

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

**ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(наименование института полностью)

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

22.04.01 «Материаловедение и технология новых материалов»

(код и наименование направления подготовки)

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

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Структура и свойства сварных соединений магистральных  
трубопроводов высокой прочности при применении современных  
перспективных сварочных материалов»

Студент

Т. Р. Ишбулатов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

д. т. н., А.И. Ковтунов

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

Тольятти 2025

## Содержание

Введение.....	5
1. Анализ структуры и свойств сварных соединений труб, изготовленных из стали класса прочности К70.....	7
1.1 Общие сведения о свариваемости сталей.....	7
1.2 Структурно-фазовый анализ сварных соединений трубопроводной стали класса прочности К70 .....	16
2. Методика проведения исследований структуры и свойств сварных соединений стали К70 .....	21
2.1 Методика определения технологии сварки контрольного сварного соединения.....	21
2.2 Подбор сварочных материалов.....	23
2.2.1 Общие требования при подборе сварочных материалов .....	23
2.2.2 Сведения о свариваемом металле.....	25
2.2.3 Марки сварочных материалов для сварки КСС.....	27
3 Выбор оборудования для сварки, контроля и определения механических свойств.....	30
3.1 Общие требования к сварочному оборудованию .....	30
3.2 Требования к оборудованию для подогрева и термообработки КСС.....	30
3.3 Сведения о применяемом сварочном оборудовании.....	33
3.3.1 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при РД сварке .....	33
3.3.2 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при комбинированной МП+АПИ сварке.....	35
3.3.3 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при ААДП сварке .....	39
3.3.4 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при АФ сварке .....	41

3.4 Оборудование для сборки КСС .....	43
3.5 Оборудование для подогрева и контроля температуры.....	44
3.6 Оборудование для проведения неразрушающего контроля .....	47
3.7 Оборудование для механических испытаний и металлографических исследований .....	53
3.7.1 Оборудование для проведения испытаний на статическое растяжение	53
3.7.2 Оборудование для проведения испытаний на статический изгиб .....	54
3.7.3 Оборудование для проведения испытаний образцов на ударный изгиб	56
3.7.4 Оборудование для исследования твердости образцов КСС .....	58
4 Методика проведения испытаний и исследований .....	60
4.1 Маркировка КСС .....	60
4.2 Формы разделки кромок элементов КСС .....	61
4.3 Неразрушающий контроль и механические испытания образцов КСС.....	63
4.3.1 Объем неразрушающего контроля .....	63
4.3.2 Объем механических испытаний.....	63
5 Отработка технологий сварки КСС.....	69
5.1 Отработка технологии сварки ААДП .....	69
5.2 Отработка комбинированной технологии сварки МП+АПИ .....	74
5.3 Отработка технологии АФ сварки.....	75
5.4 Отработка технологии РД сварки.....	77
6 Результаты проведенных исследований механических свойств кольцевых стыковых сварных соединений труб из стали класса прочности К70...	79
6.1 Результаты неразрушающего контроля .....	79
6.2 Результаты механических испытаний КСС-ААДП-1.1 КСС- ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3.....	79
6.3 Результаты механических испытаний КСС-ААДП-2.1, КСС- ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3.....	81
6.4 Результаты механических испытаний КСС-МП+АПИ-1, КСС- МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3.....	84

6.5 Результаты механических испытаний КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3 .....	87
6.6 Результаты механических испытаний КСС-РД-1.1, КСС-РД-1.2, КСС-РД-1.3 .....	89
6.7 Результаты механических испытаний КСС-РД-2.1, КСС-РД-2.2, КСС-РД-2.3 .....	92
Заключение .....	98
Список используемой литературы и используемых источников.....	99

## Введение

Трубопроводный транспорт – стратегически важный и наиболее экономически эффективный вид транспорта углеводородов не только в Российской Федерации, но в целом в мире.

В настоящее время Российская Федерация занимает лидирующую позицию в части эксплуатации магистральных трубопроводов, общая протяжённость которых превышает 250 тыс. км, более половины из которых – это магистральные газопроводы.

Современные темпы развития энергетического сектора глобальной экономики предопределили общемировой рост потребности в энергоресурсах. Так, согласно [1] Китайская Народная Республика превращается в крупнейшего нетто-импортера природного газа в мире. «В этой связи последние два десятилетия Китай прилагает значительные усилия для строительства своими силами и/или оказания поддержки строительству магистральных газопроводов (далее – МГП) из соседних стран-экспортеров газа, а также реализует масштабный национальный проект переброски природного газа с запада на восток страны, использующий как внутренние, так и внешние источники поставок» [1].

«Еще в мае 2014 г. ПАО «Газпром» и одна из крупнейших Китайских компаний CNPC подписали соглашение о долгосрочных поставках Российского природного газа в рамках проекта «Сила Сибири». Согласно данному соглашению, РФ поставляет газ в КНР по т.н. «восточному маршруту» («Сила Сибири -1»): с Чаяндинского месторождения в Якутии и Ковыктинского в Иркутской области» [1].

«В марте 2020 г. начались проектно-изыскательские работы по строительству второго газопровода из России в Китай – «Сила Сибири-2». Маршрут МГП пройдет через территорию Монгольской Народной Республики, что удешевит стоимость строительства. При этом планируется

существенно повысить планируемую пропускную способность данной газопроводной магистрали – вплоть до 50 млрд. м<sup>3</sup> газа в год» [1].

Согласно [2] – [3] газопроводные магистрали нового поколения, при высокой пропускной способности, так же должны обеспечивать надежность, безопасность и высокие, по сравнению с существующими трубопроводами, показатели эффективности, что может быть достигнуто за счет строительства высокопроизводительных газопроводных магистралей высокого давления со сниженным собственным энергопотреблением.

В настоящее время наблюдаются тенденции к повышению рабочего давления прокачиваемого газа и/или увеличению диаметра магистральных трубопроводов. В свою очередь, это делает актуальным применение перспективных высокопрочных трубных сталей.

Так, в рамках Федеральной целевой программы, ПАО «Северсталь» совместно с ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ПАО «Газпром», разработана технология изготовления высокопрочных труб нового поколения классов прочности K70 (X90) и K80 (X100).

В перспективе, применение труб класса прочности K70 может уменьшить металлоёмкость линейной части трубопровода, что позволит снизить стоимость строительно-монтажных, транспортно-логистических операций и эксплуатационных расходов [4].

Современные исследования применения трубных сталей класса прочности K70 основаны на применении трубных сталей классом прочности K65. Эксплуатация трубопроводов из труб класса прочности K65 позволила накопить научную и производственную базу для разработки и строительства опытно-экспериментального участка из труб класса прочности K70. Таким образом, изучение технологий сварки труб из высокопрочных сталей является актуальной задачей трубопроводного транспорта.

# **1. Анализ структуры и свойств сварных соединений труб, изготовленных из стали класса прочности К70**

## **1.1 Общие сведения о свариваемости сталей**

Под свариваемостью принято понимать способность сталей образовывать сварное соединение, соответствующего качества, указанного в нормативных документах.

Определение свариваемости материалов приведено в ГОСТ 29273. «Металлический материал считается поддающимся сварке до установленной степени при данных процессах и для данной цели, когда сваркой достигается металлическая целостность при соответствующем технологическом процессе, когда свариваемые детали отвечали техническим требованиям, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют» [5].

Существует два понятия свариваемости: физическая и технологическая.

«Под физической (принципиальной) свариваемостью понимают способность данного материала (или разнородных материалов) давать неразъемное соединение путем установления внутренних связей между частицами (атомами, молекулами) соединяемых материалов вне зависимости от способа или технологии сварки, т.е. принципиальную возможность получения сварного соединения» [6].

«Под технологической свариваемостью понимают способность данного материала (или разнородных материалов) давать при выбранной технологии сварки неразъемное соединение, удовлетворяющее определенным требованиям. Свариваемость данного материала при различных способах сварки может быть различной» [6].

В современной технологии трубопроводного транспорта основным признаком, характеризующим свариваемость, является склонность стали к образованию трещин, в первую очередь холодных.

«Холодные трещины – это локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием остаточных сварочных напряжений» [7]. Они могут образовываться и в металле шва, и в зоне термического влияния.

«При сварке углеродистых и легированных сталей холодные трещины могут образовываться, если стали претерпевают частичную или полную закалку. Схема изменения структуры и свойств для ЗТВ в случае сварки закаливающихся сталей показана на рисунке 1» [8].

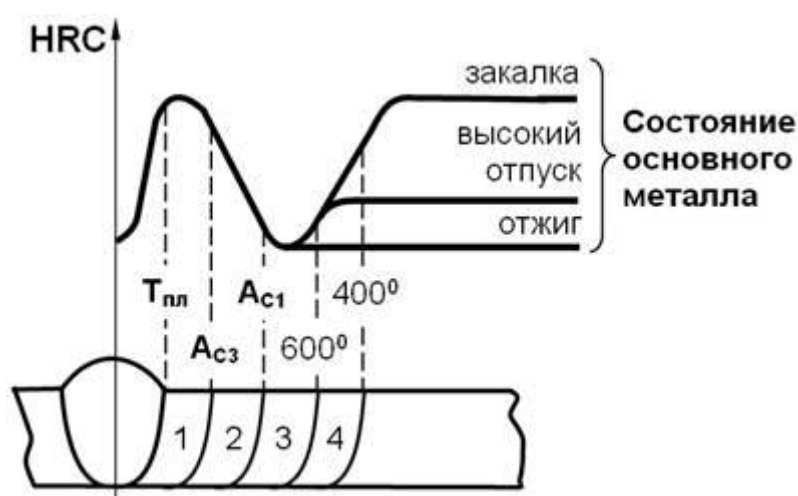


Рисунок 1 – Изменение структуры и свойств ЗТВ при сварке закаливающихся сталей: 1 – участок закалки; 2 – участок неполной закалки; 3, 4 – участок отпуска

«Холодные трещины возникают в процессе охлаждения после сварки ниже температуры 200 °С или в течение последующих нескольких суток. Трещины могут образовываться во всех зонах сварного соединения и иметь параллельное или перпендикулярное расположение по отношению к оси шва» [8].

«В соответствии с геометрическими признаками и характером излома холодные трещины получила определенные названия: «откол» - продольные в ЗТВ, «отрыв» - продольные в зоне сплавления со стороны шва (аустенитного),



«частокол» – поперечные в ЗТВ и др. (рисунок 2). Наиболее частыми являются холодные трещины вида «откол» [8].

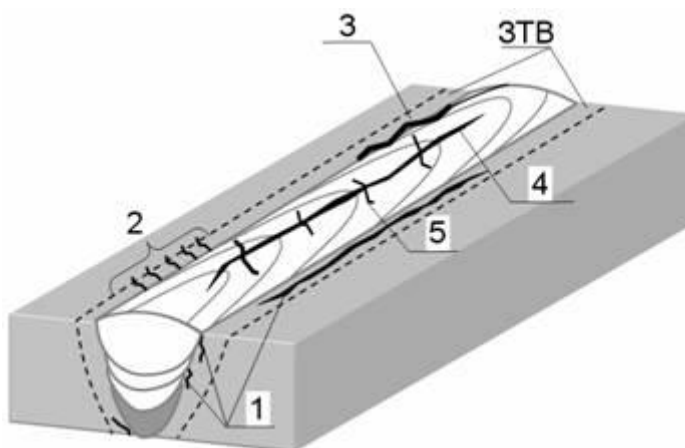


Рисунок 2 – Виды холодных трещин в стальных сварных соединениях:

1 – откол; 2 – частокол; 3 – отрыв по зоне сплавления;

4 – продольные в шве; 5 – поперечные в шве.

«Холодные трещины менее разветвленные и менее раскрытые, чем горячие. Они не всегда выходят на поверхность, могут быть закрытыми и иметь небольшую протяженность. В этих случаях их трудно выявить. Для их выявления используют прежде всего УЗК» [8].

«Образование холодных трещин начинается с возникновения очага разрушения, как правило, на границах аустенитных зерен на околошовном участке ЗТВ, примыкающих к линии сплавления (рисунок 3)» [8].

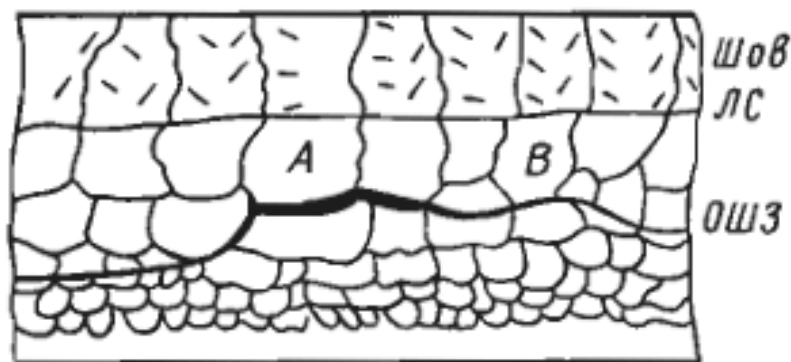


Рисунок 3 – Межкристаллитный характер холодных трещин

«Протяженность очагов трещин составляет несколько диаметров аустенитных зерен. При этом разрушение не сопровождается заметной пластической деформацией и наблюдается практически как хрупкое. Это позволяет отнести холодные трещины к межкристаллитному хрупкому разрушению. Дальнейшее развитие очага в микро- и макротрещину может носить смешанный или внутризеренный характер» [8].

«Основными факторами, обуславливающими образование холодных трещин, являются:

1 – структурное состояние металла сварного соединения, характеризующее наличием составляющих мартенситного и бейнитного типов;

2 – концентрация диффузионного водорода в зоне зарождения очага трещины, зависящие от концентрации водорода в атмосфере дуги, исходного содержания водорода в основном металле и других условий;

3 – уровень растягивающих сварочных напряжений I рода, определяемый жесткостью сварной конструкции, режимом сварки, типом металла шва и др. причинами» [8].

«Совместное влияние водорода и эквивалента углерода на образование холодных трещин в сталях приведено на рисунке 4» [8].

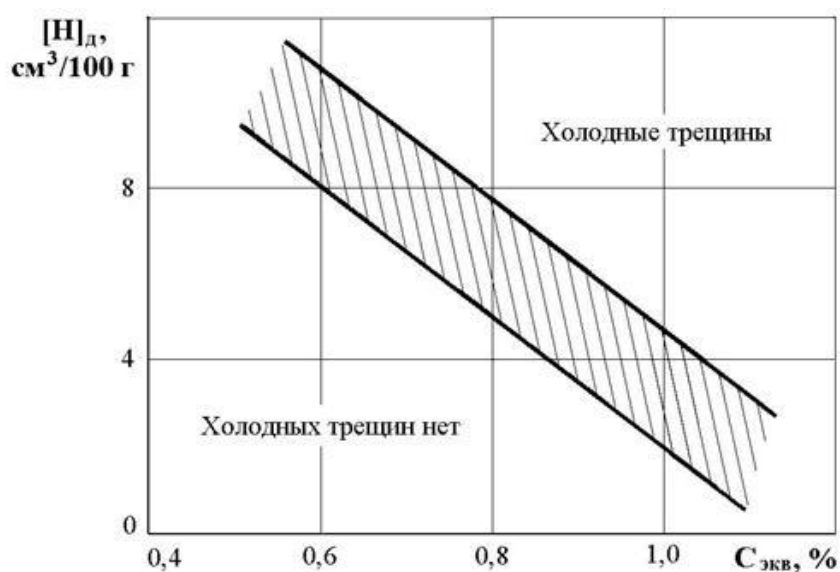


Рисунок 4 – Влияние водорода и эквивалента углерода на образование холодных трещин в сталях

«Сопrotивляемость металла образованию холодных трещин называют технологической прочностью металла в процессе фазовых превращений в твердом состоянии» [8].

«Способы оценки склонности к трещинам классифицируются по разным признакам. Прежде всего они делятся на косвенные и прямые» [8].

«Косвенные способы позволяют получать оценку склонности к трещинам расчетным путем без непосредственного испытания материалов» [8].

«Прямые способы предусматривают сварку технологических проб, специализированные испытания сварных соединений или образующих их материалов в условиях, имитирующих сварочные» [9].

«При разработке расчетных методов определения склонности металлов к образованию холодных трещин применяют два основных методических подхода. В первом случае используют параметрические уравнения, полученные статистической обработкой экспериментальных данных. Они связывают выходные параметры (показатель склонности к трещинам, требуемую температуру подогрева и другие) с входными параметрами (химическим составом, режимом сварки и другие) без анализа физических процессов в металлах при сварке, обуславливающих образование холодных трещин. Поэтому их применение ограничено областью, в пределах которой изменялись входные параметры при проведении экспериментов. При этом часто не используется все многообразие факторов, влияющих на образование трещин, в том числе и существенно значимых» [8].

«Основными критериями оценки свариваемости стали являются:

- эквивалент углерода,  $C_{\text{ЭКВ}}$ ;
- параметр трещинообразования  $P_w$ ;
- параметр стойкости против растрескивания сварного шва  $P_{\text{CM}}$ » [8].

«При первом методическом подходе широко используются уравнения 1, 2 и 3» [8].

«Расчет значения эквивалента углерода  $C_{\text{ЭКВ}}$  определяют по уравнению:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{15} + 5B, \quad (1)$$

где символы элементов означают их содержание в сплаве в %» [8].

«Стали, у которых  $C_{\text{экв}} \geq 0,45$  %, считаются потенциально склонными к образованию трещин.  $C_{\text{экв}}$  является обобщенным параметром состава стали, характеризующим ее прокаливаемость. При  $C_{\text{экв}} \geq 0,45\%$  при сварке становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения, что при условии насыщения металла водородом и высоких сварочных напряжений может привести к образованию холодных трещин. Значение  $C_{\text{экв}}$  вне связи с этими условиями не может служить показателем действительной склонности сварного соединения к трещинам» [8].

«Параметр трещинообразования в сварном шве  $P_w$  оценивает чувствительность сталей к образованию холодных трещин» [8]. Расчет параметра трещинообразования  $P_w$  определяют согласно уравнению (2) [10], [30]:

$$P_w = P_{\text{см}} + \frac{H_{\text{эл}}}{60} + \frac{K}{4 \cdot 10^5}, \quad (2)$$

Параметр стойкости против растрескивания сварного шва  $P_{\text{см}}$  является общепризнанной в мировой сварочной практике характеристикой свариваемости и позволяет ограничить опасность холодного растрескивания при сварке труб и монтаже трубопроводов [11].

Определяют параметр стойкости против растрескивания сварного шва  $P_{\text{см}}$  согласно уравнения (3):

$$P_{\text{см}} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5B, \quad (3)$$

где  $H_{\text{гл}}$  – количество диффузионного водорода в металле шва, установленное глицериновым методом, см<sup>3</sup>/100 г;

$K$  – коэффициент интенсивности жесткости, Н/(мм × мм);

$K = K_0 \times d$ ;  $K_0$  – постоянная, имеющая значения в пределах 200, 1000 Н/(мм<sup>2</sup>×мм) в зависимости от жесткости конструкции;

$d$  - толщина стали, мм.

«Для приближенных вычислений постоянную  $K_0$  можно принять равной 690 для стыковых сварных соединений толщиной до 150 мм» [12].

«При  $R_w > 0,286$  возможно образование холодных трещин. Уравнение (2) получено статистической обработкой результатов испытаний применительно к низколегированным сталям с содержанием углерода 0,07–0,22 % с пределом текучести 500 – 700 МПа при сварке с погонной энергией  $q_{п/V} = 17$  кДж/см. Использование уравнения (2) возможно для указанных составов стали и режима сварки» [8].

«Второй методический подход предусматривает анализ физических процессов в металлах при сварке, обуславливающих образование трещин. В этом случае используются концептуальные физические модели процесса разрушения при образовании трещин, аналитические зависимости законов металлофизики, регрессивные уравнения, описывающие характеристики и константы материалов на основе статистической обработки опытных данных. Такие расчетные методы имеют более универсальный характер, чем параметрические уравнения, и позволяют учитывать достаточно широкий ряд металлургических, технологических и геометрических факторов. Выполнение расчетов производится с помощью специализированного программного обеспечения» [8].

