭМ, ×250

На рисунке 53 приведены фото поверхности образцов с указанием мест анализа и поэлементный состав спектров в весовых %» [90].

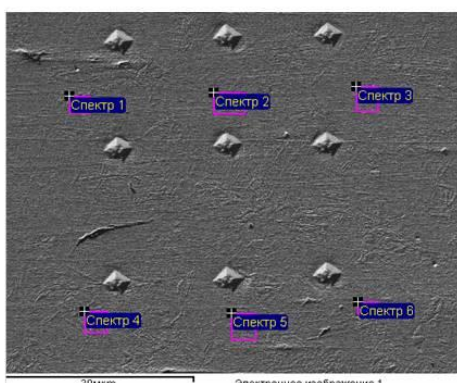


а

Спектр	В стат.	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Итого
Спектр 1	Да	0.53	0.09	0.00	2.78	2.55	94.05	100.00
Спектр 2	Да	0.70	0.00	0.00	2.97	2.49	93.84	100.00
Спектр 3	Да	0.48	0.09	0.00	2.36	2.69	94.37	100.00
Спектр 4	Да	1.18	0.00	0.14	2.46	4.55	91.68	100.00
Спектр 5	Да	0.55	0.08	0.00	2.44	3.18	93.75	100.00
Среднее		0.69	0.05	0.03	2.60	3.09	93.54	100.00
Станд. отклонение		0.29	0.05	0.06	0.26	0.86	1.06	
Макс.		1.18	0.09	0.14	2.97	4.55	94.37	
Мин.		0.48	0.00	0.00	2.36	2.49	91.68	

Все результаты в весовых %

б



в

Спектр	В стат.	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Итого
Спектр 1	Да	1.69	0.00	0.96	1.58	91.83	3.95	100.00
Спектр 2	Да	0.79	0.00	0.78	1.55	94.27	2.63	100.00
Спектр 3	Да	0.62	0.00	0.83	1.68	94.41	2.46	100.00
Спектр 4	Да	1.08	0.00	0.82	1.56	93.65	2.90	100.00
Спектр 5	Да	0.91	0.11	0.83	1.50	93.64	3.01	100.00
Спектр 6	Да	0.89	0.00	0.91	1.57	94.11	2.52	100.00
Среднее		1.00	0.02	0.85	1.57	93.65	2.91	100.00
Станд. отклонение		0.37	0.04	0.07	0.06	0.95	0.55	
Макс.		1.69	0.11	0.96	1.68	94.41	3.95	
Мин.		0.62	0.00	0.78	1.50	91.83	2.46	

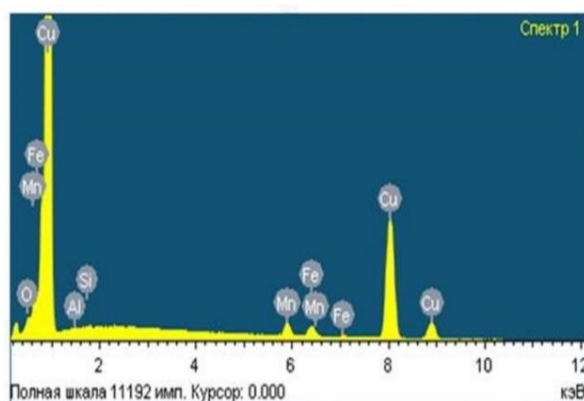
Все результаты в весовых %

г

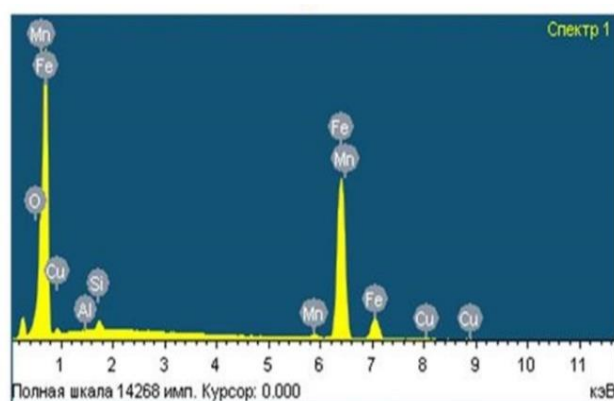
Рисунок 53 – Фото поверхности образцов с указанием мест анализа и поэлементный состав спектров для образцов P3 (а, б) и M3 (в, г)

Согласно средним спектрам в P3 таких химических элементов, как O и Si содержится меньше, а Al и Mn несколько больше в вес. % чем в M3.

«Элементный состав зоны сплавления показан на рисунке 54, а – со стороны меди и б – со стороны стали. В обоих спектрах отсутствует углерод. Очевидно это связано с его малым содержанием в основном металле» [90].



а



б

Рисунок 54 – Элементный состав зоны сплавления образца P3 со стороны меди (а) и со стороны стали (б)

По результатам СЭМ, вероятнее всего в зоне сплавления образуются интерметаллиды системы Mn-Fe (MnFe или MnFe₂), «... что видно из представленных спектров (рисунок 54 а, б). Линия железа и марганца общая (по две линии на каждом спектре)» [90].

