

На правах рукописи

Рамусь Руслан Олегович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ
ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ИХ
СВАРИВАЕМОСТИ**

Специальность 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned to the left of the date.

Москва – 2022

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ») и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина» (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)

Научный руководитель: **ЕФИМЕНКО Любовь Айзиковна**
доктор технических наук
РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина, профессор

Официальные оппоненты: **ШОЛОХОВ Михаил Александрович**
Доктор технических наук
ООО «Шторм», директор

КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич
Кандидат технических наук
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО СПбПУ**

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 года в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «___» августа 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Панкратов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Возрастающее значение природного газа в мировом энергобалансе и его широкий спрос на мировом рынке обуславливает необходимость освоения новых территорий Российской Федерации со сложными геолого-климатическими условиями для прокладки трасс газопроводов.

С началом освоения новых газовых месторождений полуострова Ямал, Дальнего Востока и Восточной Сибири возникла необходимость сооружения современных газопроводов в сейсмически активных районах, пересекающих зоны активных тектонических разломов.

С целью обеспечения безопасности транспорта газа, надежности эксплуатации газотранспортной системы появляется необходимость повышения деформационной способности металла элементов магистральных газопроводов на участках пересечения активных тектонических разломов (АТР), на участках прокладки в зонах многолетнемерзлых грунтов в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше по шкале MSK-64, участках прокладки в районах со слабой несущей способностью грунтов при оттаивании, участках развития по трассе газопровода процессов эрозии, пучения, оползне- и наледообразования, криогенного растрескивания, заболачивания, участках прокладки в районах с карстовыми воронками и высокой вероятностью схода селей.

В связи с этим были разработаны электросварные прямошовные трубы классов прочности К60 (в перспективе К65) из сталей с повышенной деформационной способностью (ПДС).

Отличительной особенностью труб из сталей ПДС является способность деформироваться при изгибе без гофрообразования в области сжимающих напряжений и сохранение целостности при деформировании трубы.

В работах отечественных и зарубежных ученых, таких как Макаров Э.Л., Столяров В.И., Ефименко Л.А., Франтов И.И., Эфрон Л.И., Пышминцев И.Ю., Настич С.Ю., Ишикава Н. и другие, значительное внимание уделено изучению особенностей сварочных процессов, применяемых при производстве труб и строительстве магистральных газопроводов из низкоуглеродистых микролегированных высокопрочных сталей ПДС. Вместе с тем вопросы, связанные с обоснованием выбора ремонтных технологий и их воздействие на формирование структуры и свойств ремонтных сварных соединений, изучены недостаточно.

В связи с чем разработка технологий ремонта сварных соединений, основанная на изучении особенностей процессов структурообразования при сварке сталей ПДС, является актуальной.

Цель работы: обеспечение комплекса механических свойств ремонтных кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью на уровне нормативных требований.

Задачи работы:

1. Выполнить анализ технологий сварки, применяемых при строительстве и ремонте магистральных газопроводов.

2. Оценить реакцию сталей с повышенной деформационной способностью на термические циклы сварки на основе изучения особенностей:

- кинетики распада аустенита в условиях выполнения ремонта сварных соединений;

- процессов структурообразования и их влияния на механические свойства металла участков зоны термического влияния;

3. Определить параметры термических циклов сварки, обеспечивающие нормативный уровень механических характеристик сварных соединений и условия их реализации при выполнении ремонта сварных соединений.

4. Выполнить экспериментальную оценку структуры и свойств металла ремонтных сварных соединений, полученных в результате реализации рекомендуемых сварочных процессов.

5. Разработать нормативную документацию по технологии ремонта кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью.

Методы исследования: работа выполнена на основе анализа и обобщения литературных данных, лабораторных исследований и натурных испытаний.

В работе использованы: dilatометрический метод для построения термокинетических диаграмм распада аустенита с целью изучения кинетики фазовых превращений в условиях сварочного процесса; метод имитации термических циклов сварки; оптическая металлография, в том числе для изучения морфологии структуры – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия тонких фольг (ПЭМ); стандартные методы измерения твердости; определение механических свойств в условиях статического и динамического нагружения, методы математического моделирования сварочных процессов, экспериментальные методики записи термических циклов сварки.