«Как видно из равнений (1, 3) показатели  $C_{ЭКВ}$  и  $R_{сМ}$  в большей степени зависят от химического состава сталей. Следовательно, уменьшение содержания углерода в стали, снижает склонность к образованию холодных трещин при сварке» [13].

В [14] на основе проведенного анализа различных вариантов прокатов классов прочности К60 – К75, сделан вывод, что современные высокопрочные стали обладают более низким содержанием углерода по сравнению с

традиционными низколегированными сталями. Это оказывает положительное влияние на их хладостойкость и свариваемость.

Также известно, что процесс сварки сопровождается образованием зоны термического влияния (далее – ЗТВ). Отличительной особенностью ЗТВ является неоднородность структуры металла шва и околошовной зоны, вызванное отводом тепла от сварочной ванны и неравномерного охлаждения в процессе сварки. На рисунке 5 представлена структурная схема ЗТВ при сварке.

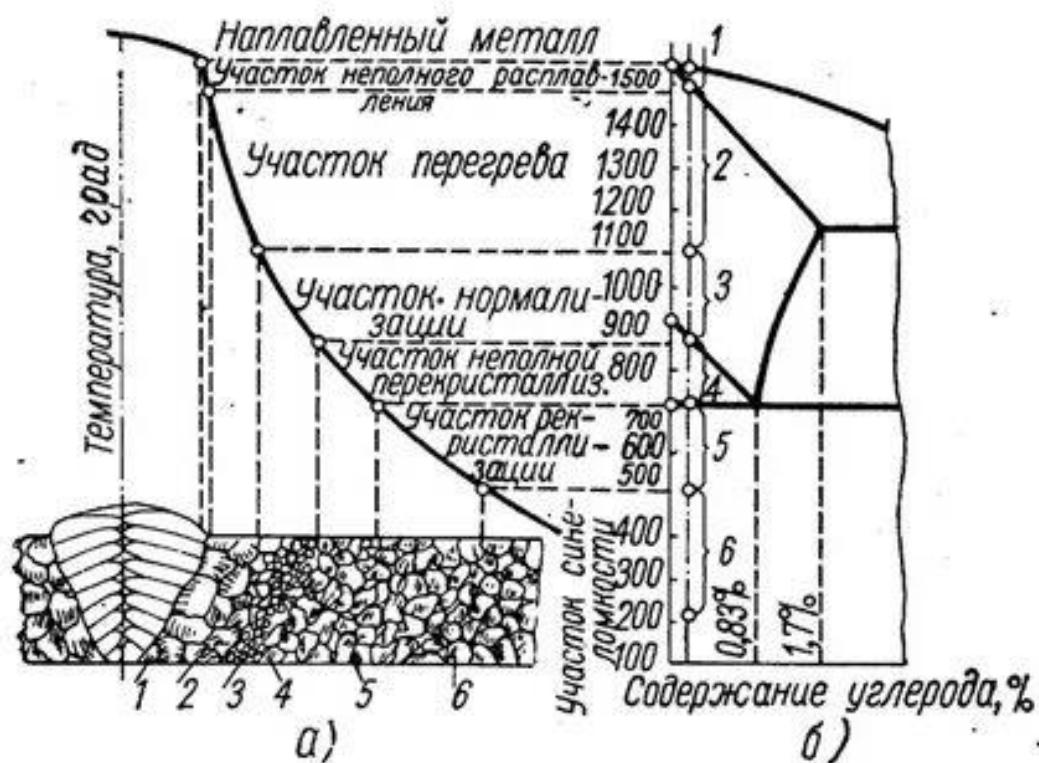


Рисунок 5 - Структурная схема ЗТВ при сварке

Известно, что размер ЗТВ и величина структурных изменений зависят от количества тепловложений в металл при сварке [15]. Согласно [16] тепловложения при сварке характеризуются величиной погонной энергии. На рисунке 6 представлены термические циклы и скорости охлаждения точек при различных значениях погонной энергии и текущего времени.

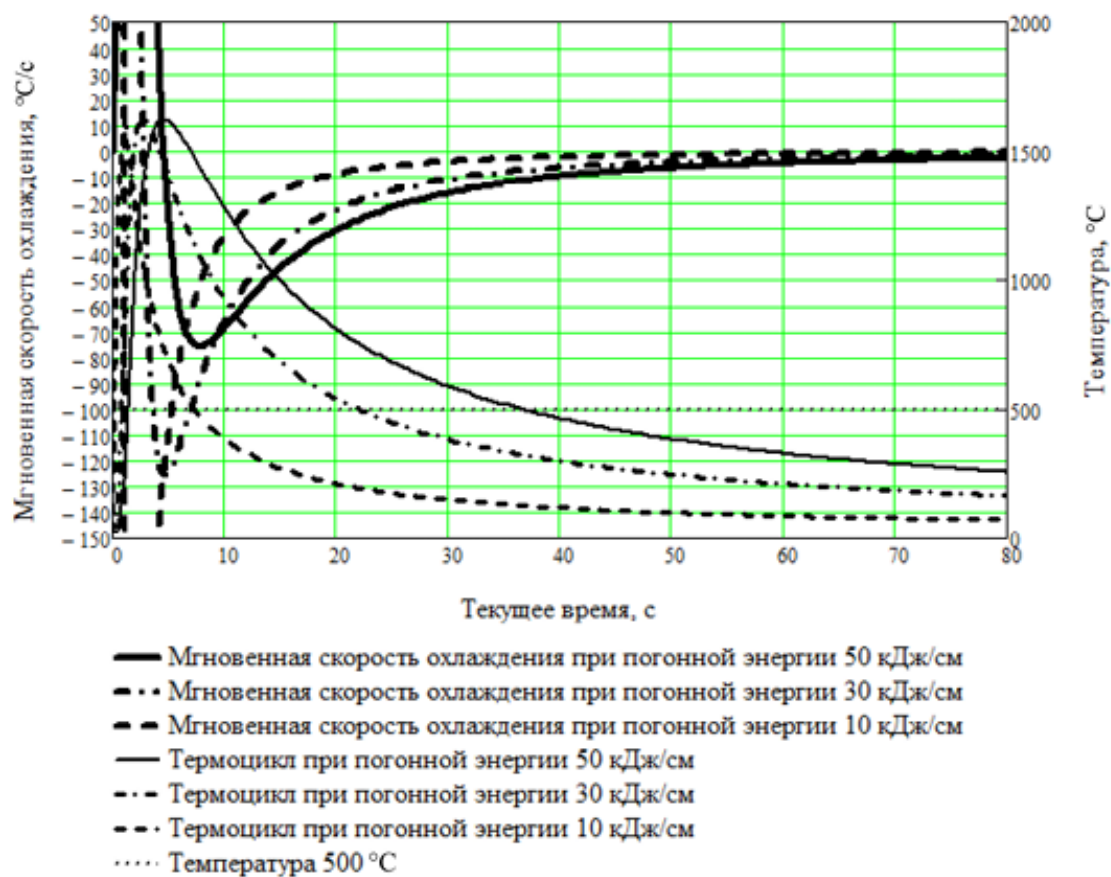


Рисунок 6 – Термические циклы и скорости охлаждения в ЗТВ

Анализ представленных данных показал, что увеличение погонной энергии приводит к более существенным структурным изменениям металла в ЗТВ, следовательно и увеличению неоднородности механических свойств.

Поэтому при исследовании свариваемости трубной стали класса прочности K70 ключевым фактором будет являться погонная энергия и связанные с ней тепловложения, приводящие к изменению структуры и механических свойств сварного соединения.

## **1.2 Структурно-фазовый анализ сварных соединений трубопроводной стали класса прочности К70**

Согласно [17] микроструктура высокопрочных трубных сталей после сварки, как правило, включает в себя пластинчатый бейнит, зернистый бейнит и вторичную фазу мартенсита/аустенита (М/А), которая в основном диспергируется в бейните по границе феррита [18], [19].

Анализ научных трудов отечественных и зарубежных авторов показал, что первичный аустенит является ключевым элементом микроструктуры, контролирующим вязкость бейнита. В результате чего возможно образование трещины и ее распространение в металле по границам зерен. Однако исследования [20] показали, что связь по границам зерен во многом определяет образование и развитие трещин, а также оказывает существенное влияние на ударную вязкость, и как следствие склонность к растрескиванию. То есть существует взаимосвязь между микроструктурой и ударной вязкостью металла в ЗТВ, зависящая от величины погонной энергии при сварке.

Проведенный анализ влияния легирующих элементов на свариваемость высокопрочной стали показал, что ниобий оказывает существенное влияние на изменения по границам зерен во время термического цикла сварки при максимальной температуре до 1350 °С.

На рисунке 7 показано изображение стали К70 с многофазной структурой: зернистый бейнит (чёрная матрица) + участки М/А (белая вторичная фаза), М/А – мартенсит/аустенит.



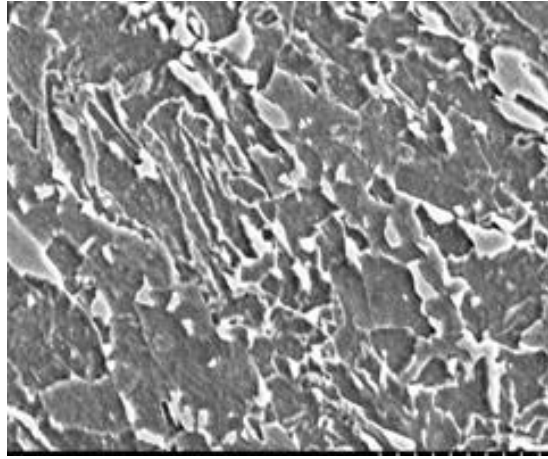


Рисунок 7 – Изображение стали K70 с многофазной структурой: зернистый бейнит (чёрная матрица) + участки М/А (белая вторичная фаза).

М/А – мартенсит/аустенит.

Для изучения процесса нагрева с величинами погонной энергии 30-60 кДж/см<sup>2</sup> при средней скорости нагрева до 100 °С/с и максимальной температурой 1350 °С в течение 1 с для каждого теплового воздействия было подготовлено четыре образца: один для наблюдения за микроструктурой и три для испытаний на ударную вязкость по Шарпи (рисунок 8).

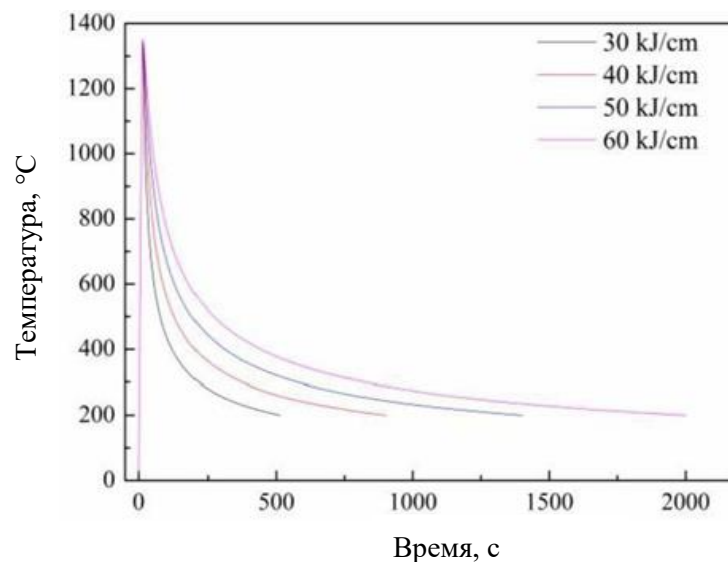


Рисунок 8 – График смоделированного теплового цикла до температуры нагрева до 1350 °С

Анализ состава микроструктуры образцов при различной тепловой нагрузке показал, что она преимущественно состоит из пластинчатого бейнита и относительно небольшого количества зернистого бейнита (рисунок 9).

Уменьшение тепловой нагрузки при сварке (уменьшение погонной энергии за счет увеличения скорости сварки) приводит к увеличению пластинчатого бейнита за счёт зернистого бейнита. Кроме того, зерно исходного аустенита постепенно измельчается, а его средний размер уменьшается с 68,6 до 30,4 мкм.

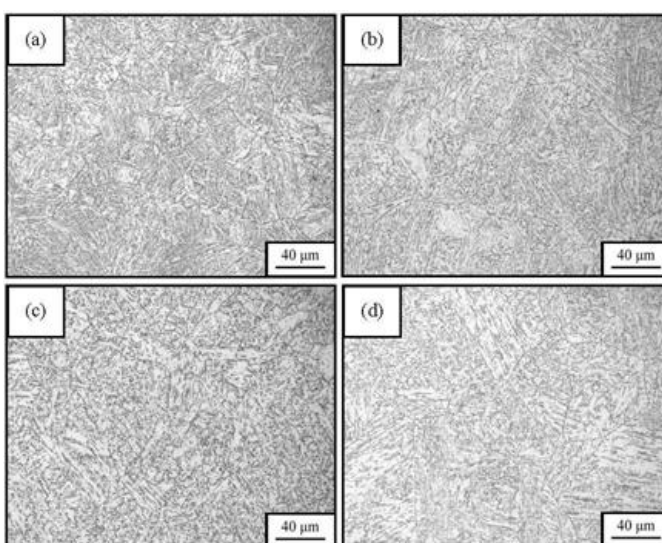


Рисунок 9 – Микроструктуры образцов при различной тепловой нагрузке зерно аустенита: (a) 30 кДж/см; (b) 40 кДж/см; (c) 50 кДж/см; (d) 60 кДж/см.

Результаты исследования изменения значений ударной вязкости образцов, изготовленных из стали К70, при различных тепловых нагрузках (погонной энергии) представлены на рисунке 10.

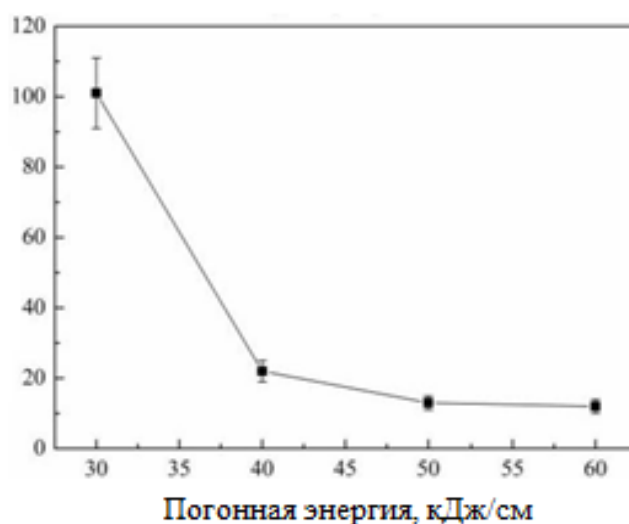


Рисунок 10 – Сравнение изменения ударной вязкости образцов из стали К70, при различных тепловых нагрузках (погонной энергии)

Проведенные исследования в [17] показали, что в процессе непрерывного охлаждения зарождается пластинчатый бейнит-феррит, при этом граница раздела аустенита/феррита ( $\gamma/\alpha$ ) смещается, а перенасыщенный углерод в феррите диффундирует к границе раздела  $\gamma/\alpha$ . Таким образом, нераспавшийся аустенит обогащается углеродом за счёт его перераспределения. Также отмечено, что при понижении температуры оставшийся аустенит непрерывно превращается в пластинчатый бейнит-феррит, а сохранившийся аустенит дополнительно обогащается углеродом и полностью стабилизируется до тех пор, пока превращение не станет термодинамически невозможным. Последующее охлаждение обогащенного углеродом аустенита может привести к образованию мартенсита, который будет сосуществовать с аустенитом, образуя двухфазную структуру.

Отметим, что пластинчатый бейнит является типичным продуктом изотермического распада аустенита. Уменьшение тепловыделения при сварке, вызванное увеличением скорости охлаждения, приводит к значительному измельчению зерен аустенита с одновременным увеличением плотности по их границам из-за более короткого пребывания в зоне высоких температур (аустенитной зоне). Соответственно наблюдалось снижение температуры

начала аустенитного превращения, что привело к повышению термодинамической движущей силы для образования пластинчатого бейнита, увеличению плотности дислокаций в пластинчатом бейните и измельчению пластинчатого бейнита-феррита, обусловленного увеличением скорости зарождения и уменьшением роста его зёрен.

Соответственно, уменьшение погонной энергии приводит к повышению ударной вязкости. При этом, на поверхностях исследуемых образцов, в зависимости от величины погонной энергии, наблюдался излом, расположенный по границам бейнитных зерен. Следовательно, наличие бейнитных зерен, в структуре стали класса прочности К70, препятствует распространению трещины. Таким образом, наличие бейнита является определяющим фактором, оказывающим влияние на изменение ударной вязкости сварного соединения на участке ЗТВ.

Обобщив вышесказанное, становится очевидно, что уменьшение величины погонной энергии ведет к существенному повышению трещиностойкости трубной стали класса прочности К70.

## 2. Методика проведения исследований структуры и свойств сварных соединений стали К70

### 2.1 Методика определения технологии сварки контрольного сварного соединения

Для определения технологии сварки контрольного сварного соединения (далее - КСС) также следует учитывать следующие параметры:

- теплонагруженность способа сварки (погонная энергия);
- применимость в монтажных условиях;
- распространенность в условиях сооружения, ремонта, реконструкции магистральных трубопроводов.

В разделе 1.2 указано, что для сварки сталей класса прочности К70, погонная энергия является ключевым фактором, определяющим вероятность образования трещин при сварке.

Погонная энергия, как следует из уравнения 4, в большей степени определяется силой тока, коэффициентом полезного действия и скоростью сварки и представляет собой эффективную тепловую мощность, отнесенную к скорости сварки.

$$q_{\Pi} = \frac{q_{\Sigma}}{V_{\text{СВ}}} = \frac{\eta \cdot I \cdot U_{\text{д}}}{V_{\text{СВ}}}, \text{ (Дж/см)}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия;

$I$  – сила сварочного тока (А);

$U_{\text{д}}$  – напряжение на дуге;

$V_{\text{СВ}}$  – скорость сварки (см/с).

Анализ современных отраслевых нормативных документов эксплуатирующих трубопроводы организаций, а также сведения научно-технической литературы, позволили изучить общий перечень технологий сварки, применяемых при сооружении магистральных трубопроводов [21],

[22]. На рисунке 11 показано сравнение погонной энергии при наиболее перспективных способах сварки (приняты средние значения).

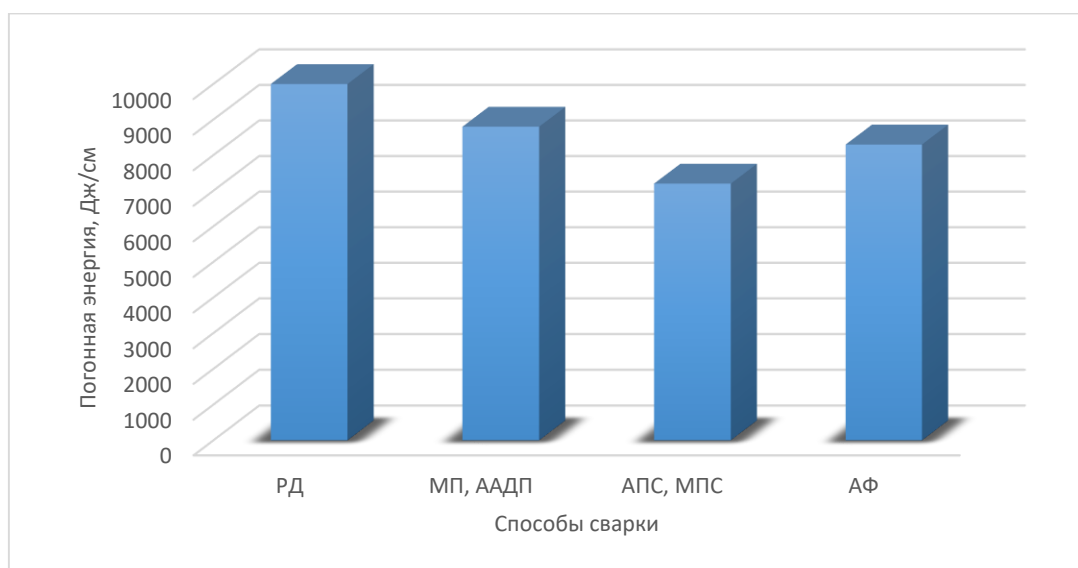


Рисунок 11 – Сравнение значений погонной энергии различных способов сварки

Из данных, представленных на рисунке 11, видно, что способы сварки с применением порошковых проволок показывают наименьшее значение погонной энергии. Однако, применение порошковых проволок для сварки корневого слоя шва затруднительно, в связи с чем этот способ следует применять в составе комбинированной технологии сварки.