5.13 Механические испытания на сдвиг

Для механических испытаний использовали образцы Р2, М2, К2, С2, после проведения РК.

Механические свойства сварных соединений определялись измерением твердости основного металла и зоны термического влияния, а также механическими испытаниями на сдвиг [34].

Испытания на прочность при сдвиге наплавки вывода ЭХЗ, выполненной ТС, выполнялись на разрывной машине РМ-М (рисунок 55) по схеме испытаний (рисунок 56) [34].



Рисунок 55 – Универсальная разрывная машина РМ-М

Машина испытательная РМ-М предназначена для статических испытаний на растяжение и изгиб по ГОСТ 6996 различных типов образцов

сварных соединений толщиной от 2 до 25 мм. Испытания на сжатие или сдвиг возможны при использовании специальных приспособлений.

Основные технические характеристики РМ-М приведены в таблице 19.

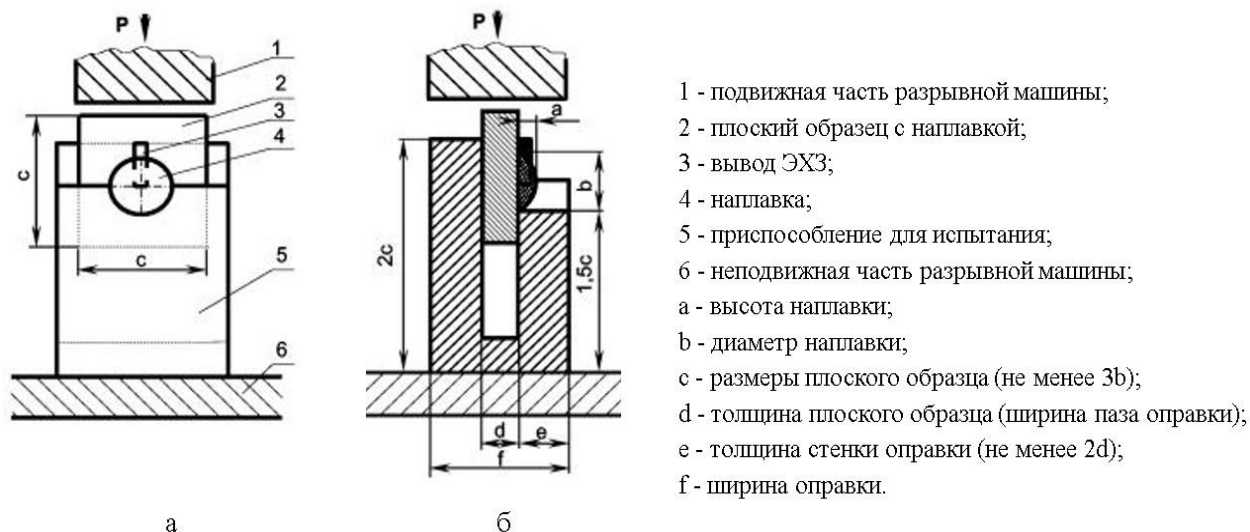


Рисунок 56 – Схема механических испытаний на сдвиг наплавки вывода ЭХЗ, выполненной термитной сваркой: а – вид спереди, б – вид сбоку

Таблица 19 – Основные технические характеристики разрывной машины РМ-М

Тип привода	гидравлический
Диапазон измерения, кН	20-500
Рабочий ход активного захвата, мм	155
Высота рабочего пространства, включая ход активного захвата, мм	270
Расстояние от оси образца до колонны, мм	125
Погрешность при нагружении, %	± 1
Максимальная скорость перемещения активного захвата, мм/мин	40
Отображение данных испытания	аналоговый циферблат
Толщина плоских образцов/ширина, мм	2-25/30
Диаметр плит сжатия, мм	180
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	не более 1200х950х1600
Масса, кг	не более 900
Мощность, кВт	3,5
Напряжение, В	380
Частота, Гц	50

Пластины, к которым осуществлялась приварка катодных выводов ЭХЗ, обрезались до нужных размеров отрезным станком ТН-100 (фирма Remet, Италия) с водяным охлаждением.

В каждом образце, до проведения испытания, выполнялись замеры диаметра наплавки (не менее трех значений).

Затем испытуемый образец помещался в специальное приспособление, устанавливался в захваты разрывной машины и испытывался на прочность при сдвиге (рисунок 58, а).

Перед испытанием необходимо проверить, чтобы образец был установлен без перекоса, по отношению к оси действия нагрузки, и чтобы закрепление образца в захватах было равномерным.

Испытания проводятся со скоростью нагружения 2,0 мм/мин.

По окончании испытания на аналоговом циферблате фиксируется максимальная нагрузка (рисунок 58, б) – это сила, приложенная к образцу, вызывающая его разрушение вдоль грани, параллельной направлению прилагаемой силы.