Научная новизна:

1. Выявлено, что в околошовном участке зоны термического влияния сварных соединений из сталей ПДС при нагреве и охлаждении по термическим циклам сварки ремонтных технологий за счет выделения мартенситно-аустенитных и карбидных фаз происходит снижение ударной вязкости даже при незначительном условном диаметре аустенитного зерна (около 50 мкм).

2. Определен структурно-фазовый состав околошовного участка зоны термического влияния, гарантированно обеспечивающий нормативный уровень ударной вязкости, состоящий преимущественно из реечного бейнитного феррита и мартенситной фазы в количестве не более 20 %. Содержание мартенситно-аустенитных составляющих не должно превышать 5-7 %.

3. Выявлено наличие разупрочнения (около 24%) на участке зоны термического влияния с максимальными температурами нагрева 850 – 950 °С за счет образования специальных карбидов (NbC, TiC, VC), выводящих из твердого раствора углерод и легирующие элементы.

4. Определен структурно-фазовый состав, нивелирующий разупрочнение, который должен состоять из квазиполигонального феррита (около 45 %), «вырожденного» перлита (не более 20 %) и глобулярного бейнитного феррита с диспергированными в бейнитную матрицу мартенситно-аустенитными фазами в количестве не менее 10–12 %.

5. Установлен диапазон скоростей охлаждения (w_{8-5}) 25 – 50 °C/с металла зоны термического влияния при сварке (заварке), обеспечивающий указанный структурно-фазовый состав и механические свойства отремонтированных сварных соединений магистральных газопроводов из сталей ПДС на уровне нормативных требований.

Практическая значимость работы:

Обоснована целесообразность использования при ремонтно-восстановительных работах следующих способов сварки: ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия (РД), механизированная сварка порошковой проволокой в защитных газах (МПИ), механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС). Предложены технологические мероприятия, позволяющие применение вышеуказанных способов сварки при ремонте кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов, изготовленных из сталей с повышенной деформационной способностью с нормативным значением временного сопротивления на разрыв (σ_B) до 590 МПа, номинальным диаметром до DN 1400 с толщиной стенки до 37,9 мм включительно.

Результаты работы использованы при создании Р Газпром 2-2.3-1204-2020 «Технологии ремонта кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости».

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методик экспериментальных исследований, использованием современного, сертифицированного и аттестованного оборудования, программных пакетов обработки данных, а также реализацией в условиях промышленного применения. Результаты работы доложены на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальной оценки параметров термических циклов технологий сварки, применяемых при ремонте кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью.

2. Выявленные особенности кинетики распада аустенита при ремонте сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью.

3. Установленное влияние выделения мартенситно-аустенитных и карбидных фаз при сварке сталей с повышенной деформационной способностью на снижение ударной вязкости в околошовном участке и участке возможного разупрочнения зоны термического влияния.

4. Установленные рациональные диапазоны скоростей охлаждения и параметры режимов сварки их обеспечивающие.

5. Результаты экспериментального подтверждения научных выводов при квалификационных испытаниях технологий ремонта кольцевых сварных соединений.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на VIII Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019)». – Москва, 2019 г.; Международной научно-практической конференции,

посвященной 75-летию факультета инженерной механики (РГУ нефти и газа (НИУ) И.М. Губкина). – Москва, 2018 г., VII Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: Настоящее и будущее (GTS – 2017)». – Москва, 2017 г., VIII Отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром». – Москва, 2016 г.

Личный вклад соискателя состоит в изучение, анализе и обзоре научно-технической документации, периодических изданий, отечественной и зарубежной научной литературы по теме диссертации, постановке цели, определении задач работы, выборе методов исследования, непосредственном участии в проведении лабораторных исследований и квалификационных испытаний, обработке, анализе их результатов, обобщении и формулировании заключительных положений. Результаты работы автором опубликованы и внедрены при создании Р Газпром 2-2.3-1204-2020 «Технологии ремонта кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости».

Публикации по теме диссертации: основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах общим объемом 4,18 п.л., из них 6 работ опубликованы в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS, 6 работ входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 97 наименований. Работа изложена на 159 страницах, содержит 34 таблицы, 67 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором на основе опубликованных данных рассмотрены особенности структурно-фазового и химического состава малоуглеродистых высокопрочных трубных сталей с повышенной деформационной способностью (ПДС). Приведены особенности производства листового проката для труб ПДС. Показаны основные отличия структурно-фазового и химического составов малоуглеродистых высокопрочных трубных сталей ПДС в сравнении с традиционными трубными сталями той же категории прочности. Приведены требования к механическим свойствам высокопрочных трубных сталей ПДС и их сварным соединениям. Представлен анализ свариваемости высокопрочных трубных сталей ПДС. Представлены результаты оценки исходных характеристик исследуемых сталей.