Ручная дуговая сварка показывает наибольшую теплонагруженность, что обусловлено сравнительно невысоким значением скорости сварки (в среднем до 1,3 см/с). Однако, как показывает практика, в ряде случаев РД является незаменимым способом при сварке на монтаже (сварка корневого слоя, захлестов, ремонт).

Сварка под флюсом (АФ), является наиболее производительным способом сварки, однако в монтажных условиях не применима, поскольку не позволяет выполнять сварку поворотных стыков. Однако может применяться

в условиях стационарных и мобильных трубосварочных баз при сварке трубных секций, когда есть возможность поворота свариваемых труб.

Как показал анализ практики проведения монтажных работ, сварка в среде защитных газов и газовых смесей нашла широкое применение при проведении монтажных работ благодаря универсальности (механизованная, автоматическая), что обеспечивает возможность ее применения как для односторонней, так и для двусторонней технологии сварки монтажных стыков.

Учитывая изложенное, были выбраны следующие технологии сварки КСС:

- «ААДП - автоматическая сварка плавящимся электродом в среде инертных газов и смесях;
- МП+АПИ – комбинированная технология сварки: корневой слой – механизированная сварка плавящимся электродом в среде активных газов и смесях, заполняющие и облицовочный слой – автоматическая сварка порошковой проволокой в среде инертных газов и смесях;
- АФ – автоматическая сварка под слоем флюса всех слоев шва;
- РД – ручная дуговая сварка покрытыми электродами» [22].

## **2.2 Подбор сварочных материалов**

### **2.2.1 Общие требования при подборе сварочных материалов**

Выбор сварочных материалов для сварки КСС обусловлен следующими критериями:

- применимость для выбранных способов сварки;
- обеспечение выполнения условия равнопрочности сварного соединения и основного металла;
- отечественный производитель.

С учетом выбранных способов и технологий, для сварки КСС могут применяться следующие виды сварочных материалов:

- проволоки сплошного сечения для автоматической сварки;
- порошковые проволоки для автоматической и механизированной сварки в среде защитных газов и защитных газовых смесях;
- флюсы керамические (агломерированные) для автоматической сварки проволокой сплошного сечения;
- электроды покрытые металлические с основным видом покрытия для ручной дуговой сварки;
- защитные газы (углекислый газ, аргон) и их смеси для механизированной и автоматической сварки проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой.

Выбор и назначение сварочных материалов выполняют исходя из:

- требований к свойствам сварных соединений;
- способа и технологии сварки;
- класса прочности и номинальных размеров (диаметр, толщина стенки) свариваемых элементов.

Сварочные материалы должны обеспечивать:

- а) сварочно-технологические свойства:
  - качественное формирование металла шва при сварке во всех пространственных положениях;
  - стабильность горения дуги;
  - легкое удаление шлака, образующегося в процессе сварки, в т. ч. при сварке в разделку кромок;
- б) металлургические свойства наплавленного металла:
  - гарантированное содержание основных легирующих элементов;
  - допустимое содержание вредных примесей и диффузионно-подвижного водорода;
  - отсутствие в металле шва дефектов металлургического характера;
- в) механические свойства наплавленного металла с гарантированными значениями:
  - временного сопротивления разрыву;



- предела текучести;
- относительного удлинения;
- ударная вязкость (Дж/см<sup>2</sup>) или энергии удара (Дж).

В таблице 1 представлены основные требования к сварочным защитным газам и смесям.

Таблица 1 – Технические требования к сварочным защитным газам и смесям

Параметры	Значение параметра
1	2
Аргон газообразный должен иметь:	
- объемную долю аргона не менее	99,9930 %
- объемную долю азота не более	0,0050 %
- объемную долю кислорода не более	0,0007 %
Двуокись углерода газообразная и жидкая должна иметь:	
- объемную долю двуокиси углерода не менее	99,6 %
- точку росы не выше	-48 °С
Смесь газообразная аргона и двуокиси углерода должна иметь:	
- массовую долю влаги не более	0,008 %
- объемную долю азота не более	0,010 %
Предельные отклонения объемной доли двуокиси углерода в зависимости от состава смеси:	
- 15 % CO <sub>2</sub> -85 % Ar	± 1,5 %
- 25 % CO <sub>2</sub> -75 % Ar	± 2,5 %
- 50 % CO <sub>2</sub> -50 % Ar	± 5,0 %

Сварочные материалы должны обеспечивать минимальное содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле не более 5мл/100г [23].

### 2.2.2 Сведения о свариваемом металле

Для изготовления свариваемых элементов КСС применялась труба, изготовленная из стали класса прочности К70.

В таблице 2 представлен химический состав металла трубы.

Таблица 2 – Химический состав металла трубы из стали класса прочности К70.

C×100	Mn×100	Si×100	P×1000	S×1000	Cr×100	Ni×100	Cu×100
6,1	176,1	25,3	6	1,3	21	26,1	16
Al×1000	Ti×1000	N <sub>2</sub> ×1000	As×1000	Mo×1000	Nb×1000	V×1000	Ca×1000
35,9	22	4,1	1	3	69	3	1,6
Sb×1000	Sn×1000	B×10000	Pb×1000	Bi×1000	Φ1×100	C <sub>eq</sub>	P <sub>CM</sub>
2	2	3	3	0,7	94	0.43	0.18

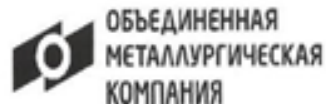
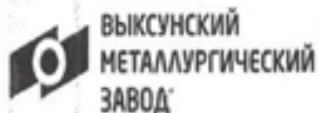
В таблице 3 представлены механические свойства трубы, изготовленной из стали класса прочности К70.

Таблица 3 – Механические свойства трубы из стали класса прочности К70

Временное сопротивление разрыву, кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %
1	2	3
74,4	67,3	24,0

На рисунке 12 представлен сертификат качества на трубу.

По данным завода-изготовителя трубы АО «ВМЗ», временное сопротивление разрыву сварного шва трубы, изготовленной из стали класса прочности К70, составляет 74,4 кгс/мм<sup>2</sup>.



АО "ВМЗ" г. Выкса  
СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА № 20-216-07819-23

Получатель: ООО "НИИЦ СТНК "СПЕКТР", Россия, г. Серпухов, Северное шоссе, вл1,  
Заказ: 37302 Приказ на отгрузку: 81848541 Дата отгрузки: 09.05.2023  
Номер т/с K463AK152/BA323052

Трубы стальные электросварные прямошовные с одним продольным швом, изготовленные по ТС 153-11-2002-05-15.

Порядковый номер	Номер трубы	Год выпуска трубы	Номер плавки	Номер партии трубы	Номинальные размеры			Масса т	Гидроиспытания	Класс прочности
					Диаметр мм	Стенка мм	Длина м			
1	207643	23	2272364	25180	1420.0	26.3	12,370	11,294	-	K70
Итого							12,370	11,294		

Информация о листовом прокате

Плавка	Поставщик	НТД	Марка стали	Спецтребования
2272364	АО ВМЗ 5000	ТУ 24.10.35-310-05757848-2022	K70	Контролируемая прокатка+ускоренное охлаждение, 100% УЗК

3. Химические свойства основного металла

Плавка	Химический состав, %																							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	As	Mo	Nb	V	Ca	Sb	Sn	B	Pb	Bi	Fe	Co	Pcm
2272364	6,13	176,1	25,3	6	1,3	21	26,1	16	35,9	22	4,1	1	3	69	3	1,6	2	1	3	3	0,7	94	0,43	0,18

По:

но:

Механические свойства основного металла

Номер партии трубы	Временное сопротивление, кгс/мм <sup>2</sup>		Предел текучести, кгс/мм <sup>2</sup>		Относительное удлинение, %		Ударная вязкость KCU С		Ударная вязкость KCV С	
	70	70	67,3	67,3	23,0	24,0	-	-	-	-
25180	74,4	74,4	67,3	67,3	23,0	24,0	-	-	-	-

Механические свойства сварного соединения

Номер партии трубы	Временное сопротивление, кгс/мм <sup>2</sup>		Ударная вязкость кгс*м/см <sup>2</sup>				Угол загиба, град				
			линия сплавления				наружный шов		внутренний шов		
			KCU С		KCV С						
25180	72,4	73,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рисунок 12 – Сертификат качества на трубу K70

### 2.2.3 Марки сварочных материалов для сварки КСС

Сварочные материалы, применяемые при сварке КСС, с учетом требований п. 2.2, представлены в таблицах 4 – 7.

В таблице 4 представлены сварочные материалы для ААДП способа сварки.

Таблица 4 – Сварочные материалы для ААДП способа сварки

Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм
1	2	3
Корневой	GS600	0,9
Заполняющий	GS600	1,0
Облицовочный	GS600	1,0
Корневой	ПроТЭК 60	0,9
Заполняющий	ПроТЭК 80М	1,0
Облицовочный	ПроТЭК 80М	1,0

В таблице 5 представлены сварочные материалы для комбинированной технологии сварки МП+АПИ.

Таблица 5 – Сварочные материалы для комбинированной технологии сварки МП+АПИ

Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм
1	2	3
Корневой	GS600	1,2
Заполняющий	ИТС	1,2
Облицовочный	ИТС	1,2

В таблице 6 представлены сварочные материалы для АФ способа сварки.

Таблица 6 – Сварочные материалы для АФ способа сварки

Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм
1	2	3
Корневой	Ultra 327	4,0
Заполняющий	Ultra 327	4,0
Облицовочный	Ultra 327	4,0

Примечание:

Для защиты сварочной ванны от воздействий окружающей среды, для сварки всех КСС применен экспериментальный сварочный флюс УФ-700П.

В таблице 7 представлены сведения о сварочных материалах для РД способа сварки.

Таблица 7 – Сведения о технологии сварки КСС с применением РД способа

Слой	Марка сварочных электродов	Диаметр электрода, мм
1	2	3
Корневой	МЭЗ-70К	3,0
Заполняющий	МЭЗ-70К	4,0
Облицовочный	МЭЗ-70К	3,0
Корневой	ЦЛ-70К	3,0
Заполняющий	ЦЛ-70	4,0
Облицовочный	ЦЛ-70	3,0

В качестве защитной газовой среды для:

- МП сварки применялась углекислота сварочная высшего сорта по ГОСТ 8050-85;

- ААДП и АПИ способов сварки применялась защитная газовая смесь 80% (Ar) + 20% (CO<sub>2</sub>).

### **3 Выбор оборудования для сварки, контроля и определения механических свойств**

#### **3.1 Общие требования к сварочному оборудованию**

Источники сварочного тока, механизмы подачи сварочной проволоки, автоматические сварочные головки, должны иметь документы качества (сертификаты качества или паспорта) и руководство по эксплуатации (для сварочного оборудования импортного производства – дубликаты паспортов, руководств по эксплуатации на русском языке).

Оборудование для сварки должно соответствовать требованиям документов национальной системы стандартизации Российской Федерации, ТУ, документам качества (сертификатам качества или паспортам), руководств по эксплуатации.

#### **3.2 Требования к оборудованию для подогрева и термообработки КСС**

«Оборудование для предварительного и сопутствующего (межслойного) подогрева должно обеспечивать подогрев свариваемых элементов по толщине стенки и периметру в зоне шириной не менее 150 мм, т.е. не менее 75 мм в каждую сторону от свариваемых кромок. При необходимости оборудование должно обеспечивать подогрев перед выполнением прихваток и сопутствующий (межслойный) подогрев в процессе сварки в соответствии с требованиями по температуре в ОТК» [22].

Для предварительного и сопутствующего подогрева КСС следует применять установки индукционного нагрева.

«Установки для подогрева КСС соединений должны включать:

- электростанцию для питания индукционной установки;
- преобразователь частоты;

- индуктор с высокочастотным трансформатором и согласующим контуром;

- устройство для ускоренного охлаждения сварного соединения после нагрева;

- блок управления и автоматической регистрации параметров процесса термообработки» [24].

«Установки индукционного нагрева, установки для нагрева с применением электронагревателей сопротивления, для нагрева с применением электронагревателей комбинированного действия должны обеспечивать:

- возможность нагрева и термообработки всех видов свариваемых соединений труб, СДТ, ЗРА различных толщин, диаметров и конструкций до заданной температуры;

- необходимый коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) для наибольшей производительности нагрева;

- максимальную мощность всех каналов нагрева;

- ручное и автоматическое (программируемое) регулирование процесса нагрева;

- наличие отдельного программного устройства и возможность контроля температуры каждого канала нагрева;

- плавное или ступенчатое регулирование подаваемой мощности вторичной цепи;

- цикл нагрева максимальной мощностью в течение длительного времени (десятки часов);

- электрическую мощность и выходное (вторичное) напряжение источника питания с учетом потерь в участках цепи электронагрева;

- устойчивую работу источника питания электронагревателей при ПН 100 %, продолжительный срок службы источника питания;

- минимально возможные габаритные размеры и массу для обеспечения перемещения в условиях трассы;

- возможность проведения сварки при сопутствующем (межслойном) подогреве» [22].

В состав источника питания для термообработки должен входить блок управления источником питания с установленными в нем КИП для измерений основных энергетических параметров нагрева (тока и напряжения вторичной цепи).

Процесс нагрева и термообработки должен контролироваться в автоматическом режиме устройствами, входящими в состав установок нагрева.

Датчики регуляторов температуры, ограничителей температуры и защитных устройств от перегрева должны быть установлены таким образом, чтобы температурные воздействия окружающей среды, механические и индуктивные воздействия, возникающие при работе установки для нагрева и термообработки, не влияли на показания.

При автоматическом управлении установками нагрева и термообработки должна быть обеспечена точность автоматического достижения температуры  $\pm 10$  °С, при ручном управлении –  $\pm 15$  °С.

Блок управления источниками питания для термообработки должен быть оснащен в обязательном порядке следующими КИП:

- таймером для определения длительности нагрева;
- амперметром для измерения тока;
- вольтметром для измерения напряжения.

Для выполнения подогрева КСС соединений трубопроводов следует применять гибкие индукторы нагрева токами средней частоты от 0,4 до 20 кГц с жидкостным или воздушным охлаждением.

Средства контроля температуры нагрева и термообработки должны обеспечивать:

- точность измерения температуры предварительного подогрева;
- непрерывную регистрацию показаний термопар и печать регистрационных диаграмм на бумаге.



Все подключения подводящих и отводящих проводов и кабелей вспомогательного оборудования должны быть легкоразъемными.

### **3.3 Сведения о применяемом сварочном оборудовании**

#### **3.3.1 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при РД сварке**

При сварке КСС с применением ручной дуговой сварки применялся инверторный источник питания сварочного тока марки ИТС-315 (сварочный выпрямитель инверторного типа) производства АО НПФ «ИТС».

Внешний вид источника питания марки ИТС-315 показан на рисунке 13.



Рисунок 13 – Внешний вид источника питания марки ИТС-315

«Выпрямитель для дуговой сварки инверторный ИТС-315 предназначен для следующих видов сварки:

- ручной дуговой сварки (режим РД [ММА]) на постоянном токе углеродистых и легированных сталей электродами с основным, рутиловым и целлюлозным покрытием диаметром от 1,5 мм до 6 мм;

- ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (режим РАД [TIG]) черных и цветных металлов (кроме алюминия) диаметром от 0,8 мм до 8 мм;

- полуавтоматической (механизированной) сварки и наплавки совместно с подающим механизмом [MIG/MAG] и автоматической сварки совместно с комплексом "Восход" [GMAW]):

- сплошной электродной проволокой диаметром от 0,6 до 1,6 мм (в том числе стальной, нержавеющей и алюминиевой проволокой) в среде активных и инертных газов (режим МП);

- порошковой электродной проволокой диаметром до 2,4 мм самозащитой и/или в среде активных и инертных газов (режим МПГ, МПС, АППГ, АПИ).

- резки и строжки металла угольными или металлическими электродами [САС-А]» [25].

«Режим ручной сварки штучными электродами с основным покрытием.

Сварочный ток устанавливается плавно от 5 до 350 А с шагом 1 А. Предварительная установка тока отображается на цифровом индикаторе. Точность установки сварочного тока  $\pm 1$  А.

Режим имеет следующие дополнительные параметры:

- наклон выходной характеристики 1,5 В/А. Возможна регулировка наклона в пределах 1-2 В/А;

- напряжение холостого хода в процессе сварки 65 В. Задается в пределах 50-85 В;

- безопасный режим: напряжение холостого хода в отсутствии сварки снижается ниже 12 В через 0,3 сек по окончании процесса. Время может быть установлено от 0,2 до 12,5 сек;

- «Горячий Старт» [HOT START] обеспечивает увеличение тока в начале сварки на заданное время. Режим предназначен для облегчения возбуждения дуги и формирования сварочной ванны. Величина тока устанавливается от 0 до 100% сварочного тока, а время от 0,1 до 3,0 сек;

- «Форсирование Дуги» [ARC FORCE] обеспечивает увеличение сварочного тока при уменьшении дугового промежутка и в коротком замыкании. Режим предназначен для уменьшения вероятности залипания

электрода и увеличения проплавляющей способности дуги. Увеличение тока устанавливается от 0 до 100% сварочного тока;

- «Антизалипание» [ANTISTICK] обеспечивает уменьшение тока выпрямителя при коротком замыкании, если оно длится более 0,8 сек;

- управление сварочным выпрямителем может осуществляться от пульта дистанционного управления (ПДУ)» [25].

Технические характеристики источника питания марки ИТС-315 представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики источника питания марки ИТС-315

Наименование параметра	Значение		
	Режим РД	Режим РАД	Режим МП
Напряжение питающей сети, В	380		
Частота питающей сети, Гц	3~50		
Номинальный сварочный ток при ПВ=100%, А	250	250	250
Номинальный сварочный ток при ПВ=60% и длительности цикла 10 мин., А	315	315	315
Наименьший сварочный ток, А	15	15	20
Наибольший сварочный ток, А	350	350	350
Пределы регулирования рабочего напряжения, В	20,6-34	10,6-24	15-31,5
Напряжение холостого хода, В, не более	12		
Регулирование сварочного тока	дискретное (с шагом 1 А)		
Потребляемая мощность при номинальном токе, кВА, не более	22		
Коэффициент полезного действия, %, не менее	74		
Номинальный ток главных цепей автомата защиты (с характеристикой срабатывания электромагнитного расцепителя "D"), А	63		
Масса (без каркаса), кг	32,5		
Габаритные размеры, мм без защитного каркаса с защитным каркасом	515x265x375 625x325x435		

### 3.3.2 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при комбинированной МП+АПИ сварке

Для сварки корневого слоя КСС, выполненных с применением комбинированной технологии сварки МР+АПИ, применялся комплект для механизированной сварки с управляемым каплепереносом в составе:

- инверторный источник питания постоянного тока ДС 400.33 УКП;
- механизм подачи сварочной проволоки ПМ 4.33 Трасса.

На рисунке 14 подставлен общий вид комплект для механизированной сварки.