а



б

Рисунок 58 – Проведение механического испытания на сдвиг образца К2

Внешний вид образца до и после механического испытания на сдвиг представлены на рисунке 59.

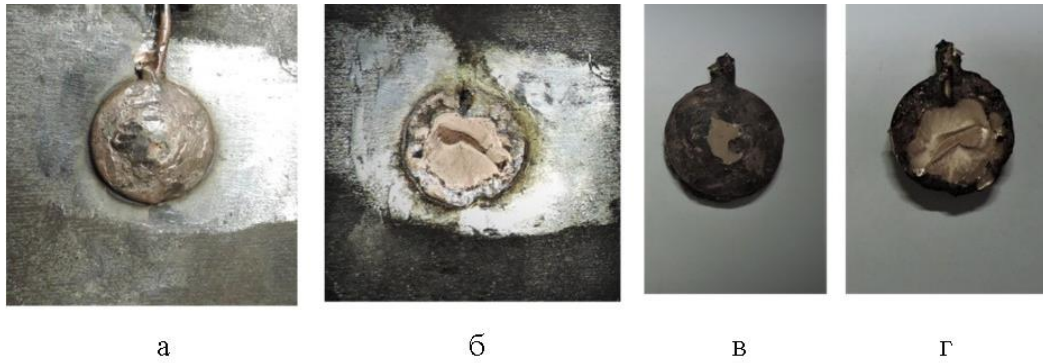


Рисунок 59 – Внешний вид наплавки до (а) и после механического испытания на сдвиг (б - зона сплавления основного металла, в - лицевая сторона срезанной приварки, г - оборотная сторона срезанной приварки) образца К2

Определяются среднее значение диаметра наплавки (d_{1cp}) и зоны сплавления (d_{2cp}), по трем измерениям согласно рисунку 60.

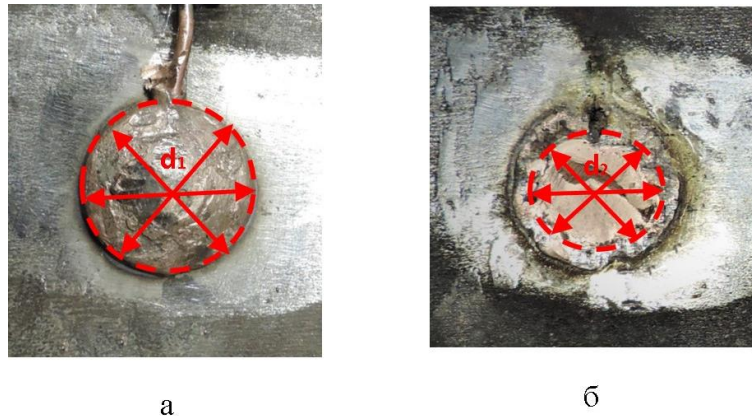


Рисунок 60 – Определение диаметра наплавки до механического испытания на сдвиг (а) и диаметра сплавления после испытания (б)

Вычисляются площадь наплавки и площадь сплавления.

Площадь наплавки вычисляется по формуле:

$$S_{\text{напл.}} = \pi d_{1cp}^2 / 4 \quad (14)$$

где d_{1cp} – среднее значение диаметра наплавки до механического испытания на срез

Площадь сплавления вычисляется по формуле:

$$S_{\text{сплав.}} = \pi d_{2cp}^2 / 4 \quad (15)$$

где d_{2cp} – среднее значение диаметра зоны сплавления после механического испытания на срез

Проверяем отношение площади сплавления к площади наплавки по формуле:

$$\Delta = S_{\text{напл.}} / S_{\text{сплав.}} * 100\% \quad (16)$$

В таблице 20 приводятся результаты механических испытаний на сдвиг.

Таблица 20 – Результаты механических испытаний на сдвиг

Обозначение образца	Площадь наплавки, $S_{\text{напл.}}$, мм ²	Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности на сдвиг, σ , МПа	Площадь сплавления, $S_{\text{сплав.}}$, мм ²	Δ , %
P2	679	116	171	390	58
M2	753	50	67	415	55
K2	742	95	128	371	50
C2	621	41	66	314	51

По результатам механических испытаний значение прочности при сдвиге наплавке, выполненной термитной сваркой, должно составлять не менее 50 МПа, при этом отношение площади сплавления к площади наплавки должно быть не менее 50 % [34].

В результате проведения механических испытаний на сдвиг наплавки выводов ЭХЗ, выполненных ТС установлено, что все образцы удовлетворяют требованиям [34].

По характеру разрушения все образцы разрушаются со срезом и в изломе можно измерить диаметр литого ядра (площадь сплавления).

Для образца P2, выполненного с применением РТФ, предел прочности при сдвиге наибольший (171 МПа), по сравнению с образцами, выполненными с применением МТФ (M2, K2, C2).