Результаты выполненного анализа послужили основанием для постановки цели работы и задач исследования.

Вторая глава работы посвящена экспериментальной оценке параметров термических циклов сварки, применяемых при сооружении и ремонте магистральных газопроводов.

Для записи термических циклов сварки использовались сегменты трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 25,8 мм класса прочности K60, на которых были подготовлены выборки с различными геометрическими параметрами,

имитирующие разделку кромок при ремонте кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов (Рисунок 1).

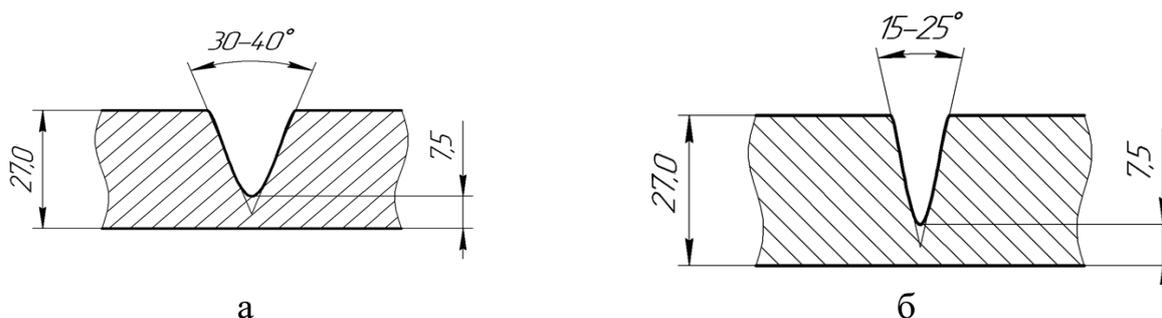


Рисунок 1. Геометрические параметры выборки для ремонта сварных соединений со стандартной заводской разделкой кромок (1, а) и специальной зауженной (1, б) разделкой кромок

Для их заварки применялись ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия (РД), механизированная сварка порошковой проволокой в среде защитных газов (МПИ), механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС).

Регистрация термических циклов сварки осуществлялась хромель-алюмелевыми термопарами, приваренными в отверстия на различную глубину и расстояние от оси разделки, с помощью аналого-числового преобразователя «Мемограф-М» (Рисунок 2).

Экспериментальным путем определены диапазоны скоростей охлаждения (w_{8-5}) в интервале температур диффузионного распада аустенита металла зоны термического влияния (ЗТВ) при выполнении ремонтных работ следующими способами сварки:

- ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия (РД) от $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до $47,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$;
- механизированная сварка порошковой проволокой в среде защитных газов (МПИ) от $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до $58,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$;
- механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС) от $10,0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до $19,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$.



Рисунок 2. Сегмент трубы с термопарами для исследования температурно-временных параметров сварочного цикла, установленными в области расчетной зоны термического влияния

Кроме экспериментального способа определения скоростей охлаждения были выполнены расчеты основных параметров термических циклов сварки согласно подходов для решения тепловых задач, базирующихся на результатах работ Н.Н. Рыкалина.

Так, скорость охлаждения при РД сварке, определённая расчетным методом, в зависимости от слоев шва менялась от 10,3 °С/с до 45,7 °С/с, при МПИ – от 28 °С/с до 55,6 °С/с, при МПС – от 12,3 °С/с до 18,3 °С/с.

Сопоставление значений скоростей охлаждения, полученных экспериментальным и расчетным методами, показало их хорошую сходимость. Это позволит в дальнейшем при выполнении ремонтных работ с другими геометрическими параметрами зоны ремонта использовать расчетный метод.

Полученные диапазоны скоростей охлаждения были использованы при изучении реакции высокопрочных сталей с повышенной деформационной способностью на термические циклы сварки.