Рисунок 14 – Общий вид комплект для механизированной сварки

Технические характеристики инверторного источника питания постоянного тока ДС 400.33 УКП представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики инверторного источника питания постоянного тока ДС 400.33 УКП

Характеристика	Значение
Напряжение питающей сети переменного тока, В	380 ( $\pm 10\%$ )
Количество фаз	3
Частота питающего напряжения, Гц	50
Вид сварочного тока - постоянный	
Максимальный сварочный ток с дискретностью 1А	400А
Минимальный сварочный ток с дискретностью 1А	50А
Пределы регулирования коэффициента наклона вольтамперной характеристики:	
- для сварки электродами с целлюлозным видом покрытия, В/А	0,40 $\pm$ 0,05
- для сварки электродами с основным видом покрытия, В/А	от 0,7 до 1,4
Коэффициент нагрузки ПН (X):	
при $I_{\max} = 500\text{А}$ и $t_{\text{окр.ср.}} = 25^{\circ}\text{C}$	100%
при $I_{\max} = 500\text{А}$ и $t_{\text{окр.ср.}} = 40^{\circ}\text{C}$	60%
при $I_{\max} = 400\text{А}$ и $t_{\text{окр.ср.}} = 40^{\circ}\text{C}$	100%
Максимальная потребляемая мощность, кВА, не более	25

Характеристика	Значение
Сопrotивление изоляции:	
- между входной цепью и корпусом, МОм, не менее	2,5
- между входной и сварочной цепями, МОм, не менее	5

Технические характеристики механизма подачи сварочной проволоки ПМ 4.33 Трасса представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики инверторного источника питания постоянного тока ДС 400.33 УКП

Характеристика	Значение
Напряжение	~36 В
Мах мощность	0,2 кВт
Скорость подачи проволоки	1-17 м/сек
Количество роликов подающего механизма	4
Диаметр сплошной проволоки	0,6-1,6 мм
Диаметр порошковой проволоки	0,9-2,4 мм
Диаметр алюминиевой проволоки	1,0-2,4 мм
Диапазон рабочих температур	от – 40 до + 40 °С
Габаритные размеры	580×202×423 мм
Вес	14 кг

Для выполнения процесса АПС сварки применен комплект сварочного оборудования, включающий в себя:

- УАСТ-1 Альфа – установка для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов;
- инверторный источник постоянного тока ДС 400.33 УКП.

На рисунке 15 подставлен общий вид УАСТ-1 Альфа.



Рисунок 15 – Общий вид УАСТ-1 Альфа

В таблице 11 представлены технические характеристики установки УАСТ-1 Альфа.

Таблица 11 - Технические характеристики установки УАСТ-1 Альфа

Характеристика	Значение
1	2
Диапазон диаметров свариваемых труб, мм	от 219
Скорость движения сварочной головки ГАСТ-1, мм/сек	0,5 - 15
Скорость подачи электродной проволоки, мм/сек	10 - 267
Диаметр электродной проволоки, мм	0,8 - 2,2
Амплитуда колебаний горелки, мм	1 - 20
Скорость колебаний горелки, мм/сек	10 - 50
Время «задержки на кромках», с	0 - 1,2
Габариты головки, мм	365 x 525 x 665
Масса головки, кг, не более	21
Масса блока управления, кг, не более	8
Масса источника ДС400.33УКП, кг, не более	52

«УАСТ-1 Альфа - установка для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром минимальный – от 219 мм, максимальный - не ограничен, а также прямолинейных швов во всех пространственных положениях.

Установка предназначена для использования:

- в заводских (цеховых) условиях;

- в трассовых условиях при температурах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Сварка может производиться проволоками:

- сплошной в  $\text{CO}_2$  или газовых смесях;
- порошковой газозащитной в среде  $\text{CO}_2$  или газовых смесях;
- порошковой самозащитной» [26].

### 3.3.3 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при ААДП сварке

Для двусторонней ААДП сварки применялся комплект оборудования CRC-Evans, включающий в себя:

- внутритрубная сварочная станция IWM;
- наружные сварочные головки (2 шт.) P-700;
- механизмы подачи сварочной проволоки Fronius.

На рисунке 16 представлен общий вид внутритрубной сварочной станции IWM.



Рисунок 16 – Общий вид внутритрубной сварочной станции IWM

В таблице 12 представлены технические характеристики внутритрубной сварочной станции IWM [27].

Таблица 12 - Технические характеристики внутритрубной сварочной станции IWM

Общие технические характеристики	
Скорость перемещения кольцевого привода	0-50 дюйм/мин.
Скорость подачи проволоки	100-500 дюйм/мин.
Расход защитного газа	50 куб. фут/мин.
Давление защитного газа	Max 13,79 МПа Min 3,45 МПа
Давление в системе подачи воздуха	Max 1,45 МПа Min 1,17 МПа

«На рисунке 17 представлен общий вид автоматической сварочной головки Р-700.



Рисунок 17 – Автоматическая сварочная головка Р-700

Технические характеристики автоматической сварочной головки Р-700 приведены в таблице 13» [28].

Таблица 13 - Технические характеристики автоматической сварочной головки Р-700

Общие технические характеристики	
1	2
Длина	19 дюймов (483 мм)
Ширина	13,5 дюймов (343 мм)
Высота	17 дюймов (432 мм)
Вес	33 фунта (15 кг)
Ход горелки по вертикальной оси	2 дюйма (50,8 мм)
Питание головки	36В



Общие технические характеристики	
Частота колебаний горелки	0 - 220 мин. <sup>-1</sup>
Амплитуда колебаний горелки	0 - 2" (0 - 50,4 мм)
Время задержки на кромках	0 - 2,0 с
Регулировка угла установки горелки	± 10°
Скорость подачи проволоки	100 - 600 дюйм/мин. (254 - 1524 см/мин.)
Скорость сварки	5 - 60 дюйм/мин. (0,127 - 1,52 м/мин.)
Точность датчика пространственного положения головки	± 1°
Есть возможность подключения аккумулятора	24В сварочного трактора для питания головки
Объем охлаждающей жидкости на одну головку	2 галлона (7,87 л)
Температура эксплуатации	- 40°С до + 70°С

### 3.3.4 Технические характеристики сварочного оборудования, применяемого при АФ сварке

Для АФ сварки применялся комплект оборудования, включающий в себя:

- сварочный выпрямитель ВДУ-1250 Урал;
- сварочный автомат тракторного типа АДФ-1006 Урал.

На рисунке 18 представлен общий вид комплекта оборудования для АФ сварки.



Рисунок 18 – Общий вид комплекта оборудования для АФ сварки

Технические характеристики оборудования для АФ сварки представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики оборудования для АФ сварки

Характеристика	Значение
Номинальный сварочный ток дуги, А	1000
Диапазон регулирования сварочного тока, А	200 - 1000
Номинальный режим работы ПН, %	100
Диаметр электродной проволоки, мм	3,2 - 5
Вместимость кассеты для проволоки, кг	20
Диапазон регулирования скорости подачи электродной проволоки, м/ч (м/мин)	18 - 150 (0,3 - 2,5)
Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч (м/мин)	18 - 60 (0,3 - 1,0)
Напряжение на входе блока питания трактора, частотой 50Гц, В	220
Напряжение питания электродвигателей трактора, В	110 постоянного тока
Масса трактора без электродной проволоки и флюса, кг	45
Потребляемая мощность, не более, Вт	520

Следует отметить, что все сварочное оборудование, за исключением CRC-Evans (ААДП сварка), применяемое при проведении эксперимента, является отечественным.

### 3.4 Оборудование для сборки КСС

Для сборки КСС применялось следующее оборудование:

- центратор наружный звенный ЦЗН-1420;
- центратор внутренний гидравлический ЦВ-147;
- комплект для индукционного подогрева УИИТ-100-2,4.

На рисунке 19 показан общий вид центратора наружного звенного ЦЗН-1420.



Рисунок 19 – Общий вид центратора наружного звенного ЦЗН-1420

В таблице 15 представлены технические характеристики центратора наружного звенного ЦЗН-1420.

Таблица 15 – Технические характеристики центратора наружного звенного ЦЗН-1420

Характеристика	Значение
Диаметр собираемых труб, мм	1420
Длина в упак., мм	1500
Ширина в упак., мм	1420
Высота в упак., мм	1420
Габариты, мм	1500×1420×1420
Масса нетто, кг	49

На рисунке 20 показан общий вид центратора внутреннего гидравлического ЦВ-147.

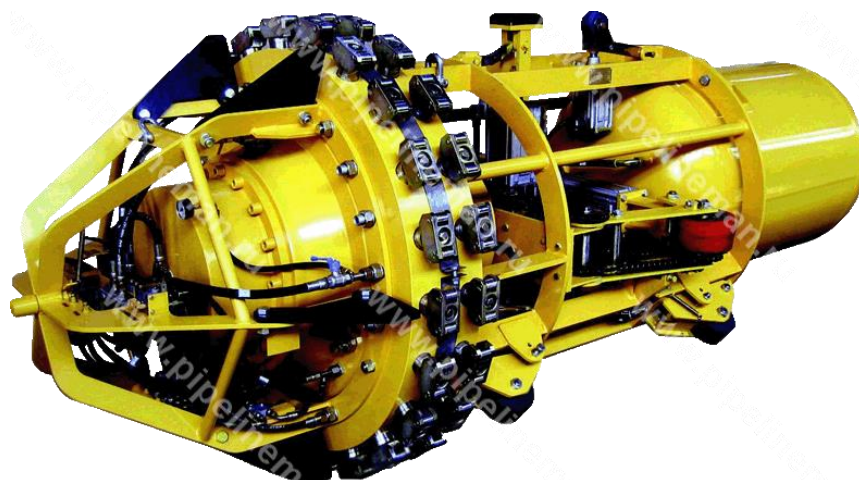


Рисунок 20 – Общий вид центратора внутреннего гидравлического ЦВ-147

В таблице 16 представлены технические характеристики центратора внутреннего гидравлического ЦВ-147.

Таблица 16 – Технические характеристики центратора внутреннего гидравлического ЦВ-147

Характеристика	Значение
Диаметр труб, мм	1420
Толщина стенки, мм	10-40
Габариты, мм	3150x1420
Вес, кг	2040

### **3.5 Оборудование для подогрева и контроля температуры**

Для выполнения операции предварительного подогрева применялась установка индукционного нагрева УИНТ-100-2,4.

На рисунке 21 показан общий вид установки индукционного нагрева труб УИНТ-100-2,4.



Рисунок 21 – Общий вид установки индукционного нагрева труб  
УИНТ-100-2,4

В таблице 17 представлены технические характеристики установки индукционного нагрева труб УИНТ-100-2,4.

Таблица 17 – Технические характеристики установки индукционного нагрева труб УИНТ-100-2,4

Характеристика	Значение
1	2
Максимальная мощность, кВт	100
Номинальная выходная частота, кГц	2,4
Охлаждение	воздушное
Коэффициент полезного действия, %	93
Габаритные размеры, мм	1640×990×1755
Вес, кг	1000
Пределы задания режимов термообработки	
Температура, °С	840
Интервалы времени выдержки, час	1,2,3,4,5
Скорость набора температуры, °С/час	50,10,150,200,250
Скорость снижения температуры, °С/час	50,10,150,200,250
Максимальный диаметр трубопровода, мм	1420

Для контроля температуры подогрева, а также межслойной температуры применяли:

- термометр контактный ТК-5.06С;

- пирометр инфракрасный ТЕТРОН-Т800.

В таблице 18 представлены технические характеристики термометра контактного ТК-5.06С.

Таблица 18 – Технические характеристики термометра контактного ТК-5.06С

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых температур, °С	-199...+1300 (зависит от типа используемого зонда)
Относительная погрешность, %	±0,5 +ед.мл.разр.
Цена единицы младшего разряда, °С	0,1
Количество типов сменных зондов	24
Диапазон измерения относительной влажности, %	3...97
Абсолютная погрешность измерения относительной влажности, %	3
Рабочие условия эксплуатации, °С	-20...+50
Напряжение питания, В	1,5×2

В таблице 19 представлены технические характеристики пирометра инфракрасного ТЕТРОН-Т800.

Таблица 19 – Технические характеристики пирометра инфракрасного ТЕТРОН-Т800

Характеристика	Значение
1	2
Диапазон измерения	от -50 °С до 800 °С (-58 °F...1472°F)
Погрешность	±2 % или ±2 °С
Оптическое разрешение	50:1
Коэффициент излучения	от 0.1 до 1.0 настраиваемый
Время измерения	0.5 с
Повторяемость	±1 % или ±1 °С
Разрешение	0.1 °С, 0.1 °F
Сигнализация превышения минимального или максимального значения температуры	есть
Измерение значений температуры	Min/Max/Avg/Dif
Выбор градусов Цельсия и Фаренгейта	есть
Функция удержания данных и память	есть на 9 последних значений
Лазерный целеуказатель	двойной
Подсветка дисплея	есть
Автовключение при простое	есть

Характеристика	Значение
1	2
Индикация низкого заряда батареи	есть
Питание	9 В батарея
Условия хранения	-20 °С - 50 °С, влажность до 90%
Условия эксплуатации	0 °С - 50 °С, влажность до 90%.
Габаритные размеры	175×120×40 мм
Масса (без батареи)	170 гр
Технические условия (ТУ)	26.51.51-007-48526697-201

При выборе сварочного оборудования приоритет отдавался отечественным производителям. Однако, для выполнения ААДП сварки было применено зарубежное сварочное оборудование, по причине отсутствия отечественных аналогов.

### 3.6 Оборудование для проведения неразрушающего контроля

Для проведения НК применено следующее оборудование:

- для ВИК – комплект ВИК Эксперт;
- для РУЗК - ультразвуковой дефектоскоп А1214 ЭКСПЕРТ;
- для РК - рентгенографический аппарат Арина-7.

Внешний вид комплекта ВИК Эксперт представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 – Внешний вид комплекта ВИК Эксперт


Состав комплекта ВИК Эксперт представлена в таблице 20.

Таблица 20 – Состав комплекта ВИК Эксперт

Оборудование	Внешний вид
1	2
Лупа измерительная L11. Длина шкалы 11 мм	
Лупа измерительная с подсветкой L30. Длина шкалы 20 мм	
Штангенциркуль ШЦ-1-125-0.1	
Универсальный шаблон сварщика УШС-2	
Универсальный шаблон сварщика УШС-3	
Шаблон Красовского УШК-1	
Шаблон сварщика WG2+	
Катетомер КМС-3-16	
Набор щупов № 4 КТ II, диапазон толщин 0,1-1,0 мм	



Оборудование	Внешний вид
1	2
Набор радиусов №1. Диапазон 1-6 мм	
Набор радиусов №3. Диапазон 7-25 мм	
Линейка измерительная 300 мм	
Линейка измерительная 150 мм	
Рулетка измерительная 2 м	
Рулетка измерительная 5 м	
Угольник УП 100x60 к2	
Угольник УП 160x100 к2	
Образцы шероховатости ШП Rz 20, 40, 60	
Толщиномер покрытий МТ-2007	

Оборудование	Внешний вид
1	2
Люксметр ТКА-Люкс или ТКА-ПКМ (31)	

Внешний вид ультразвукового дефектоскопа А1214 ЭКСПЕРТ представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 – Внешний вид ультразвукового дефектоскопа А1214 ЭКСПЕРТ

В таблице 21 представлены технические характеристики ультразвукового дефектоскопа А1214 ЭКСПЕРТ.

Таблица 21 – Технические характеристики ультразвукового дефектоскопа А1214 ЭКСПЕРТ

Параметр	Значение
Максимальная толщина объекта контроля (по стали)	3500 мм
Рабочие частоты	0,5÷15,0 МГц
Динамический диапазон дефектоскопа не менее	100 дБ
Диапазон изменений интервалов времени дефектоскопа	1÷1200 мкс

Параметр	Значение
Диапазон настроек скорости ультразвука	1000÷15000 м/с
Полоса частот приемного тракта	0,14÷21 МГц
Диапазон перестройки аттенюатора	0÷90 дБ
Динамический диапазон ВРЧ не менее	30 дБ
Параметры зондирующего импульса:	
- число периодов	0,5÷5
- амплитуда (половина размаха)	20, 100, 200 В
- длительности фронтов не более	20 нс
- частота повторения зондирующих импульсов	5÷200 Гц
Тип дисплея	электролюминесцентный
Количество точек экрана	320 x 240
Размеры отображающего поля экрана	115 x 86 мм
Питание	сменный аккумуляторный блок
Время непрерывной работы	12 ч
Диапазон рабочих температур	-30°С÷+50°С
Габаритные размеры	250×160×80 мм
Масса электронного блока	1,9 кг

Внешний вид рентгенографического дефектоскопа Арина-7 представлен на рисунке 24.



Рисунок 24 – Внешний вид рентгенографического дефектоскопа Арина-7

В таблице 22 представлены технические характеристики рентгенографического дефектоскопа Арина-7.

Таблица 22 – Технические характеристики рентгенографического дефектоскопа Арина-7

Параметр 1	Значение 2
Экспозиционная доза рентгеновского излучения не менее, мкКл/кг (мР)	258,7 (1000)
Амплитуда напряжения на рентгеновской трубке, кВ	250
Диаметр фокусного пятна, мм	2,5
Угол раствора излучения, °С	180
Напряжение питания:	
Питание от однофазной сети переменного тока: Напряжение, В Частота, Гц	220±10%/230±10% 50±1
Питание от автономного источника (аккумуляторной батареи): Напряжение, В	24±3
Потребляемая мощность не более, ВА	250
Масса и габаритные размеры рентгеновского блока:	
Масса не более, кг	8,2
Длина не более, мм	525
Ширина не более, мм	140
Высота не более, мм	220
Масса и габаритные размеры пульта управления (ПУ):	
Масса не более, кг	6,3
Длина не более, мм	310
Ширина не более, мм	260
Высота не более, мм	150
Суммарное время работы в час не более, минут	15
Средний срок службы рентгеновского аппарата не менее, лет	3
Степень защиты	IP20
Класс защиты по ГОСТ №58698	I
Климатические условия эксплуатации:	
Температура, °С	от -40 до +50
Атмосферное давление, кПа/мм. рт. ст.	от 86,6 до 106,7/ от 650 до 800
Относительная влажность воздуха при температуре плюс 25 °С, %	98
Характеристики пульта дистанционного управления (ПДУ):	
Частота сигналов, МГц	от 433,82 до 434,02
Мощность радиосигнала не более, мВт	10
Максимальное расстояние между ПДУ и ПУ не менее, м	30
Масса не более, кг	0,065
Длина не более, мм	100
Ширина не более, мм	56
Высота не более, мм	20

### 3.7 Оборудование для механических испытаний и металлографических исследований

#### 3.7.1 Оборудование для проведения испытаний на статическое растяжение

Для проведения испытаний на статическое растяжение образцов КСС применялась машина испытательная универсальная РГМ-1000-А.

Внешний вид машины испытательной универсальной РГМ-1000-А представлен на рисунке 25.