5.14 Контактное электрическое сопротивление

Из-за требований к применению катодных выводов ЭХЗ необходимо, чтобы электропроводность в зоне приварки была приемлемой. Поэтому в данной исследовательской работе было принято решение по определению

электрического сопротивления в зоне приварки. Электрическое сопротивление измеряли с помощью микрометра Ф4104-М1, внешний вид которого представлен на рисунке 61.



Рисунок 61 – Внешний вид микрометра Ф4104-М1

Микроомметр Ф4104-М1 предназначен для измерения сопротивления постоянному току. Электропитание осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В, частотой $50 \pm 0,5$ Гц и содержанием гармоник до 5 %. Рабочие температуры от минус 30 °С до плюс 50 °С и относительной влажности воздуха до 95 % при температуре плюс 30 °С. Время установления рабочего режима не более 1 мин. Продолжительность непрерывной работы не менее 8 часов. Время перерыва для повторного включения не менее 5 мин. Имеет усиленную изоляцию и относится к II классу защиты. Мощность, потребляемая от сети переменного тока, не превышает 4 В·А.

Микроомметр обеспечивает измерение сопротивления постоянному току на 12 диапазонах: 0 – 100 мкОм; 0 – 1 мОм; 0 – 10 мОм; 0 – 100 мОм; 0 – 1 Ом, 0 – 10 Ом; 0 – 100 Ом; 0 – 1 кОм; 0 – 10 кОм; 0 – 100 кОм; 0 – 1 МОм; 0 – 10 МОм.

Для определения электрического сопротивления использовали образцы P2, M2, K2, C2.

Измерение электросопротивления контактов производили микроомметром при температуре окружающего воздуха плюс 20 °С и относительной влажности воздуха 80 %, с помощью щупов с острыми

иглами, способными разрушить оксидную пленку. Схема проведения измерений контактного электросопротивления приводится на рисунке 62.

Режим измерений: сила тока в измеряемом сопротивлении 3 – 4 А; длительность импульса измерительного тока 160 мс.

При измерениях контактных сопротивлений обычно наблюдается большой разброс значений, поэтому для получения наиболее стабильных значений, места измерений качественно зачищали шкуркой до чистого металла с двух сторон и на каждом образце производили по 3 измерения с последующей статистической обработкой результатов измерений.

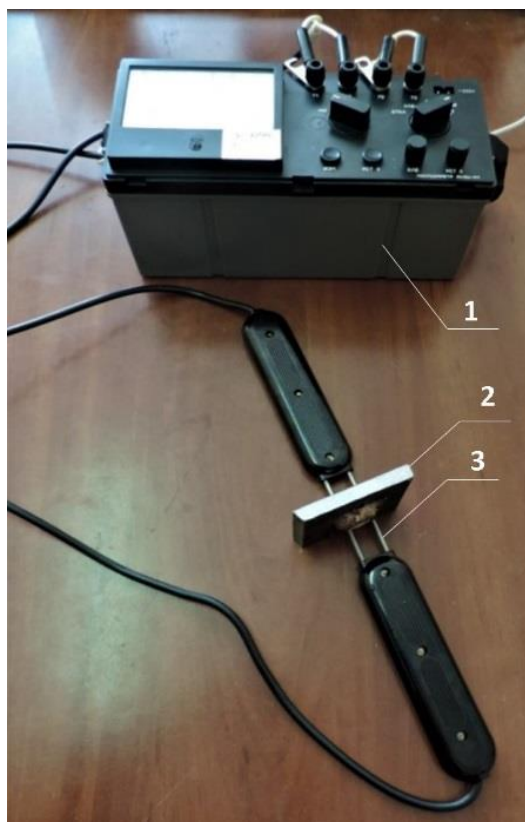


Рисунок 62 – Схема проведения измерений контактного электросопротивления:
1 – микроомметр, 2 – образец, 3 – щупы

Результаты измерения электросопротивления контактов представлены в таблице 21 и на рисунке 63.

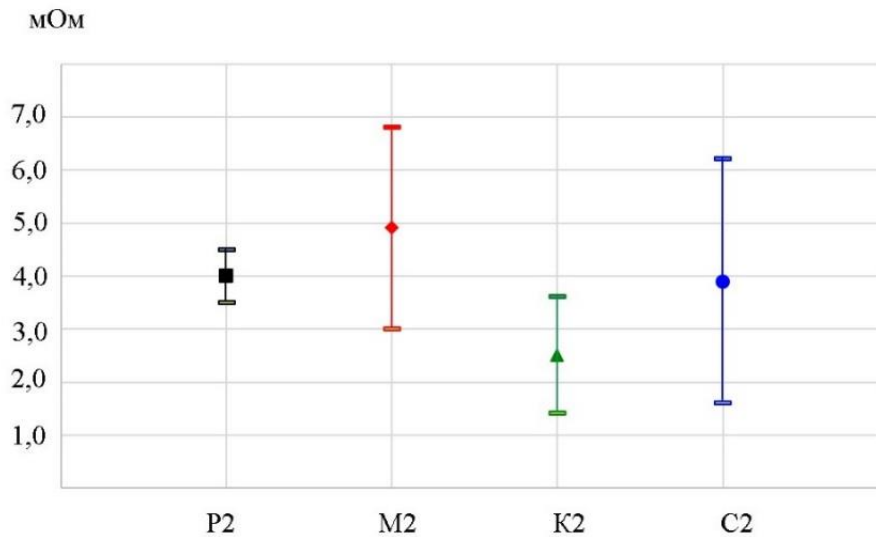


Рисунок 63 – Измерение контактного электросопротивления

В таблице 21 также приводится статистическая обработка результатов измерения электросопротивления контактов.