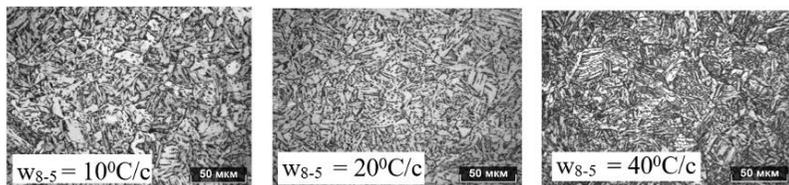
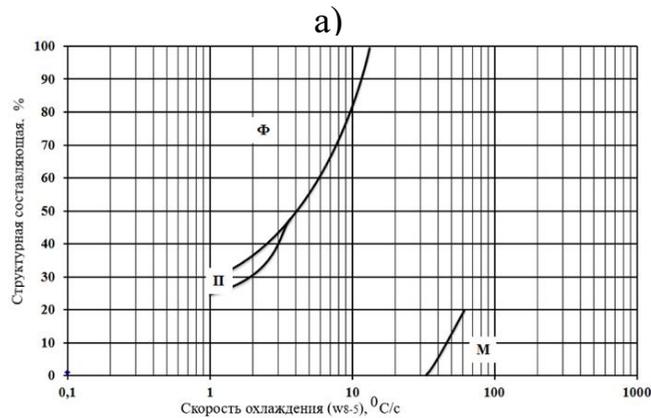
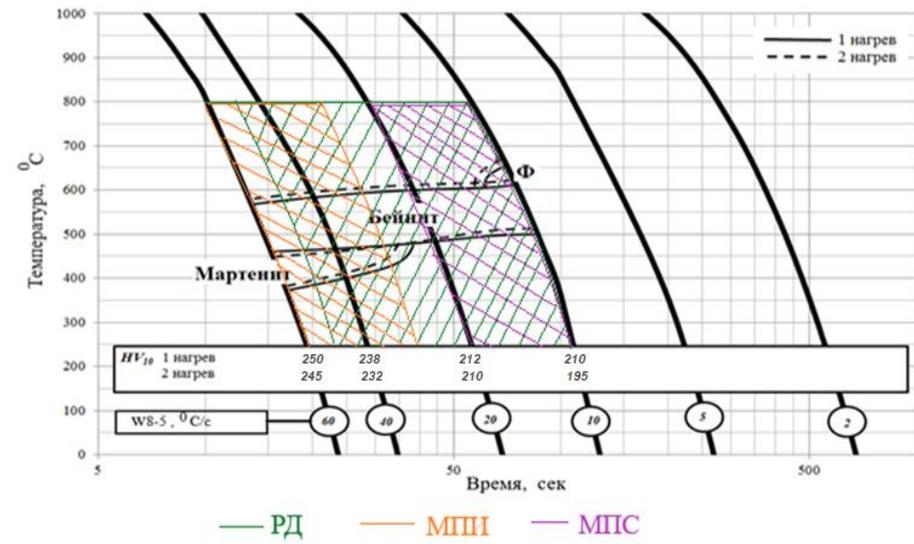
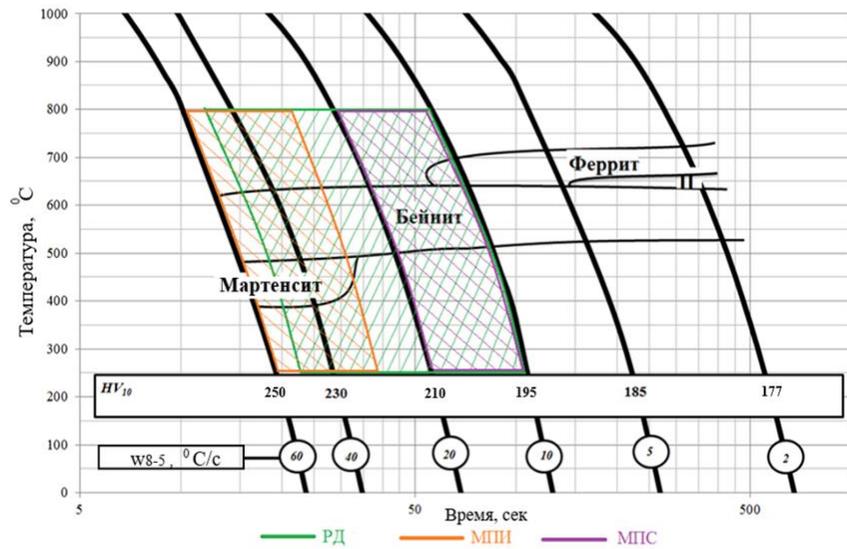
Третья глава посвящена исследованию реакции сталей ПДС на термические циклы сварки ремонтных технологий, которая оценивалась по влиянию теплофизического воздействия на изменение структурно-фазового состава и его влияния на механические свойства металла участков ЗТВ сварных соединений.