Рисунок 25 – Внешний вид машины испытательной универсальной РГМ-1000-А

Технические характеристики машины РГМ-1000-А испытательной универсальной приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Технические характеристики машины испытательной универсальной РГМ-1000-А

Параметр	Значение
1	2
Наибольшая предельная нагрузка	1000 кН

Параметр	Значение
1	2
Основной диапазон измерений силы	40-1000 кН
Цена единицы наименьшего разряда силоизмерителя	0,1 кН
Предел допускаемой относительной погрешности измерения силы	$\pm 1 (\pm 0,5) \%$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений перемещения подвижной траверсы в диапазоне от 0 до 10 мм включ.	$\pm 0,05$ мм
Скорость нагружения	0,2 до 50 кН/с
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений перемещения подвижной траверсы в диапазоне св. 10мм до верхнего предела измерений	$\pm 0,5 \%$
Диапазон регулирования скорости перемещения подвижной траверсы	от 0,5 до 60 мм/мин
Предел допускаемой относительной погрешности регулирования скорости перемещения подвижной траверсы	$\pm 5,0 \%$
Предел относительной погрешности поддержания скорости нагружения	$\pm 5,0 \%$
Полный рабочий ход гидравлического поршня	200 мм
Ширина рабочей зоны	590 мм
Высота рабочего пространства верхней зоны	560 мм
Высота рабочего пространства нижней зоны	660 мм
Толщина захватываемых плоских образцов	15-30 мм
Диаметр захватываемых цилиндрических образцов	$\varnothing 13-26$ мм $\varnothing 26-40$ мм
Размер столов сжатия	$\varnothing 160$ мм
Максимальное расстояние между опорными роликами при испытании на изгиб	500 мм
Размеры роликов изгибающего приспособления (диаметр-длина)	50-140 мм
Габаритные размеры силозадающего модуля (Ш×Г×В), не более	1000×740×2520 мм
Габаритные размеры шкафа управления (Ш×Г×В), не более	860x800x900 мм
Масса силозадающего дома, не более	2750 кг
Масса шкафа управления, не более	250 кг
Потребляемая мощность, не более	3,0 кВт
Электропитание	380 В/50 Гц
Объем гидробака	82 л

### 3.7.2 Оборудование для проведения испытаний на статический изгиб

Испытания на статический изгиб проводились с применением испытательного пресса ПИ-2000-II-A-Д.

Внешний испытательного пресса ПИ-2000-II-A-Д представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – Внешний вид испытательного пресса ПИ-2000-II-A-Д

Технические характеристики испытательного пресса ПИ-2000-II-A-Д представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Технические характеристики испытательного пресса ПИ-2000-II-A-Д

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
<b>1</b>	<b>2</b>
Максимальная нагрузка, кН	2000
Относительная погрешность силоизмерителя, %	±1,0
Диапазон измерения нагрузки, кН	от 40 до 2000
Цена единицы наименьшего разряда силоизмерителя, кН	0,1
Предел допускаемой относительной погрешности измерений нагрузки, %, от измеряемой нагрузки	±1,0
Диапазон измерений перемещений подвижной плиты (ход поршня), мм, не более	от 0 до 350
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений перемещений нижней опорной плиты в диапазоне от 0,1 до 10 мм включ. мм	±0,1
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений перемещений нижней опорной плиты в диапазоне св.10мм до верхнего предела измерений, %	±0,1
Диапазон воспроизведений скорости перемещения опорной плиты, мм/мин	от 5 до 72

Параметр	Значение
1	2
Относительная погрешность скорости перемещения опорной плиты, %	±10
Шаг изменения скорости перемещения опорной плиты, мм/мин, не менее	1,0
Диапазон воспроизведений скорости нагружения, кН/сек	от 0,5 до 30
Пространство рабочей зоны, мм, не более: - ширина (расстояние между колоннами) - высота (расстояние между плитами)	830×530 1150
Объем гидробака/ количество гидравлической жидкости, л, не более	116/80
Максимальное рабочее давление гидравлической жидкости, МПа	25
Напряжение, В	220, 380 ±10%
Номинальное значение частоты питающего переменного, Гц	50 ±2 %
Мощность, кВт	4,5
Габаритные размеры нагружающего модуля (Д×Ш×В)*, мм	1045×908×2535
Габаритные размеры гидравлического шкафа (Д×Ш×В), мм	990×710×900
Масса нагружающего модуля, кг, не более	3715
Масса гидравлического шкафа, кг, не более	290

### 3.7.3 Оборудование для проведения испытаний образцов на ударный изгиб

Проведение испытаний образцов на ударный изгиб выполнялось с применением маятникового копра ТСМК-750.

Внешний вид маятникового копра ТСМК-750 представлен на рисунке 27.





## Рисунок 27 – Внешний вид маятникового копра ТСМК-750

Технические характеристики маятникового копра ТСМК-750 представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Технические характеристики маятникового копра ТСМК-750

Параметр	Значение
1	2
Наибольший запас потенциальной энергии копра, Дж	750
Номинальное значение потенциальной энергии маятника, Дж	300; 450; 600; 750
Метод испытания	Шарпи
Система автоматической центровки образца	+
Потребляемая мощность, кВт	1,5
Масса, не более, кг	1300
Габаритные размеры Ш×Г×В, не более, мм	1900×1000×1900

Особенности и преимущества маятникового копра ТСМК-750:

- эргономичная одностоечная конструкция стойки копра обеспечивает удобство установки образцов;
- моторизованный подъем молота с автоматическим возвратом в исходное положение после испытания;
- комплексная система безопасности с электрической блокировкой дверей рабочей зоны и молота;
- датчик углового перемещения с высоким разрешением для точного измерения угла положения молота;
- устройство смены угла зарядки от 5° до 150° с градацией 5°;
- пульт оператора с цветным сенсорным дисплеем обеспечивает простое и эргономичное управление;
- математическая обработка результатов испытания;
- вывод информации о результатах испытаний на дисплей пульта оператора;
- сохранение результатов на ПК;

- вывод протоколов испытаний с пульта управления на лазерный принтер;
- быстрая замена оснастки.

### 3.7.4 Оборудование для исследования твердости образцов КСС

Исследование твердости образцов КСС выполнялось с применением твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4.

Внешний вид твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4 представлен на рисунке 28.



Рисунок 28 – Внешний вид твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4

В таблице 25 приведены технические характеристики твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4.

Таблица 25 – Технические характеристики твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4

Параметр	Значение
1	2
Ячейка нагружения	
Диапазон нагрузки	От 10 грс до 10 кгс
ТУРЕЛЬ	
Индентора	Виккерс / Кнуп
Контактный датчик	

Параметр	Значение
1	2
Объектива NIKON	увеличение от 200х до 2000х
Тип подсветки	LED
КАМЕРЫ	
Микроскопический вид	Черно-белое изображение
Макроскопический вид	Цветное изображение
Моторизованный привод по оси Z	
Перемещение по оси Z	250 мм
Точность перемещения по оси Z	0,05 мкм
Моторизованный рабочий столик	
Габариты	280x200 мм
Перемещение по оси X	100 мм
Перемещение по оси Y	130 мм

#### Функции твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4

- автоопределение образца без повреждения поверхности;
- автоматическая фокусировка;
- автоматическое и ручное измерение отпечатка (в том числе на протравленных образцах);
- одиночное или серийное измерение по сохраненному шаблону;
- серийные измерения нескольких отдельных образцов одновременно.

#### Отчеты, формируемые ПО твердомера по Виккерсу Presi HZ 10-4:

- экспорт данных в Excel или Open Office;
- числовое и графическое отображение результатов;
- статистические данные;
- определение глубины слоя.

## 4 Методика проведения испытаний и исследований

### 4.1 Маркировка КСС

В соответствии с данными, представленными выше разработан перечень КСС, представленный в таблице 26 – 29.

В таблице 26 представлены сведения о технологии сварки КСС с применением РД способа.

Таблица 26 – Сведения о технологии сварки КСС с применением РД способа

Наименование КСС	Слой	Марка сварочных электродов	Диаметр электрода, мм	Подогрев, °С
1	2	3	4	5
КСС-РД-1.1	Корневой	МЭЗ-70К	3,0	Предварительный: 150 <sup>+30</sup> Сопутствующий: 150 <sup>+30</sup>
КСС-РД-1.2	Заполняющий	МЭЗ-70К	4,0	
КСС-РД-1.3	Облицовочный	МЭЗ-70К	3,0	
КСС-РД-2.1	Корневой	ЦЛ-70К	3,0	Предварительный: 150 <sup>+30</sup> Сопутствующий: 150 <sup>+30</sup>
КСС-РД-2.2	Заполняющий	ЦЛ-70	4,0	
КСС-РД-2.3	Облицовочный	ЦЛ-70	3,0	

В таблице 27 представлены сведения о КСС для комбинированной технологии сварки МП+АПИ.

Таблица 27 – Сведения о КСС для комбинированной технологии сварки МП+АПИ

Наименование КСС	Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм	Подогрев, °С
1	2	3	4	5
КСС-МП+АПИ-1	Корневой	GS600	1,2	Предварительный: 150 <sup>+30</sup> Сопутствующий: 150 <sup>+30</sup>
КСС-МП+АПИ-2	Заполняющий	ИТС	1,2	
КСС-МП+АПИ-3	Облицовочный	ИТС	1,2	

В таблице 28 представлены сведения о КСС для двусторонней технологии сварки ААДП способом.

Таблица 28 – Сведения о КСС для двусторонней технологии сварки ААДП способом

Наименование КСС	Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм	Подогрев, °С
1	2	3	4	5
КСС-ААДП-1.1	Корневой	GS600	0,9	Предварительный: 150+ <sup>30</sup> Сопутствующий: 150+ <sup>30</sup>
КСС-ААДП-1.2	Заполняющий	GS600	1,0	
КСС-ААДП-1.3	Облицовочный	GS600	1,0	
КСС-ААДП-2.1 КСС-ААДП-2.2 КСС-ААДП-2.3	Корневой	ПроТЭК 60	0,9	Предварительный: 150+ <sup>30</sup> Сопутствующий: 150+ <sup>30</sup>
	Заполняющий	ПроТЭ К 80М	1,0	
	Облицовочный	ПроТЭ К 80М	1,0	

В таблице 29 представлены сведения о КСС для технологии сварки с применением АФ способа.

Таблица 29 – Сведения о технологии сварки КСС с применением АФ способа сварки

Наименование КСС	Слой	Марка сварочной проволоки	Диаметр сварочной проволоки, мм	Подогрев, °С
1	2	3	4	5
КСС-АФ-1	Корневой	Ultra 327	4,0	Предварительный: 150+ <sup>30</sup>
КСС-АФ-2	Заполняющий	Ultra 327	4,0	
КСС-АФ-3	Облицовочный	Ultra 327	4,0	

Примечание:

Для защиты сварочной ванны от воздействий окружающей среды, для сварки всех КСС применен экспериментальный сварочный флюс УФ-700П.

## 4.2 Формы разделки кромок элементов КСС

В таблице 30 представлены конструктивные элементы разделки КСС.

Таблица 30 – Конструктивные элементы разделки КСС

Наименование КСС	Технология сварки		Конструктивные элементы разделки кромок	
	Слой сварного шва	Способ сварки		
1	2	3	4	
КСС-РД-1.1 КСС-РД-1.2 КСС-РД-1.3	Корневой	РД		
	Заполняющие	РД		
	Облицовочный	РД		
КСС-РД-2.1 КСС-РД-2.2 КСС-РД-2.3	Корневой	РД		
	Заполняющие	РД		
	Облицовочный	РД		
КСС-МП+АПИ-1 КСС-МП+АПИ-2 КСС-МП+АПИ-3	Корневой	МП		
	Заполняющие	АПИ		
	Облицовочный	АПИ		
КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3	Корневой	ААДП		
	Заполняющие	ААДП		
	Облицовочный	ААДП		
КСС-ААДП-2.1 КСС-ААДП-2.2 КСС-ААДП-2.3	Корневой	ААДП		
	Заполняющие	ААДП		
	Облицовочный	ААДП		
КСС-АФ-1 КСС-АФ-2 КСС-АФ-3	Корневой	АФ		
	Заполняющие	АФ		
	Облицовочный	АФ		
	Облицовочный	АФ		

### 4.3 Неразрушающий контроль и механические испытания образцов КСС

#### 4.3.1 Объем неразрушающего контроля

После сварки всех КСС, с целью подтверждения соответствия качества и исключения влияния внутренних и внешних дефектов на механические и металлографические исследования образцов КСС, выполнялся неразрушающий контроль сварных швов в объеме:

- ВИК – 100 % длины сварного шва;
- УК (РУЗК) – 100 % длины сварного шва;
- РК – 100 % длины сварного шва.

#### 4.3.2 Объем механических испытаний

Для определения фактических значений механических свойств КСС, для каждого КСС выполнялись механические испытания в объеме, представленном в таблице 31.

Таблица 31 – Объем механических испытаний

Типоразмер сварного соединения		Методы испытаний и количество образцов								на твердость	на макрошлиф
		на статическое растяжение		на статический изгиб	на ударный изгиб						
					боковой поверхностью (на ребро)		верхние слой шва		нижние слой шва		
диаметр, мм	толщина стенки, мм	сварного соединени	металла шва		МШ	ЛС	МШ	ЛС			
1420	26,3	4	2	8	3	3	3	3	1	3	

Испытания на статическое растяжение сварного соединения проводят на стандартных плоских образцах типа XII или XIII по ГОСТ 6996, геометрические параметры которых приведены в таблице 32 и рисунке 29.

Таблица 32 – Геометрические параметры стандартных плоских образцов типа XII, XIII по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение сварного соединения

Толщина стенки трубы (элемента), $S$ , мм	Толщина образца, $a$ , мм	Ширина рабочей части образца, $b$ , мм	Ширина захватной части образца, $b_1$ , мм	Длина рабочей части образца, $l$ , мм	Общая длина образца, $L$ , мм
$S \leq 6,0$	Равна толщине стенки трубы (элемента)	$15 \pm 0,5$	25	50	$l + 2h$
$6,0 < S \leq 10,0$		$20 \pm 0,5$	30	60	
$10,0 < S \leq 25,0$		$25 \pm 0,5$	35	100	
$25,0 < S \leq 42,0$		$30 \pm 0,5$	40	160	

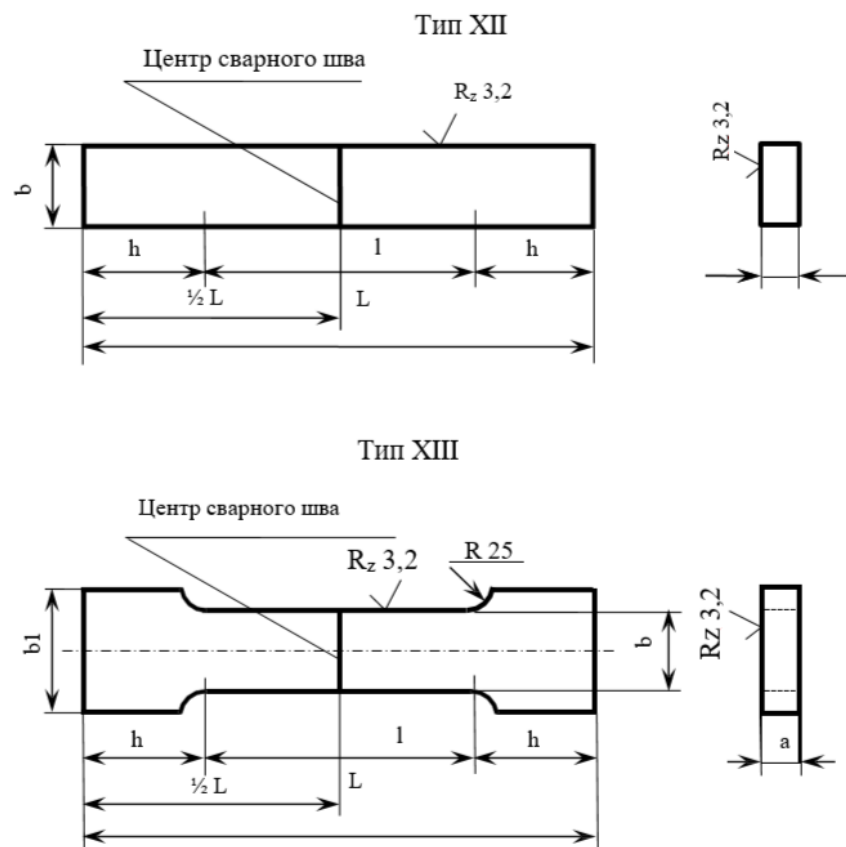


Рисунок 29 – Геометрические параметры стандартных плоских образцов типов XII, XIII по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение сварного соединения

Образцы для испытаний на статический изгиб представлены на рисунке 30.



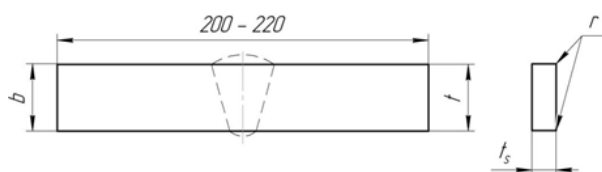


Рисунок 30 – Образцы для испытаний на статический изгиб

В таблице 33 приведены размеры образцов и оснастки для испытаний на статический изгиб.

Таблица 33 – Размеры образцов и оснастки для испытаний на статический изгиб

Вид изгиба	Толщина основного металла, t, мм	Толщина образца, ts, мм	Ширина образца, b, мм	Диаметр оправки, Доп, мм
1	2	3	4	5
Боковой поверхностью наружу	Свыше 12,0	10,0±0,5	Равна толщине основного металла	Для основного металла, имеющего относительное удлинение $A < 20\%$ : $\frac{100 * t_s}{A} - t_s$

Измерение твердости основного металла труб выполняют на расстоянии не менее 20 мм от ЛС.

На рисунке 31 представлена Схема измерения твердости (HV<sub>10</sub>) в различных зонах сварного соединения.

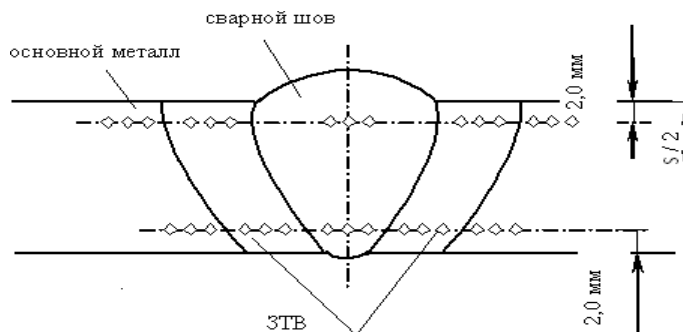


Рисунок 31 – Схема измерения твердости (HV<sub>10</sub>) в различных зонах сварного соединения

«Измерение твердости следует производить по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) на образцах (макрошлифах) по ГОСТ 6996, ГОСТ 2999.

При вырезке образцов (макрошлифов) охватывают все участки сварного соединения (сварной шов, ЗТВ, основной металл) и обеспечивают на параллельность сечений макрошлифов и шероховатость поверхности в местах измерения твердости не более  $Rz\ 80$ . (По ГОСТ 6996 шероховатость поверхности образцов принимаю в пределах от 1,25 до 2,00 мкм).

В каждой зоне замера выполняют не менее трех отпечатков (основного металла и ЗТВ с двух сторон от оси шва)» [22].

Геометрические параметры стандартных образцов типа IX и X по ГОСТ 6996 для испытаний на ударный изгиб представлены на рисунке 32.