Таблица 21 – Статистическая обработка результатов измерения электросопротивления контактов

Обозначение образца	$X_d = X_{cp} \pm \Delta X$, мОм	S_n	W	$S(X_{cp})$
P3	$4,0 \pm 0,5$	0,2	5	0,1
M3	$4,9 \pm 1,9$	0,8	16	0,5
K3	$2,5 \pm 1,1$	0,5	18	0,3
C3	$3,9 \pm 2,3$	0,9	24	0,5

где S_n – средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений; W – коэффициент вариации; $S(X_{cp})$ – средняя квадратическая погрешность результата измерения среднего арифметического значения; X_{cp} – среднее арифметическое значение; ΔX – полуширина доверительной погрешности; X_d – окончательный результат измерения с вероятностью $P = 0,95$.

В количественном отношении при прочих равных условиях самое большое электросопротивление контакта у соединения M3. Поскольку контакты должны иметь наиболее низкое значение электросопротивления, следовательно, наилучшим можно признать соединение K3 характеризующееся минимальным электросопротивлением контакта.

Заключение

При выполнении данной исследовательской работы проведен критический анализ возможных и применяющихся способов сварки катодных выводов ЭХЗ к МГ.

Установлено, что наиболее технологически простым и высоконадежным способом присоединения катодных выводов ЭХЗ к МГ является термитная сварка.

Приварка катодных выводов ЭХЗ влечет изменение свойств металла околошовной зоны МГ.

Для исследования влияния термитной сварки катодных выводов ЭХЗ на надежность МГ была разработана методика проведения исследований (изучение структуры, микрохимического состава, механических свойств и электрического сопротивления сварных швов), скомпоновано необходимое сварочное оборудование и оснастка.

Термитная сварка производится с использованием четырех из ныне существующих комплектов сварочного оборудования:

- многоразовая тигель-форма с медной термитной смесью;
- многоразовая тигель-форма с термокарандашом;
- многоразовая графитовая оправка с паяльно-сварочным стержнем;
- разовая тигель-форма с медной термитной смесью внутри.

В ходе работы проведен сравнительный анализ существующих способов соединения катодных выводов ЭХЗ термитной сваркой к МГ и даны рекомендации по выбору оптимального способа.

Исходя из всех проведенных исследований в качестве оптимального способа термитной сварки катодных выводов ЭХЗ к МГ предложено применение термитной сварки с использованием термокарандаша в комплекте с многоразовой графитовой тигель-формой. Поскольку данный способ оказывает минимальное влияние на изменение структуры и свойств металла МГ.

Пористость образца К2 примерно одинакового размера и равномерного распределения по всему внешнему диаметру приварки.

В работе сделано предположение, что при термитной сварке на глубину проплавления основного металла влияет температура расплава, зависящая от теплофизических свойств материала тигель-формы. Материалом РТФ является керамика, а МТФ – графит. Керамика обладает более низкой теплопроводностью, по сравнению с графитом, соответственно и воздействие на материал приварки и основной металл будет различным.

Глубина проплавления основного металла образца К2 минимальна из всех исследуемых и составляет 0,80 мм. Твердость по Бринеллю околошовной зоны образца К3 с применением МТФ (178 ± 12 кгс/см²) меньше, чем для РТФ (198 ± 14 кгс/см²). Наибольшая микротвердость наблюдается в зоне сплавления из-за образования интерметаллидов. По результатам СЭМ это интерметаллиды системы Mn-Fe.

Данный способ показывает хороший результат в ходе исследования механических свойств по прочности на сдвиг. Для образца К2, выполненного с применением МТФ, предел прочности при сдвиге (128 МПа) меньше, чем для Р2 выполненного с применением РТФ (171 МПа), но не сильно уступает.

Данный способ также показал лучшие результаты по электросопротивлению. Поскольку контакты должны иметь наиболее низкое значение электросопротивления, следовательно, наилучшим можно признать соединение К3, характеризующееся минимальным электросопротивлением контакта $2,5 \pm 1,1$ мОм.

На основании проведенных исследований разработан технологический процесс термитной сварки катодных выводов ЭХЗ к МГ с применением многоразовой тигель-формы в комплекте с термокарандашом, который может применяться на практике.