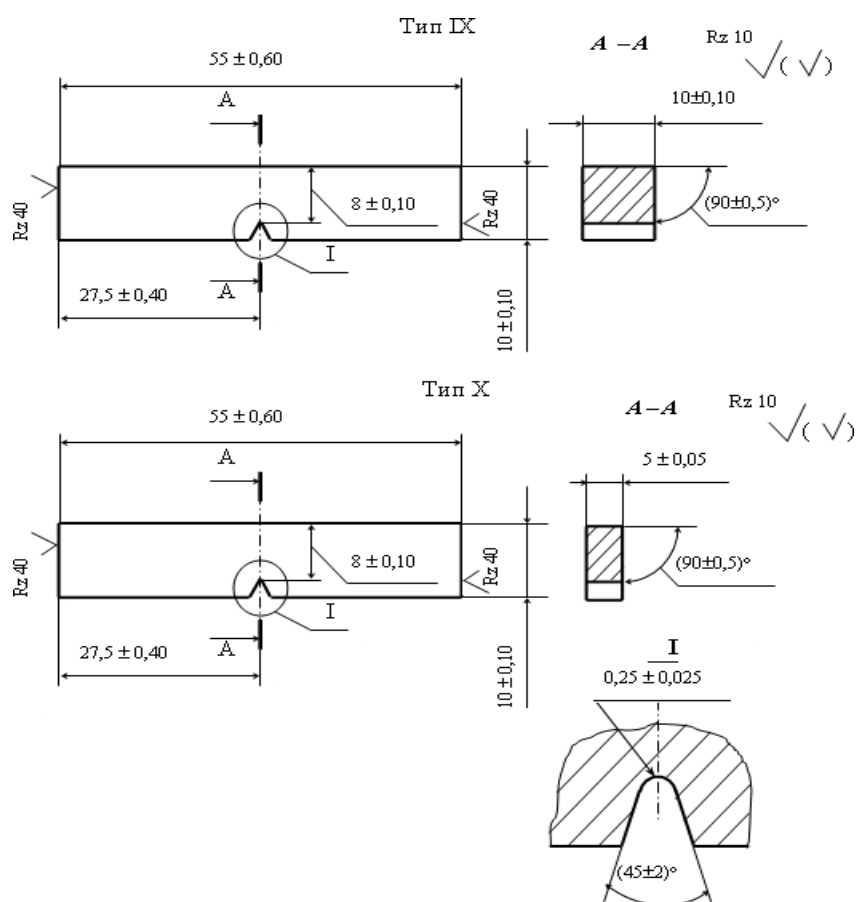


Рисунок 32 – Геометрические параметры стандартных образцов типа IX и X по ГОСТ 6996 для испытаний на ударный изгиб

Геометрические параметры стандартных круглых образцов типов I, II, III по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение металла шва сварного соединения представлены на рисунке 33.

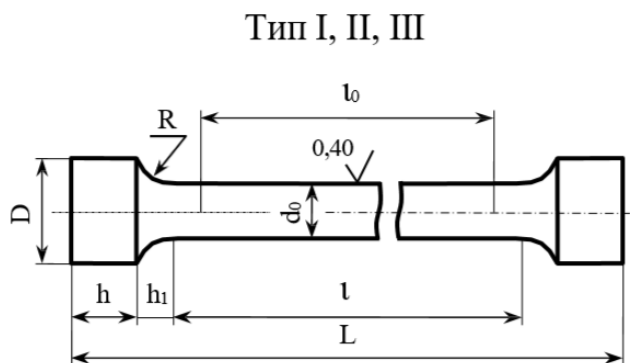


Рисунок 33 – Геометрические параметры стандартных круглых образцов типов I, II, III по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение металла шва сварного соединения

Геометрические параметры стандартных круглых образцов типа I; II; III по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение металла шва сварного соединения представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Геометрические параметры стандартных круглых образцов типа I; II; III по ГОСТ 6996 для испытаний на статическое растяжение металла шва сварного соединения

Тип образца	d0	K	D	h	h1	R	l0	l	L ± 1
I	3 ± 0,1	0,03	6	4	2	1	15	18	30
II	6 ± 0,1	0,03	12	10	2,5	1,5	30	36	61
III	10 ± 0,2	0,04	16	10	3	3	50	60	86

K – допустимая разность наибольшего и наименьшего диаметров на длине рабочей части образца.

«Рабочее сечение образцов оценивают по металлу испытываемого участка. В головках образца допустимо наличие металла других участков сварного

соединения. На поверхности головки допустимо наличие одной или двух (параллельных) лысок, а также наличие необработанной поверхности шва или основного металла. Размеры головки в месте лыски установлены в пределах: не менее  $d0+2$ . Разметку места вырезки образцов производят по макрошлифам, изготовленным на торцах заготовки. При испытании металла шва с сечением, превышающим сечение головки образца производят разметку места вырезки образцов без травления заготовки по внешним очертаниям шва» [29].

Оценку механических свойств КСС выполняли согласно данным таблицы 35.

Таблица 35 – Номы оценки механических свойств КСС

Классификация материалов	Временное сопротивление разрыву, МПа	На статических изгиб, (по API 1104) *	На ударный изгиб		Определение твердости по Виккерсу (HV10)
			образцов Шарпи (KCV <sup>-40°C</sup> ), Дж/см <sup>2</sup>		
			По оси шва	ЛС	МШ
К70	665-850	180 □	Не менее 60 минимальное значение для одного образца 50		≤300**

## 5 Обработка технологий сварки КСС

### 5.1 Обработка технологии сварки ААДП

С применением технологии ААДП были сварены следующие КСС:

- КСС-ААДП-1.1, КСС-ААДП-1.2, КСС-ААДП-1.3 с применением проволоки сварочной GS600, диаметрами 0,9 мм (корневой слой) и 1,0 мм (последующие слои);

- КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 с применением проволоки сварочной ПроТЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПроТЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои).

На рисунке 34 показана сборка КСС для технологии ААДП.



Рисунок 34 – Сборка КСС для технологии ААДП

Сварка производилась с предварительным и сопутствующим подогревом при температуре  $150^{+30}$  °С.

На рисунке 35 представлена процедура контроля температуры предварительного подогрева.



Рисунок 35 – Процедура контроля температуры предварительного подогрева.

Сертификаты качества на проволоку ПроТЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПроТЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои) представлены на рисунке 36.



**СВАРМОНТАЖСТРОЙ**

Формы 3.2 от EN 10204  
 Московская область, 141701  
 г. Дзержинский  
 Заводской проезд, д.18, стр.1  
 телефон: +7 495 417-409-47  
 email: info@svarmontazh.ru  
 www.svarmontazh.ru

**СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА №10687**

Грузополучатель: ООО "НИИ СТЭК СПЕКТР" Дата выдачи сертификата: "23" ноября 2023 г.  
 Наименование продукции: Проволока стальная сварочная  
 изготовленная в соответствии с требованиями ТУ 1227-001-2103.5840-2013  
 Классификация по AWS: A5.18 ER 70S-G

Марка проволоки	Диаметр, мм	Вид поверхности	Классификация по AWS		Материал	Тип упаковки	№ партии	№ партии	Дата изготовления	Толщина окалины на поверхности, мм
			виды	классы						
ПроТЭК 60	0,9	эмалеванная	-	9	15,5	500-100	500013	54.11.09.M	ноя.23	соответствует

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОВОЛОКИ, % (испытание согласно EN 10204 - 2.1)**

Плавка	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
700013	0,090	0,480	1,480	0,005	0,001	0,940	0,200	0,09

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ (испытание согласно EN 10204 - 3.1)**

Плавка	Диаметр, мм	Предел прочности при растяжении, Н/мм²	Примечание
700013	0,9	1066-1133	

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАИЗВЕРЖЕННОГО МЕТАЛЛА (испытание согласно EN 10204 - 2.2)**

Проволока, мм	Испытание на разрыв		Испытание на удар	
	Предел прочности, МПа	Остаточное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см²	Среднее значение
777	826	22	185	138

Уточнение к условиям сертификата: продукция изготовлена в соответствии с требованиями ТУ 1227-001-2103.5840-2013  
 Гарантийный срок хранения проволоки один год с момента изготовления (дата изготовления указана на упаковке)  
 Складские адреса: 141701, Дзержинский район, Московская область, Заводской проезд, д.18, стр.1 (для диаметров 0,7 мм, 0,9 мм)  
 141701, Дзержинский район, Московская область, Заводской проезд, д.18, стр.1 (для диаметров 1,0 мм, 1,2 мм, 1,6 мм)

сертификат № 20230183 от 23.11.23



Форма 3.1 по EN 10204  
 Московская область, 141760  
 с. Давыдовский  
 Лысковский проезд, д.18, стр.1  
 телефон: +7-800-612-05-07  
 email: info@smc.ru  
 www.smc.ru

СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА № 10686

Грузополучатель: ООО "ИВИН СТИК СПЕКТР"  
 Назначение продукции: Проволока стальная сварочная  
 изготовленная в соответствии с требованиями ТУ 14.34.13-012-66167121-2022

Дата выпуска сертификата: "23" ноября 2023 г.

Марка проволоки	Диаметр, мм	Качество рулонов мот		Масса, кг	Тип упаковки	№ партии	№ партии	Дата изготовления	Толщина окалины на поверхности по ГОСТ 9.031 мм
		видимый	скрытый						
Протэк 60	0,9	-	7	30	05-100	00000	01.04.19 У	ноя 23	соответствует

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОВОЛОКИ, % (испытания по методу EN 10204 - 3.1)

Марка	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Fe
000004	0,098	0,292	0,907	0,005	0,014	2,320	0,326	0,095

Примечание: в таблице указаны средние значения содержания элементов. Цифры в скобках являются пределами отклонения.

Гарантийный срок хранения проволоки после даты изготовления (дата изготовления указана на упаковке)



сертификат № ИИВ0013 QPC 10

Рисунок 36 – Сертификаты качества на проволоку ПротЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПротЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои)

На рисунке 39 представлены операционная технологическая карта для ААДП технологии сварки КСС проволоками ПротЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПротЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои).

ОПЕРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА									
сборки и автоматической сварки проволокой сплошного сечения в среде защитных газов корневого слоя шва (с механизированной сваркой проволокой сплошного сечения в среде защитных газов участков корневого слоя шва, невыполненных из-за отказа внутренних сварочных головок) и автоматической сваркой проволокой сплошного сечения в среде защитных газов заполняющих и облицовочных слоев шва неповоротных кольцевых стыковых соединений труб Ø1420x26,3 мм класса прочности K70 сварочным комплексом «CRC-Evans AW»									
Организация				Способ сварки		Конструктивные элементы сварных соединений		Шифр карты	
				ААДП+МАДП		труба + труба			
Характеристика изделий				Подготовка под сварку, сборка и параметры сварного шва				Сварочные материалы	
Номер ТУ (ГОСТ)	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Класс прочности	Нормативное временное сопротивление разрыву, не менее МПа	Эквивалент углерода, (C <sub>экв</sub> )% не менее				
Труба ТУ 14-156-107-2015; ТУ 1390-012-53570464-2016; ТУ 14-156-79-2014 и др.	1420	26,3	K70		0,43	<p>Минимальное количество слоев шва без учета подварочного слоя:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>при толщине св. 15 до 19 мм вкл. – 5;</li> <li>при толщине св. 19 до 23 мм вкл. – 6;</li> <li>при толщине св. 23 до 27 мм вкл. – 7;</li> <li>при толщине св. 27 до 32 мм вкл. – 8;</li> </ul>			
<p><b>Проволока сплошного сечения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренний (корневой) и подварочный слой шва - марка СМС Протэк 60 Ø 0,9 мм типа ER70S-G по AWS A5.18,</li> <li>- горячий проход, заполняющие и облицовочные слои шва, марка Протэк 80 Ø 1,0 мм типа ER70S-G по AWS A5.18</li> </ul> <p><b>Сварочная смесь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренний (корневой), подварочный, заполняющие и облицовочный слои шва – 80%Ag + 20%CO<sub>2</sub></li> </ul> <p>Допускается замена марок сварочных материалов на аналоги, внесенные в реестр сварочных материалов ПАО «Газпром».</p>									
<b>Режимы автоматической сварки</b>									

Параметры	Наименование слоя шва					
	Корневой		Горячий проход	Заполняющие	Последний за-полняющий	Облицовочный
Основной про-цесс	Вспомогательный Процесс***					
Скорость подачи электродной проволоки, дюйм/мин	380 – 390	350	400 - 440	350 - 420	350 - 420	320 - 330* 250 - 260**
Сила тока, А	190 - 210	150 - 200	260 - 270	150–215	150-215	125–167
Тип и полярность тока	постоянный ток, обратная полярность (DC +)					
Напряжение на дуге, В	19,5 – 20,5	19,0 – 20,5	24 – 25	21,9–24	22-25	18–23
Вылет электродной проволоки, мм	9,0	9,0	9,5	13,0	13,0	9,5
Скорость сварки, дюйм/мин	29 – 30	14-20	40 – 42	18,5-19* 13-14**	18,5 – 19* 13 – 14**	16-26* 15-17**
Направление сварки	на спуск					
Расход газа, л/мин	33 - 52	33 - 59	33-52	33 - 52		
Угол наклона электродной проволоки (вперёд)	0°-7°					
Частота колебаний электродной проволоки, мин <sup>-1</sup>	-	-	-	140 - 190	140 - 190	110–120* 130–160**
Амплитуда колебаний	-	-	-	Регулируется по ширине разделки		
Защитный газ	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>
Примечание: * - параметры для пространственного положения 10.00-2.00 ч. и 4.30-7.30 ч; ** - параметры для пространственного положения 2.00-4.30 ч. и 7.30-10.00 ч. *** - механизированная сварка применяется для выполнения отдельных участков корневого слоя шва в случае отказа одной или нескольких внутренних сварочных головок.						

Рисунок 39 – ОТК для ААДП технологии сварки КСС проволоками ПроТЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПроТЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои)

Пример сварки КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3 с применением проволоки сварочной GS600, диаметрами 0,9 мм (корневой слой) и 1,0 мм (последующие слои) представлен на рисунке 40.





Рисунок 40 – Пример сварки КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3 с применением проволоки сварочной GS600, диаметрами 0,9 мм (корневой слой) и 1,0 мм (последующие слои)

Сертификат качества на проволоку GS600 представлен на рисунке 41.



АЭМЗ		Сертификат качества № 38 от 22.12.2013																																											
Удобрения и ПЗ (СЗН-200, 5)		Спецификация: 18 док. № 18																																											
Спецификация: 18 док. № 18		Спецификация: 18 док. № 18																																											
Марка	Наименование	Технические условия	Вид контроля																																										
GS600	Проволока LP 0360 (1) марки КСМ 22 (2) с покрытием	ГО 121-891-0367-002	Нормы КСМ																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="14">Химический состав, %</th> </tr> <tr> <th>Марка</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>Mn</th> <th>Si</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> <th>Ni</th> <th>Al</th> <th>Fe</th> <th>N</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GS600</td> <td>0,05</td> <td>0,01</td> <td>0,2</td> <td>0,02</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,2</td> <td>0,02</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> </tr> </tbody> </table>				Химический состав, %														Марка	C	B	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe	N	V	GS600	0,05	0,01	0,2	0,02	0,01	0,01	0,2	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Химический состав, %																																													
Марка	C	B	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe	N	V																																
GS600	0,05	0,01	0,2	0,02	0,01	0,01	0,2	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Физико-механические свойства</th> </tr> <tr> <th>Марка проволоки</th> <th>Марка металла</th> <th>Температура испытания, °С</th> <th>Удлинение при разрыве, %</th> <th>Удлинение при разрыве, %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GS600</td> <td>КСМ 22</td> <td>20</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>				Физико-механические свойства					Марка проволоки	Марка металла	Температура испытания, °С	Удлинение при разрыве, %	Удлинение при разрыве, %	GS600	КСМ 22	20	10	10																											
Физико-механические свойства																																													
Марка проволоки	Марка металла	Температура испытания, °С	Удлинение при разрыве, %	Удлинение при разрыве, %																																									
GS600	КСМ 22	20	10	10																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="7">Технические условия изготовления проволоки (ГОСТ, ИСО, РСТ)</th> </tr> <tr> <th>Марка проволоки</th> <th>Марка металла</th> <th>Состояние поставки</th> <th>Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R<sub>изг</sub>)</th> <th>Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R<sub>изг</sub>)</th> <th>Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R<sub>изг</sub>)</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GS600</td> <td>КСМ 22</td> <td>20</td> <td>1000</td> <td>1000</td> <td>1000</td> <td>0,01</td> </tr> </tbody> </table>				Технические условия изготовления проволоки (ГОСТ, ИСО, РСТ)							Марка проволоки	Марка металла	Состояние поставки	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	C	GS600	КСМ 22	20	1000	1000	1000	0,01																					
Технические условия изготовления проволоки (ГОСТ, ИСО, РСТ)																																													
Марка проволоки	Марка металла	Состояние поставки	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	Среднее значение радиуса изгиба проволоки (R <sub>изг</sub> )	C																																							
GS600	КСМ 22	20	1000	1000	1000	0,01																																							
<p>Примечание: В сертификате прилагаются сертификаты качества на металл и проволоку.</p> <p>Сертификат действителен только в отношении металла и проволоки.</p>																																													
																																													

Рисунок 41 – Сертификат качества на проволоку GS600

## 5.2 Отработка комбинированной технологии сварки МП+АПИ

Комбинированной технологией сварки МП+АПИ проволоками марок GS600 ( $d = 1,2$  мм – корневой слой) и ИТС ( $d = 1,2$  мм – последующие слои) были сварены КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3.

Сварка производилась с предварительным подогревом при температуре  $150^{+30}$  °С (рисунок 42).



Рисунок 42 – Предварительный подогрев

Сварка производилась в отлаженном режиме, никаких особенностей в поведении проволоки при сварке не обнаружено. Для лучшего качества сварного соединения тщательно зачищался шов после каждого прохода.



Рисунок 43 – Процесс сварки КСС с применением комбинированной технологии сварки МП+МПИ

### **5.3 Отработка технологии АФ сварки**

В ходе отработки технологии АФ сварки были сварены КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3.

Отработка технологии АФ сварки проводилась на пластинах (рисунок 44).



Рисунок 44 – Отработка технологии сварки АФ

Для сварки КСС применялась сварочная проволока проволоки Ultra 327 диаметром 4 мм в сочетании с экспериментальным сварочным флюсом УФ-700П.

На рисунке 45 представлен сертификат качества на сварочную проволоку Ultra 327 диаметром 4 мм.



СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА № 10339

Форма 3.1 по EN 10204
Московская область, 141701
г. Долгопрудный
Лыжаческой просеки, д.18, стр.1
телефон: +7 495 617-69-47
e-mail: info@svartm.ru
www.svartm.ru

Грузополучатель: ООО "НИИЦ СПИК СПЕКТР"
Наименование продукции: Проволока стальная сварочная
EN ISO 14171-A: S2Ni2
AWS A5.23: ENi2

Дата выписки сертификата: "04" сентября 2023 г.

изготовлена в соответствии с требованиями с ТУ 24.34.13-005-66167121-2020

Table with 8 columns: Name, Diameter (mm), Qty of packages (sub-table: coils, coils), Weight (kg), Package type, No. of coils, No. of batches, Date of production.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОВОЛОКИ, % (испытания согласно EN 10204 - 3.1)

Table with 11 columns: Batch, C, Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Ti, Mo, N.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ (испытания согласно EN 10204 - 3.1)

Table with 4 columns: Batch, Diameter (mm), Tensile strength at break (N/mm2), Remarks.

Приведенная в настоящем сертификате продукция соответствует требованиям ТУ 24.34.13-005-66167121-2020
Гарантийный срок хранения проволоки один год с момента изготовления (дата изготовления указана на упаковке)
Одобрено НАКС (Г.ДО, Г.О, КО, МО, НГ.ДО, ОТ.ОГ, ОЗОНОВ, ПТО, СК) Свидетельство № АЭСМ-49-00788 (диаметр 4.0мм) (группы осн.кат-ов 1, 2)



сертификат № 31101819-QM 15

Рисунок 45 – Сертификат качества на сварочную проволоку
Ultra 327 диаметром 4 мм

Сварка производилась в отлаженном режиме (согласно ОТК), никаких особенностей в поведении проволоки и флюса при сварке не обнаружено. Для лучшего качества сварного соединения тщательно зачищался шов после каждого прохода.

5.4 Отработка технологии РД сварки

В соответствии с данными таблицы 26, сварка КСС-РД-1 выполнялась электродами с основным видом покрытия марки МЭЗ-70К:

- для корневого слоя шва использовались электроды диаметром 3,0 мм;
- для заполняющих слоев шва использовались электроды диаметром 4,0 мм;
- для облицовочного слоя шва использовались электроды диаметром 3,0 мм.

После подготовки кромок была произведена сборка стыка при помощи наружного центратора и вспомогательной техники.

Сертификат качества на электроды МЭЗ-70К представлен на рисунке 46.

**СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА № 1817**

Белорецкое шоссе 5, г.Магнитогорск, Челябинская область, Россия, 455002  
 Телефон: приёмная (3519) 24-07-29  
 E-mail: OOOМЭЗ@magielectrod.ru  
 Гл. технолог(3519) 24-08-04

Дата выдачи сертификата: 28.11.2023г.  
 Грузополучатель: ООО «Спектр», г. Свердлов  
 Договор/контракт №: \_\_\_\_\_ Расходная накладная №: \_\_\_\_\_

Вид продукции	Условное обозначение	Тип электрода по ГОСТ 9467-75	Проволока электродная сварочная		Номер партии	Масса нетто, кг	Количество мест и вид упаковки
			ГОСТ	Марка			
электроды	МЭЗ-70К 3,2 мм ГОСТ 9466-75, ГОСТ 9467-75 ТУ 25.93.15-072-16302447-2022	370	2246-70	Св-08А	3369-23	20	сб.лп/4пач
электроды	МЭЗ-70К 4,0 мм ГОСТ 9466-75, ГОСТ 9467-75 ТУ 25.93.15-072-16302447-2022	370	2246-70	Св-08А	3370-23	60	сб.лп/12пач

Номер партии	Дата изготовления	Механические свойства металла шва, наплавленного металла					Химический состав наплавленного металла, %							
		Временное сопротивление разрыву, $\sigma_{\text{т}}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{\text{т0.2}}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСВ (t=-40°C), Дж/см <sup>2</sup>	Твердость по Виккерсу HV <sub>0.05</sub>	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo
3369-23	01.11.23	787	571	24	67	80	246	0,07	1,90	0,56	0,006	0,013	0,84	0,25
3370-23	01.11.23	780	570	25	69	89	250	0,07	1,85	0,54	0,006	0,015	0,84	0,27

Указанная в сертификате продукция соответствует действующим в РФ стандартам и техническим условиям. Действителен на территории РФ и стран СНГ. При переписке по вопросам качества ссылаться на номер сертификата. Хранить в сухих отапливаемых помещениях при температуре не ниже +15°C, относительной влажности не более 60%. Осторожно крутить, бояться влаги.

Контролер ОТК Ю.А.Единова

Рисунок 46 – Сертификат качества на электроды МЭЗ-70К

Сварка КСС-РД-2.1, КСС-РД-2.2, КСС-РД-2.3 выполнялась ручной дуговой сваркой электродами марки ЦЛ-70К и ЦЛ-70:

- для корневого слоя шва использовались электроды марки ЦЛ-70К диаметром 3,0 мм;
- для заполняющих слоев шва использовались электроды марки ЦЛ-70 диаметром 4,0 мм;
- для облицовочного слоя шва использовались электроды марки ЦЛ-70 диаметром 3,0 мм.

## **6 Результаты проведенных исследований механических свойств кольцевых стыковых сварных соединений труб из стали класса прочности К70**

### **6.1 Результаты неразрушающего контроля**

Проведен неразрушающий контроль сварных соединений методами ВИК, РК, УК с положительным результатом.

### **6.2 Результаты механических испытаний КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3**

Результаты механических испытаний КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3 с применением проволоки сварочной GS600, диаметрами 0,9 мм (корневой слой) и 1,0 мм (последующие слои) представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Результаты механических испытаний КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3

Параметр	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытания на ударный изгиб (КСУ) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх:	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>
	58,88; 66,92; 70,63	
	Шов низ:	
	196,75; 81,13; 218,25	
	ЛС верх:	
	66,50; 391,00; 359,00	
	ЛС низ:	
	319,13; 336,88; 328,63	
	ЛС+2 верх:	
	342,18; 351,83; 338,51	
ЛС+2 низ:		
346,84; 362,15; 350,88		



Параметр	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 724,92 МПа 2: 724,65 МПа 3: 729,23 МПа 4: 727,35 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
Испытание на статическое растяжение металла шва	1: 799,51 МПа 2: 803,25 МПа	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180°
Оценка твердости	Годен	Не более 300 для МШ

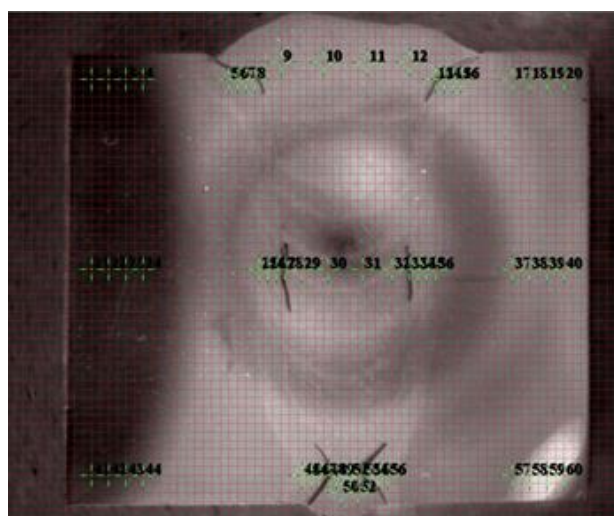


Рисунок 47 – Схема замера точек КСС

Оценка твёрдости КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) представлены в таблице 37.

Таблица 37 - Оценка твёрдости КСС-ААДП-1.1 КСС-ААДП-1.2 КСС-ААДП-1.3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----



OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM
259	263	266	269	230	232	239	255	265	266	251	248
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
269	262	283	265	266	267	266	266	234	232	238	240
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
236	245	242	249	280	262	255	270	279	262	242	238
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
251	238	250	243	259	258	249	253	223	231	222	240
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
279	256	276	291	257	226	223	245	275	280	277	272



Рисунок 48 – Пример макрошлифа КСС-ААДП-1.1

В результате механических испытаний данного сварного соединения были получены значения механических свойств удовлетворяют нормативным значениям.

### 6.3 Результаты механических испытаний КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3

Результаты механических испытаний КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 (средние значения) представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Результаты механических испытаний КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 (средние значения)

Обозначение	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытания на ударный изгиб (КCV) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх:	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>
	60,88; 63,50; 57,13	
	Шов низ:	
	90,75; 69,50; 64,50	
	ЛС верх:	
	59,13; 54,38; 187,88	
	ЛС низ:	
	366,13; 171,25; 129,13	
	ЛС+2 верх:	
	364,13; 373,75; 352,63	
ЛС+2 низ:	340,25; 363,88; 336,25	
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 733,70 МПа 2: 725,96 МПа 3: 729,08 МПа 4: 727,34 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
Испытание на статическое растяжение металла шва	1: 786,06 МПа 2: 780,56 МПа	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180 <sup>0</sup>
Оценка твердости	Годен	Не более 300

На рисунке 49 представлена схема точек при замере твердости.

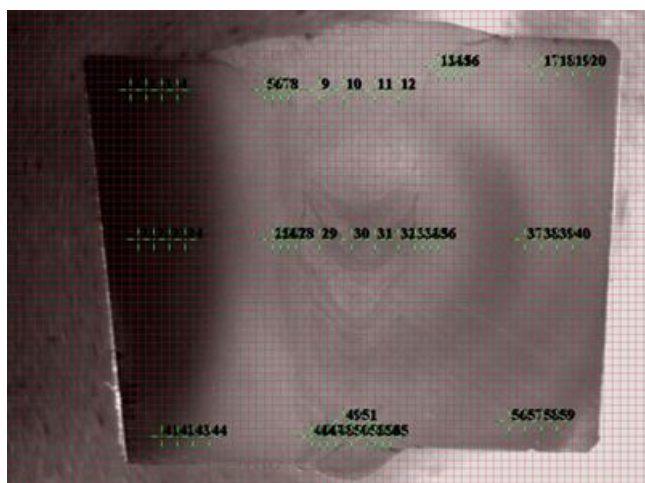


Рисунок 49 – Схема точек замера твердости

Оценка твёрдости (средние значения) КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) представлены в таблице 39.

Таблица 39 – Оценка твёрдости (средние значения) КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM
252	251	244	245	222	225	236	243	243	242	233	235
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ
240	254	234	224	240	245	252	255	230	233	230	227
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
225	228	222	242	274	283	291	279	256	249	228	232
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
242	238	254	242	256	252	252	248	232	215	224	264
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	
263	269	257	267	234	218	215	249	248	254	249	

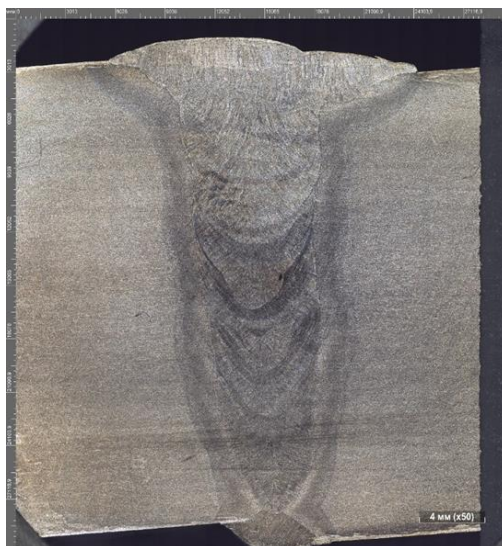


Рисунок 50 – Макрошлиф сваренный по технологии двусторонней ААДП проволоками ПроТЭК 60 диаметром 0,9 мм (корневой слой) и ПроТЭК 80М диаметром 1,0 мм (последующие слои)

В результате механических испытаний КСС-ААДП-2.1, КСС-ААДП-2.2, КСС-ААДП-2.3 были получены значения механических свойств, которые удовлетворяют нормативным значениям.

#### **6.4 Результаты механических испытаний КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3**

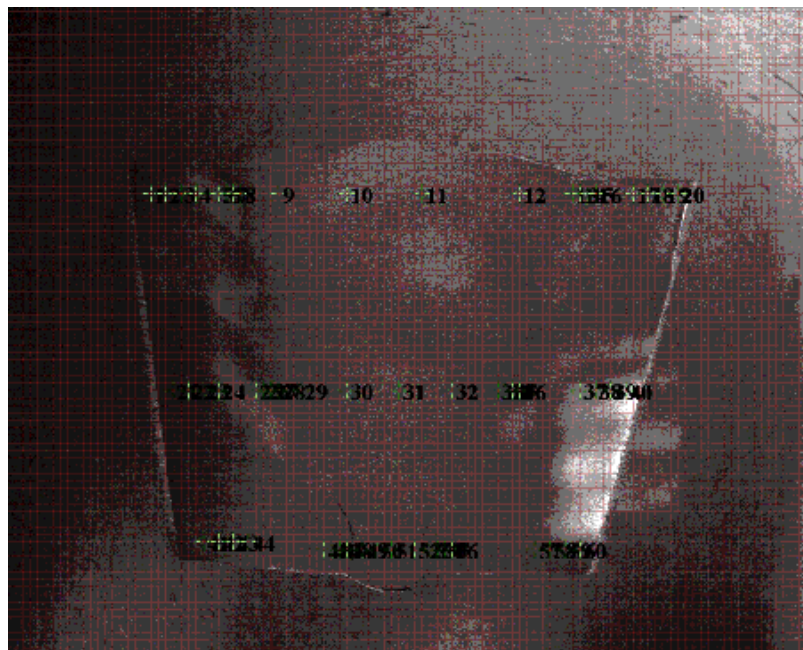
Результаты механических испытаний КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3 приведены в таблицах 40 – 41.

Таблица 40 – Результаты механических испытаний КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3

Параметр	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытания на ударный изгиб (КСУ) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх: 86,25; 86,25;95,10 Шов низ: 94,25;93,63;85,75 ЛС верх: 335,50; 308,88; 348,25 ЛС низ: 321,50; 305,13; 290,88 ЛС+2 верх: 316,88;334,88;328,50 ЛС+2 низ: 423,25;339,88;383,00	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 820,51 МПа 2: 790,73 МПа 3: 768,34 МПа 4: 714,94 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
Испытание на статическое растяжение металла шва	1: 783,00 МПа 2: 795,12 МПа	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180 <sup>0</sup>
Оценка твердости	Годен	Не более 300 для МШ



а)



б)

а – макрошлиф; б – схема замера точек

Рисунок 51 – Макрошлиф и схема замера точек КСС

Оценка твёрдости (средние значения) по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3 представлены в таблице 41.

Таблица 41 - Оценка твёрдости (средние значения) по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) КСС-МП+АПИ-1, КСС-МП+АПИ-2, КСС-МП+АПИ-3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM
221	216	216	194	218	238	243	266	313	351	378	299
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ЗТВ / HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ
251	250	259	222	206	219	243	249	215	212	217	215
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ / HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ

198	203	212	217	246	243	243	252	255	217	207	207
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
216	219	218	208	221	227	235	223	193	207	208	204
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
МШ / WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
200	182	186	207	203	208	206	199	226	229	231	231

В результате механических испытаний данного сварного соединения были получены значения механических свойств удовлетворяют нормативным значениям.

### 6.5 Результаты механических испытаний КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3

Результаты механических испытаний КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3 приведены в таблицах 42 и 43.

Таблица 42 – Результаты механических испытаний образцов КСС

Параметр	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытания на ударный изгиб (КCV) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх: 19,88;24,24;21,25 Шов низ: 40,75;48,50;42,50 ЛС верх: 85,00;103,88;309,25 ЛС низ: 347,63;316,38;280,38 ЛС+2 верх: 290,75;341,50;91,88 ЛС+2 низ: 331,75;337,88;327,38	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 825,92 МПа 2: 798,32 МПа 3: 789,94 МПа 4: 817,31 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
Испытание на	1: 852,39 МПа	

Параметр	Значение	Требования НД
1	2	3
статическое растяжение металла шва	2: 856,42 МПа	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180°
Оценка твердости	Годен	Не более 300 для МШ

Схема замера точек представлена на рисунке 52.

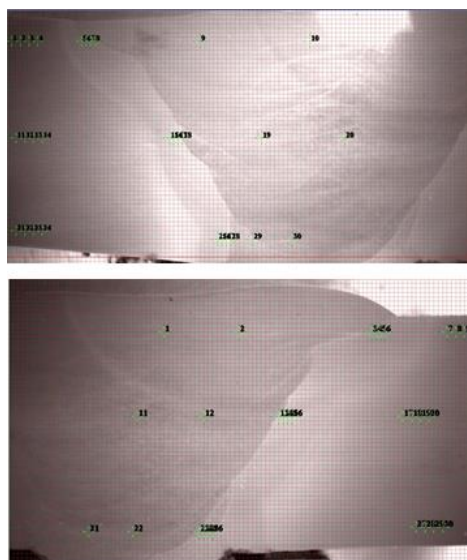


Рисунок 52 – Схема замера точек

Оценка твердости КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ ) представлена в таблице 43.

Таблица 43 – Оценка твердости КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3 по Виккерсу ( $HV_{10}$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM



238	238	224	226	194	202	202	215	263	257	215	219
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
212	211	176	189	188	238	273	256	237	233	227	232
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
192	193	197	217	212	235	250	237	203	208	208	205
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
214	215	230	227	252	271	199	194	194	197	215	212
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
215	213	237	253	197	207	201	198	221	222	219	222

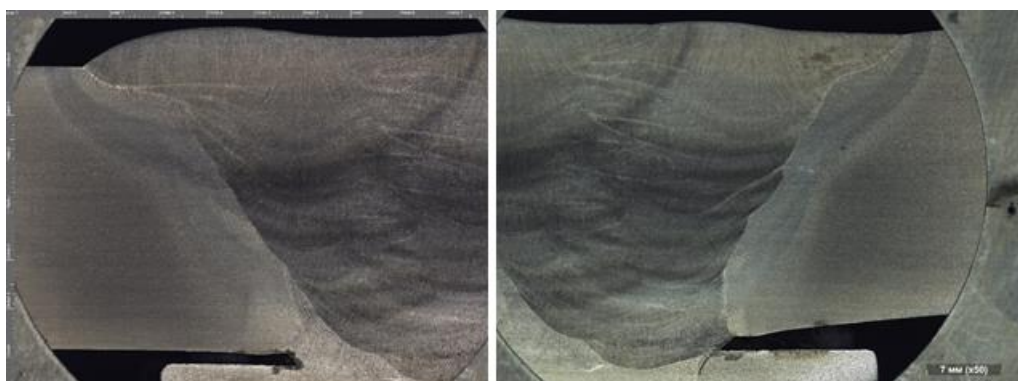


Рисунок 53 – Макрошлиф

В результате механических испытаний КСС-АФ-1, КСС-АФ-2, КСС-АФ-3 были получены значения механических свойств которые не удовлетворяют нормативным значениям. А именно, не соблюдены минимальные требования к значению единичной и средней ударной вязкости для зоны шва из нижних слоев (40,75;48,50;42,50 Дж/см<sup>2</sup>) и зоны шва из верхних слоев (19,88;24,25;21,25 Дж/см<sup>2</sup>).

### **6.6 Результаты механических испытаний КСС-РД-1.1, КСС-РД-1.2, КСС-РД-1.3**

Результаты механических испытаний (средние значения) КСС-РД-1.1, КСС-РД-1.2, КСС-РД-1.3 представлены в таблице 44.

Таблица 44 – Результаты механических испытаний КСС-РД-1.1, КСС-РД-1.2, КСС-РД-1.3

Вид испытания	Значение	Требования НД
1	2	3
Испытания на ударный изгиб (KCV) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх: <u>96,00; 40,13; 44,50</u>	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>
	Шов низ: <u>26,50; 33,38; 35,13</u>	
	ЛС верх: <u>54,00; 53,00; 32,13</u>	
	ЛС низ: <u>43,25; 38,75; 45,75</u>	
	ЛС+2 верх: 358,50; 363,63; 369,63	
	ЛС+2 низ: 281,88; 108,38; 359,38	
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 785,89 МПа 2: 790,88 МПа 3: 791,10 МПа 4: 788,66 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
	Испытание на статическое растяжение металла шва	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180 <sup>0</sup>
Оценка твердости	Годен	Не более 300 для МШ

Схема точек замера твердости представлена на рисунке 54.

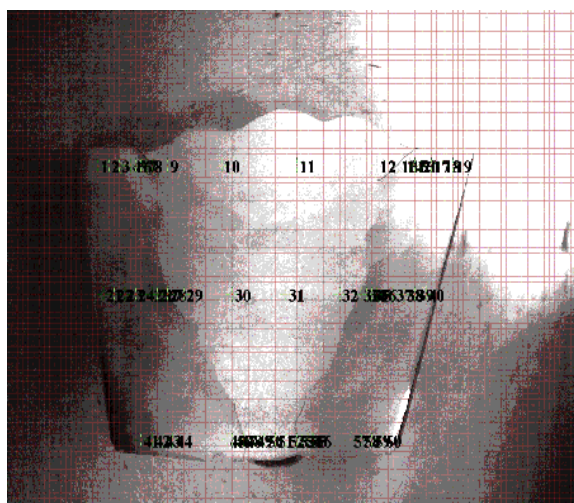


Рисунок 54 – Схема точек замера твердости

Оценка твёрдости КСС-РД-1.1, КСС-РД-1.2, КСС-РД-1.3 представлена в таблице 45.

Таблица 45 – Оценка твёрдости КСС-РД-1.1 по Виккерсу ( $HV_{10}$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM
217	212	208	206	203	212	212	220	254	267	256	261
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
270	253	236	226	197	227	209	199	207	210	200	194
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
200	196	205	227	276	242	262	257	245	229	213	195
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
191	201	215	217	219	215	209	207	183	195	185	200
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM	OM/ BM
241	231	237	239	185	201	198	205	179	194	203	204

На рисунке 55 представлен макрошлиф.



Рисунок 55 – Макрошлиф

В результате механических испытаний данного сварного соединения были получены значения механических свойств, которые не удовлетворяют нормативным значениям. А именно не соблюдены минимальные требования к значению единичной и средней ударной вязкости для зоны шва из верхних слоев, зоны шва из нижних слоев, зоны линии сплавления из верхних слоев, зоны линии сплавления из нижних слоев.