Список используемых источников

1. Гуляев А. П. [Текст]: Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., пере раб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. <http://transenergostroy.ru/blog/>
3. Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте [Текст]: / Под ред. Б. Е. Прусенко, В. Ф. Мартынюк. – М.: ООО «Анализ опасностей», 2003.
4. Техника антикоррозионной защиты подземных трубопроводов [Текст]: учеб. пособие / [В. В. Кравцов М. В. Кузнецов, А. Г. Гареев и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, Ин-т доп. проф. образования. – Уфа: Монография, 2008. – 378, с.: ил. – Библиогр.: с. 377 – 379. – 500 экз. – ISBN 978-5-94920-102-2.
5. Мальков, О. В. [Текст]: Сварка и пайка выводов электрохимзащиты магистральных трубопроводов, 2017, – 106 с.
6. <http://prod.bobrodobro.ru>
7. Ментюков, И. В. [Текст]: Электрохимическая защита магистральных трубопроводов от коррозии. М., ГАНГ, 1996г.
8. <http://avl.net.ua>
9. Лашко, С. В. Лашко, Н. Ф. [Текст]: Пайка металлов. - М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
10. <https://mydocx.ru>
11. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменением N 1)
12. <http://rengm.ru>
13. Бекман В. Катодная защита от коррозии: справочн. Издание / В. Бекман, В. Швенк. М.: Металлургия, 1984. – 496 с.
14. mypractic.ru/istoriya-razvitiya-katodnoj-zashhity-ot-korrozii.html
15. https://vk.com/wall-168231940_66
16. <https://pellete.ru/trub/vidy-korrozii-truboprovodov.html>

17. Барсукова Е. А., Моторин К. В. Причины возникновения коррозии в подземном магистральном газопроводе // Сварка-пайка-обработка материалов давлением: сборник материалов XIV (Тольятти, 18 апреля 2018 г.) и XV (Тольятти, 11 апреля 2019 г.) студенческих научно-технических конференций/ под ред. В.В. Ельцова, А.С. Климова. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2019, с. 148-152;

18. <http://defektoskopist.ru/showthread.php?t=4368&page=9>

19. <http://energyzone.com.ua/statya/vzryv/2012426251-vzryv-na-gazoprovode-karadag---tbilisi---erevan.html>

20. Барсукова Е. А., Моторин К. В. Способы защиты магистральных газопроводов от электрохимической коррозии // Сварка-пайка-обработка материалов давлением: сборник материалов XIV (Тольятти, 18 апреля 2018 г.) и XV (Тольятти, 11 апреля 2019 г.) студенческих научно-технических конференций/ под ред. В.В. Ельцова, А.С. Климова. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2019, с. 153-157;

21. <https://helpiks.org/8-51405.html>

22. <https://www.skachatreferat.ru/referaty/Пассивная-Защита-Трубопроводов-От-Коррозии/85143696.html>

23. https://allbest.ru/otherreferats/manufacture/00831850_0.html

24. <http://dobi.oglib.ru/bg1/4834/163.html>

25. <http://ros-pipe.ru/clauses/mekhanizm-korrozii-metallicheskih-sooruzheniy-nef/>

26. http://www.studmed.ru/view/diplomnyy-proekt-korroziya-metallov_b6b37848_06a.html

27. https://studopedia.su/19_60616_konstruktsii-zavodskogo-polietilenovogo-pokritiya-izolyatsionnie-materiali.html

28. Данилов, И. Е. Магистерская диссертация. Реконструкция средств электрохимической защиты магистрального газопровода. [Текст]: Национальный исследовательский томский политехнический университет

(ТПУ), Институт природных ресурсов (ИПР), Кафедра транспорта и хранения нефти и газа (ТХНГ) – Томск, 2016.

29. Р. В. Агинец, А. С. Кузьбожев, И. В. Шишкин, И. В. Глотов. Электроизмерения на подземных газонефтепроводах [Текст]: методические указания / Р. В. Агинец [и др.] – Ухта: УГТУ, 2007. – 50 с.

30. <http://tokarmaster.ru/drugoe/osobennosti-katodnoj-zashhity-truboprovodov-ot-korrozii.html>

31. <http://evroterm32.ru/stantsiya-katodnoy-zaschity-gazoprovoda-printsip-raboty/>

32. СТО Газпром 9.2-002-2009. Защита от коррозии. Электрохимическая защита от коррозии. Основные требования. Москва: Издательство стандартов, 2009

33. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии;

34. СТО Газпром 2-22-136-2007. «Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральный трубопроводов. Часть I». Руководящий документ. [Текст]:

35. СТО Газпром 2–2.2–137–2007. «Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральный газопроводов. Часть II». Руководящий документ. [Текст]:

36. СТО Газпром 2–2.2–115–2007. «Инструкция по сварке магистральный газопроводов с рабочим давлением до 9,8 МПа включительно» Руководящий документ. [Текст]:

37. Мухамадеев И. М., Барсукова Е. А. Влияние тигель-форм на некоторые свойства сварных соединений термитной сваркой // КНИТУ-КАИ, XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, 7 – 8 ноября 2019 года: Материалы конференции. Сборник докладов. В 6 т.; Т. 1. секция 2, подсекция 2.1 – Казань: изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019. – с. 319-323.

38. Б. В. Малкин, А. А. Воробьев. Термитная сварка. Издательство министерства коммунального хозяйства РСФСР, Москва. 1963. 105 с.
39. <https://www.autowelding.ru/index/0-30>
40. <http://www.samsvar.ru/stati/termitnaya-svarka.html>
41. https://studwood.ru/1601830/tovarovedenie/termitnaya_svarka
42. https://revolution.allbest.ru/manufacture/00674016_0.html
43. История сварки: XV - середина XX в. / [А. Н. Корниенко]; под ред. Б. Е. Патона; Нац. акад. наук Украины, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. - Киев: Феникс, 2004. - 209 с.: ил.
44. student.zoomru.ru/history/istoriya-razvitiya-termi...1117.1759902.s2.html
45. Robert W. Messler, Jr., Joining of Materials and Structures, Elsevier Butterworth–Heinemann, 2004, pp. 611, 679.
46. Redkin, K. V., Garcia, C. I., Deardo, A. J., Gutscher, D., Kalay, S., «Microstructural analysis of thermite welds», ASME 2010 Joint Rail Conference, JRC2010, Code 81896, Vol.1, 149-156.
47. S. Rajanna, H. K. Shivanand, Akash Deep B. N, «Improvement in Mechanical Behavior of Improvement in Mechanical Behavior of Rail Steel», World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2009.
48. A. C. Davies, The science and practice of welding, Vol.1, Welding science and technology, 10th Ed., Cambridge University Press, 2003, pp. 42-43.
49. Behrouz Abnar, Pourya saber-Ghafouri, Hossein Aghajani «Thermite Welding of Aluminum Conductor by Addition of Copper» Proceedings of Iran International Aluminum Conference (IIAC2012) May 15-16, 2012, Arak, I.R. Iran.
50. C. P. Lonsdale, «History, Process Developments, Current Practices and Outlook for the 21st Century», Metallurgical Engineer, Conrail Technical Services Laboratory, Altoona, PA 16601.
51. Y. Wang, Z. Hu, Y. Shi, Wang Xi, «Experimental Study on Mechanical Properties of Rail Thermit Welding Joints at Low Temperature», Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference

52. M. F. Rej dak, «Method for Welding Aluminum Article to Another Metal Article», US Patent No. 2870498, 1959.

53. M. Suban, S. Bozic, A. Zajec, R. Cvelbar, B. Bundara, «Crack analysis in thermite welding of cathodic protection», Institute of Metal Constructions, Mencingerjeva 7, SI-1000 Ljubljana, Slovenia, 2011.

54. ПБ 03-273-99. «Правила аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства». Руководящий документ. [Текст]:

55. <https://docplayer.ru/27763196-Instrukciya-po-termitnoy-privarke-i-ts-s1.html>

56. Мурашкин Р. С., Никитин В. М. Исследование адсорбционного понижения прочности и пластичности нержавеющей сталей в контакте с медью. Физика и химия обработки материалов, 1970, J 64, с. 114-119.

57. Аснне Е. А., Прохоренко В. М., Швиндлерман Л. С. О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь. Сварочное производство, 1965. № 11. с. 7-9.

58. B. Godec, V. Grdun, “Krhkost nizkoogljicnega jekla zaradi stika s tekočo kovino”, Mater. tehnol., 3/4, 2001, pp. 181-186.

59. V. N. Semenov, “Effect of copper-silver solder melt on the properties of high-strength and high-temperature alloys and steels”, Metal Science and Heat Treatment, 10, 1999, pp. 426-433.

60. V. N. Semenov, “Nature of initiation and propagation of cracks in precipitationhardening alloy soldered under the action of copper-silver molten pool”, Metal Science and Heat Treatment, 11/12, 2001, pp. 473-475.

61. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. М.: Metallurgizdat. 1960. 322 с.

62. Вествуд А., Прис К., Камдар М. Хрупкие разрушения в среде жидкого металла. М. Мир, 1976. 706 с.

63. S. P. Lynch, “Failures of Engineering Components Due to Environmentally Assisted Cracking”, Journal of Failure Analysis and Prevention, 5, 2003, pp. 33-42.

64. R. E. Clegg, “A fluid flow-based model to predict liquid metal induced embrittlement crack propagation rates”, *Engineering Fracture Mechanics*, 16, 2001, pp. 1777-1790.

65. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение. 1974. т. 2. 359 с.

66. В. В. Ардентов, А. Е. Вайнерман, В. Ф. Захаров и др. Влияние проникновений медного сплава в сталь на свойства биметалла. *Автоматическая сварка*, 1979, № 5, с. 36-38.

67. Вайнерман А. Е. Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Автоматическая сварка*, 1981, № 6, с. 22-25, 29.