### 6.7 Результаты механических испытаний КСС-РД-2.1, КСС-РД-2.2, КСС-РД-2.3

Средние значения результатов механических испытаний КСС-РД-2.1 КСС-РД-2.2 КСС-РД-2.3 приведены в таблице 46.

Таблица 46 – Результаты механических испытаний КСС-РД-2.1, КСС-РД-2.2 КСС-РД-2.3 (средние значения)

Вид испытания	Значение	Требования НД
Испытания на ударный изгиб (KCV) (Дж/см <sup>2</sup> )	Шов верх: 42,00;65,63;39,25 Шов низ: 46,25;45,00;34,25 ЛС верх: 45,88; 45,13; 45,38 ЛС низ: 90,25; 98,75; 120,88	Среднее значение не менее 60 Дж/см <sup>2</sup> , минимальное значение для одного образца 50 Дж/см <sup>2</sup>

Вид испытания	Значение	Требования НД
	ЛС+2 верх: 348,38; 366,88; 78,25 ЛС+2 низ: 121,75; 393,88; 404,38	
Испытание на статическое растяжение плоских образцов	1: 790,43 МПа 2: 797,07 МПа 3: 794,86 МПа 4: 790,14 МПа	Временное сопротивление разрыву: 665-850 МПа
Испытание на статическое растяжение металла шва	1: 804,56 МПа 2: 806,44 МПа	
Испытание на статический изгиб	1: 180 град – годен 2: 180 град – годен 3: 180 град – годен 4: 180 град – годен 5: 180 град – годен 6: 180 град – годен 7: 180 град – годен 8: 180 град – годен	Угол загиба не менее 180°
Оценка твердости	Не годен	Не более 300 для МШ

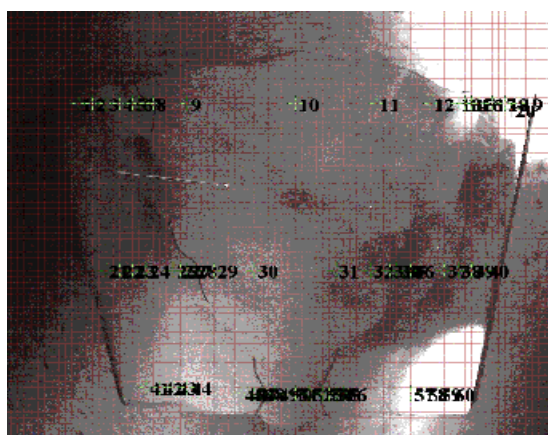


Рисунок 56 – Схема точек замера твердости.

Таблица 47 – Оценка твёрдости КСС-РД-2.1, КСС-РД-2.2 КСС-РД-2.3 (средние значения) по Виккерсу (HV10) (средние значения)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM	МШ/ WM
219	213	218	202	238	256	272	278	281	<u>321</u>	277	283
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ
245	228	209	205	212	213	201	214	215	206	214	195
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
203	207	209	216	238	235	238	246	243	219	204	199
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ
215	210	209	219	211	215	214	216	198	191	201	203
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	МШ/ ВМ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ЗТВ/ HAZ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ	ОМ/ ВМ
197	203	199	201	205	199	196	197	220	219	221	218

На рисунке 57 представлен макрошлиф КСС.



Рисунок 57 – Макрошлиф КСС

В результате механических испытаний данного сварного соединения были получены значения механических свойств, которые не удовлетворяют нормативным значениям. А именно не соблюдены минимальные требования к значению единичной и средней ударной вязкости для зоны шва из верхних

слоев (42,00;65,63;39,25 Дж/см<sup>2</sup>), зоны шва из нижних слоев (46,25;45,00;34,25 Дж/см<sup>2</sup>), зоны линии сплавления из верхних слоев (45,88;45,13;45,38 Дж/см<sup>2</sup>), а также твердость более 300 в верхней линии замера для металла шва (321).

## 6.8 Анализ результатов механических испытаний

Следствием проведенных механических испытаний выполнен анализ механических свойств КСС по ударной вязкости, статическому растяжению и твердости.

Анализ результатов ударной вязкости представлен на рисунке 58.

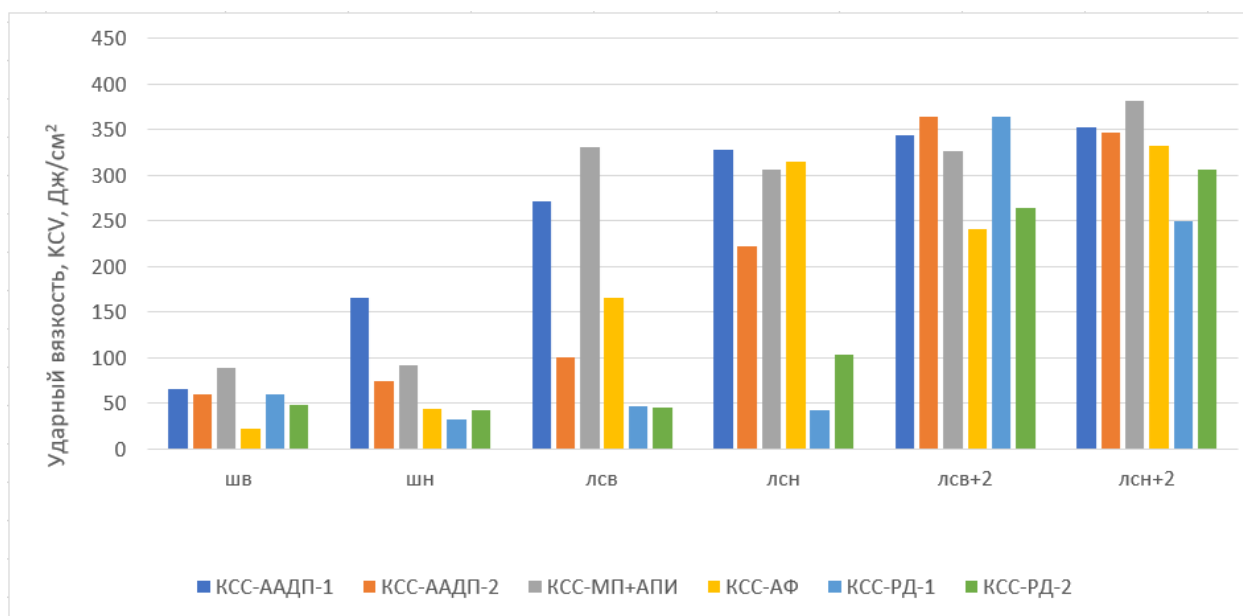


Рисунок 58 – Анализ результатов ударной вязкости

Анализ результатов статического растяжения плоских образцов представлен на рисунке 59.

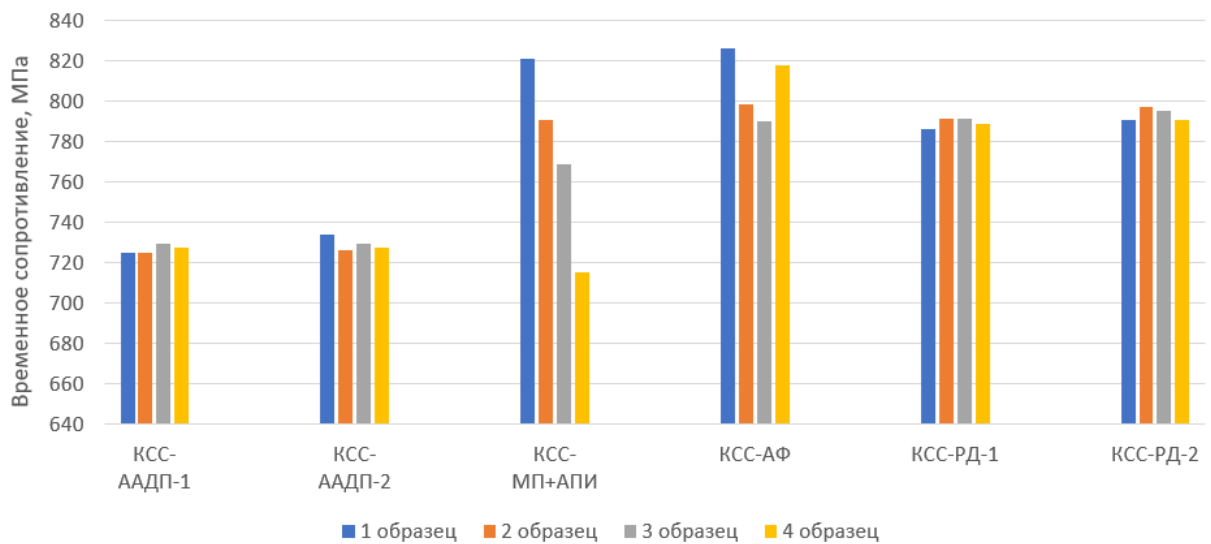


Рисунок 59 – Анализ результатов статического растяжения

Анализ результатов статического растяжения цилиндрических образцов (металл шва) представлен на рисунке 60.

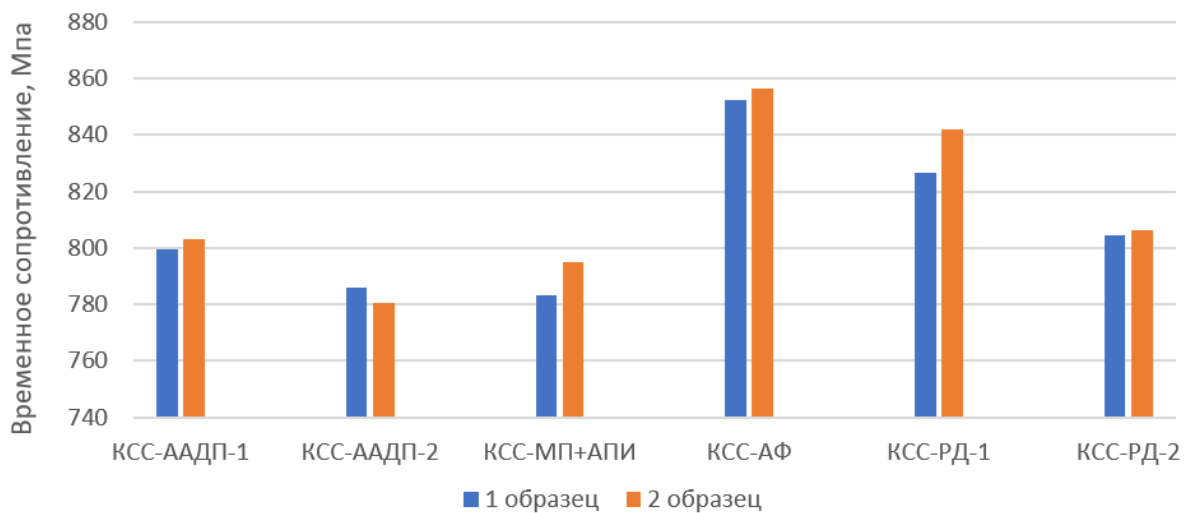


Рисунок 60 – Анализ результатов статического растяжения цилиндрических образцов

Анализ результатов твердости представлен на рисунке 61.



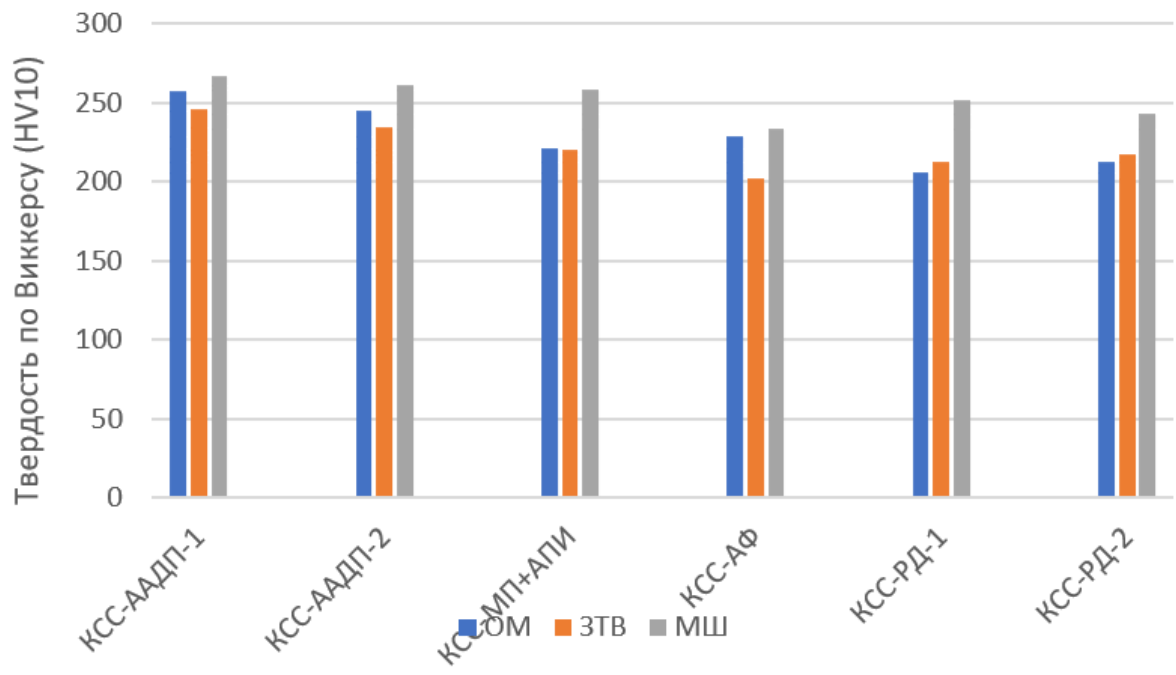


Рисунок 61 – Анализ результатов твердости

## Заключение

1. Исследована структура высокопрочных сталей класса прочности К70. В результате чего, было установлено, что наличие бейнитной составляющей в структуре металла шва существенно повышает его трещиностойкость.

2. Установлено, что снижение величины погонной энергии, при сварке, может быть достигнуто за счет применения более производительных способов и технологий сварки, что позволяет существенно улучшить механические свойства сварных соединений, за счет уменьшения размеров ЗТВ.

3. Выполнена сварка КСС способами и технологиями сварки, определенными в ходе проведения исследований.

4. Разработана методика проведения испытаний КСС, изготовленных из сталей класса прочности К70, включающая в себя определение методов и объема проведения неразрушающего контроля и механических испытаний образцов КСС, включая выбор исследовательского оборудования.

5. На основе проведенной работы предложены технологии сварки труб из высокопрочных сталей класса прочности К70, включающие в себя:

- требования по подготовке и сборке стыков труб к сварке;
- технологические режимы подогрева и выбор оборудования для него;
- выбор технологических режимов сварки, сварочных материалов и оборудования.

6. Анализ результатов проведенных исследований и испытаний показал, что по совокупности практичности применения, качества и механических свойств КСС, наиболее перспективной является комбинированная технология сварки МП+АПИ.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Vyacheslav V. Karlusov, Dmitrii A. Yarkov «Economics and management of a national economy» / Cooperation between Russia and China in the gas industry: trends, problems, prospects, Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2020, Vol. 10, Is. 6A – p. 239-254.
2. Проблемы механизации строительства магистральных трубопроводов большого диаметра высокого давления. Обзор сессии проблем научно-технического совета Российского союза нефтегазостроителей и выдержки из решения // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2007. Сентябрь, №3. URL : <https://trubotvod.ru/articles/detail.php?ID=2147>.
3. Симбухов И.А. Разработка химического состава, технологии термомеханической обработки высокопрочной стали категории прочности X120 (K90) для труб магистральных газопроводов высокого давления : автореферат. Москва. 2014.
4. Северсталь разработала технологии изготовления труб категорий прочности K70 (X90) и X100 // Металлоснабжение и сбыт. 2011. URL : <https://www.metalinfo.ru/ru/news/48979>.
5. ГОСТ 29273-92. Свариваемость. Определение. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – С. 2 – 9.
6. В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов. Введение в основы сварки: учеб. пособие. Томск: Юргинский технологический институт. Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 317 с.
7. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. и.п. Алешина, Г.Г. Чернышова.- М.: Машиностроение, 2004. Т. 1/ и.п. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др.- 624 с.: ил.
8. Б.Т. Кошкарев. Теория сварочных процессов: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. – 217 с.

9. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1985. – 22 с.

10. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов. Справ. изд. /Под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.

11. СП 34-101-98. Система нормативных документов в строительстве. Свод правил. Выбор труб для магистральных нефтепроводов при строительстве и капитальном ремонте. – М.: Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть», 1998.

12. Гривняк И. Свариваемость сталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.

13. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2016. – 162 с.

14. Вышемирский Е.Д. Обоснование критического значения эквивалента углерода на основе оценки свариваемости сталей для труб класса прочности K65 и K70: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.02.10, 2017. – 138 с.

15. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке / В.А. Кархин. – 2-е изд.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с.

16. Рыбин В.С., Квашнин В.Д. Расчетная оценка влияния погонной энергии на образование холодных трещин в зоне термического влияния сварного шва // Журн. «Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2014. – Том 14. №4. – С. 60 – 65.

17. Bin Guo, Lei Fan , Qian Wang, Zhibin Fu, Qingfeng Wang, and Fucheng Zhang. The Role of the Bainitic Packet in Control of Impact Toughness in a Simulated CGHAZ of X90 Pipeline Steel. Sci. Metals 2016, 6, 256.

18. Sung, H.K.; Shin, S.Y.; Cha, W.; Oh, K.; Lee, S.; Kim, N.J. Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-

containing API X80 linepipe steels. Mater. Sci. Eng. A 2011, 528, 3350–3357. [CrossRef],

19. Zhu, Z.X.; Marimuthu, M.; Kuzmikova, L.; Li, H.J.; Barbaro, F. Influence of Ti/N ratio on simulated CGHAZ microstructure and toughness in X70 steels. Sci. Technol. Weld. Join. 2013, 18, 45–51. [CrossRef]

20. Hu, H.; Xu, G.; Zhou, M.; Yuan, Q. Effect of Mo content on microstructure and property of low-carbon bainitic steels. Metals 2016, 6, 173. [CrossRef], 2) Rancel, L.; Gómez, M.; Medina, S.F.; Gutierrez, I. Measurement of bainite packet size and its influence on cleavage fracture in a medium carbon bainitic steel. Mater. Sci. Eng. A 2011, 530, 21–27. [CrossRef]

21. РД-25.160.00-КТН-0537-23. Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов. – М.: ПАО «Транснефть», 2023.

22. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть I. – М.: Открытое акционерное общество «Газпром», 2007.

23. Кархин В.А., Левченко А.М. Поведение водорода при сварке сталей/ В.А. Кархин, А.М. Левченко. – СПб.: Политех-Пресс, 2024. – 321 с.

24. Технические требования к сварке и неразрушающему контролю качества сварных соединений при строительстве МГ «Сила Сибири», в том числе при пересечении зон активных тектонических разломов. – М.: Публичное акционерное общество «Газпром», 2015.

25. URL : [https://npfets.ru/catalog/ao\\_emz\\_firma\\_selma\\_/svarka\\_v\\_zashitnom\\_gaze/istochniki\\_pitaniya\\_mig/svarochnuy\\_invertor\\_its\\_315/](https://npfets.ru/catalog/ao_emz_firma_selma_/svarka_v_zashitnom_gaze/istochniki_pitaniya_mig/svarochnuy_invertor_its_315/).

26. URL : <https://xn--e1aqadalkdy.xn--p1ai/catalog/avtomaticheskaya-svarka/uast-1-alfa>.

27. URL : <https://www.crcevans.com/wp-content/uploads/2023/04/iwm.pdf>.

28. URL: <https://www.prom.uz/ads/svarochnaya-golovka-p700-crcevans/?ysclid=ma9s00fnir607693289>.

29. ГОСТ ГОСТ 6996-66. Соединения сварные. Методы определения механических свойств. – М.: Стандартинформ, 2006. – 66 с.

30. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. Т.3. /Под ред. В.А. Винокурова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с., 23. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.