68. E. Hörnlund, J. K. T. Fossen, S. Hauger, C. Haugen, T. Havn, T. Hemmingsen, “Hydrogen Diffusivities and Concentrations in 520M Carbon Steel under Cathodic Protection in 0.5M NaCl and the Effect of Added Sulphite, Dithionite, Thiosulphate, and Sulphide”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2, 2007, pp. 82 – 92.

69. Weigl, M, & Schmidt, M. *Modulated laser spot welding of dissimilar copper–aluminum connections*. Germany: Karlsruhe, s.n. 2009.

70. Song-bai, X., Jian, D., Xiao-chun, L., & Yi-yu, Q. Brazing technology of LY12 Al-alloy at middle temperature [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003. 24(3), 21–23.

71. Lloyd A. C. Aluminum dissimilar metal joint and method of making same. Unites state, Patent No. 2790656, 1957.

72. Tohid, S., Abdollah-zadeh, A., & Sazgari, B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 490(1-2), 652–655.

73. Song, J., Lan, G.F., Lui, T., & Chen, L. Microstructure and tensile properties of Sn–9Zn–xAg lead-free solder alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(8), 1047–1051.

74. Ouyang, J., Yarrapareddy, E., & Kovačević, R. Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 172(1), 110–122.

75. Jariyaboon, M., Davenport, A. J., Ambat, R., Connolly, B. J., Williams, S. W., & Price, D. A. The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024–T351. *Corrosion Science*, 2007, 49(2), 877–909.

76. Huseyin, U., Claudio Dalle, D., Argagnotto, A., Ghidini, T., & Gambaro, C. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel [J]. *Materials and Design*, 2005, 26(1), 41–46.

77. Pang, J., Tan, K., Shi, X., & Wang, Z. Microstructure and intermetallic growth effects on shear and fatigue strength of solder joints subjected to thermal cycling aging. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 307(1-2), 42–50.

78. Stein, F. Summer School on Iron Aluminides Part 1: The binary Fe-Al system. In *Proceedings of the 5th Discussion Meeting on the Development of Innovative Iron Aluminum Alloys in Prague*, Prague, Czech Republic, 21–24 September 2009.

79. <https://extxe.com/13979/intermetallidnye-splavy-sistemy-fe-al/>

80. L. F. Mondolfo, *Manganese in Aluminium Alloys*, Manganese Centre, Neuilly sur Seine, France, (1977).

81. N. Krendelsberger, F. Weitzer, and J. C. Schuster, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33A, 3311-3319 (2002).

82. Marjan Suban, Simon Božič, Andrej Zajec, Robert Cvelbar, Borut Bundara «Analysis of Cracks Resulting from Thermite Welding of Cathodic Protection» *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe*, Portorož, Slovenia, Sept. 6-9, 2010

83. <https://yato-tools.ru/raznoe/chto-takoe-perexodnoe-soprotivlenie-chto-takoe-perexodnoe-soprotivlenie-►-izmerenie-perexodnogo-soprotivleniya-kontaktov-►-nauka-►-drugoe.html>

84. <http://enginiger.ru/materials/nizkolegirovannye-stali/stal-09g2s-konstrukcionnaya-nizkolegirovannaya-dlya-svarnyh-konstruktsij/#naznachenie>

85. ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия

86. ГОСТ 859-2014. Медь. Марки

87. <https://kvazar-ufa.com/tigel-forma-razovaya-rtf.html>

88. РД 03-613-03. «Порядок применения сварочных материалов при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов». Руководящий документ. [Текст]:

89. Барсукова Е.А., Моторин К.В. Радиографический контроль катодных выводов ЭХЗ, выполненных термитной сваркой // Сборник материалов научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» (Тольятти, 2020 г.).

90. Мухамадеев И. М., Барсукова Е. А. Исследование состава и измерение твердости сварного соединения разнородных металлов выполненного термитной сваркой // X Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (МНТК-ИМТОМ - 2019), Часть 2, 5 – 6 декабря 2019 года, Казань, 2019, с. 266-270.

91. Хворова И. А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие в 2-х ч. Часть 2 /И.А. Хворова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 128 с.

92. Барсукова Е.А., Моторин К.В. Оценка твердости основного металла после приварки катодного вывода ЭХЗ термитной сваркой с применением различного оборудования // Сборник материалов научно-практической конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ» (Тольятти, 2020 г.).

93. Мухамадеев И. М., Барсукова Е.А. Влияние тигель-форм на состав и твердость сварного соединения разнородных металлов // X Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (МНТК-ИМТОМ - 2019) Часть 1, 5 – 6 декабря 2019 года, Казань, 2019, с. 74-77.

94. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

95. Цветные металлы и сплавы. Справочник. Алюминиевые сплавы. <https://libmetal.ru/al/al%20splav.htm>

96. Хворова И. А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие в 2-х ч. Часть 2 / И. А. Хворова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 128 с.

97. Мухамадеев И. М., Максимов В. К. Сравнение некоторых характеристик разнородных соединений, полученных двумя способами сварки // «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2019. –с. 911-912.