Исследованы особенности кинетики распада аустенита в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединений с учетом изменения исходного состояния материала под воздействием применяемых технологий сварки при строительстве и ремонте кольцевых сварных соединений из сталей ПДС.

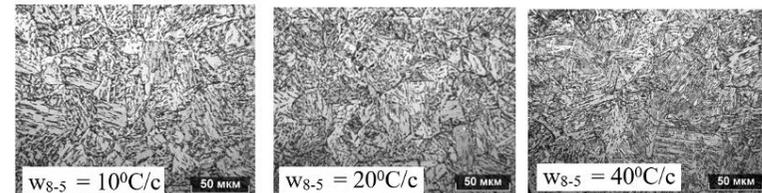
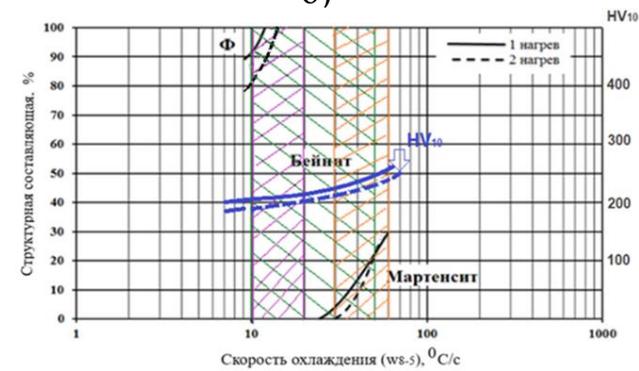
Согласно термокинетическим и структурным диаграммам (Рисунок 3, а) эти изменения выразились в формировании структуры в околошовном участке (ОШУ) ЗТВ отличной от исходного структурно-фазового состава стали ПДС. Сократилось количество ферритной фазы более чем в пять раз, основной структурой является бейнит. Распад аустенита в бейнитной области распространяется на весь исследуемый диапазон скоростей охлаждения (Рисунок 3, а). Превращение происходит в интервале температур от 610 °С до 530 °С при скорости охлаждения 2 °С/с. Затем с увеличением скорости охлаждения этот температурный интервал расширяется и составляет 570-450 °С при скорости охлаждения $w_{8.5} = 60$ °С/с. Бейнитное превращение является доминирующим во всем интервале скоростей охлаждения, морфология которого с увеличением скорости охлаждения ($w_{8.5} \geq 20$ °С) меняется с глобулярного бейнитного феррита (Рисунок 4, б) на речный бейнитный феррит (Рисунок 4, в).

Появление мартенсита в металле ОШУ ЗТВ фиксируется при скорости охлаждения около 25 °С/с и при $w_{8.5} = 50$ °С/с (Рисунок 3, а) составляет около 20 %. Образовавшийся мартенсит (Рисунок 4, д) характеризуется низкой плотностью дислокаций и имеет параллельные слабо разориентированные блоки α -фазы с шириной реек 0,2-1,2 мкм, объединенных в блоки. Твердость металла возрастает до 240 HV₁₀, но не превышает нормативные требования.

Повторный нагрев, испытываемый металлом при выполнении ремонтных сварочных работ, не вызывает существенных изменений по температурным интервалам формирования фаз в структуре, но вместе с тем расширяются области превращения к более быстрым скоростям охлаждения (Рисунок 3, б). При скорости охлаждения 10 °С/с содержание ферритной фазы в структуре не более 20 %.



в)



г)

Рисунок 3. Термокинетические диаграммы распада аустенита (а, б) и структурные диаграммы (в, г) околошовного участка ЗТВ сталей ПДС при однократном (а, в) и двукратном (б, г) воздействии ТЦС, с нанесенной областью скоростей охлаждения, реализуемых при методах сварки, применяемых при ремонте кольцевых сварных соединений

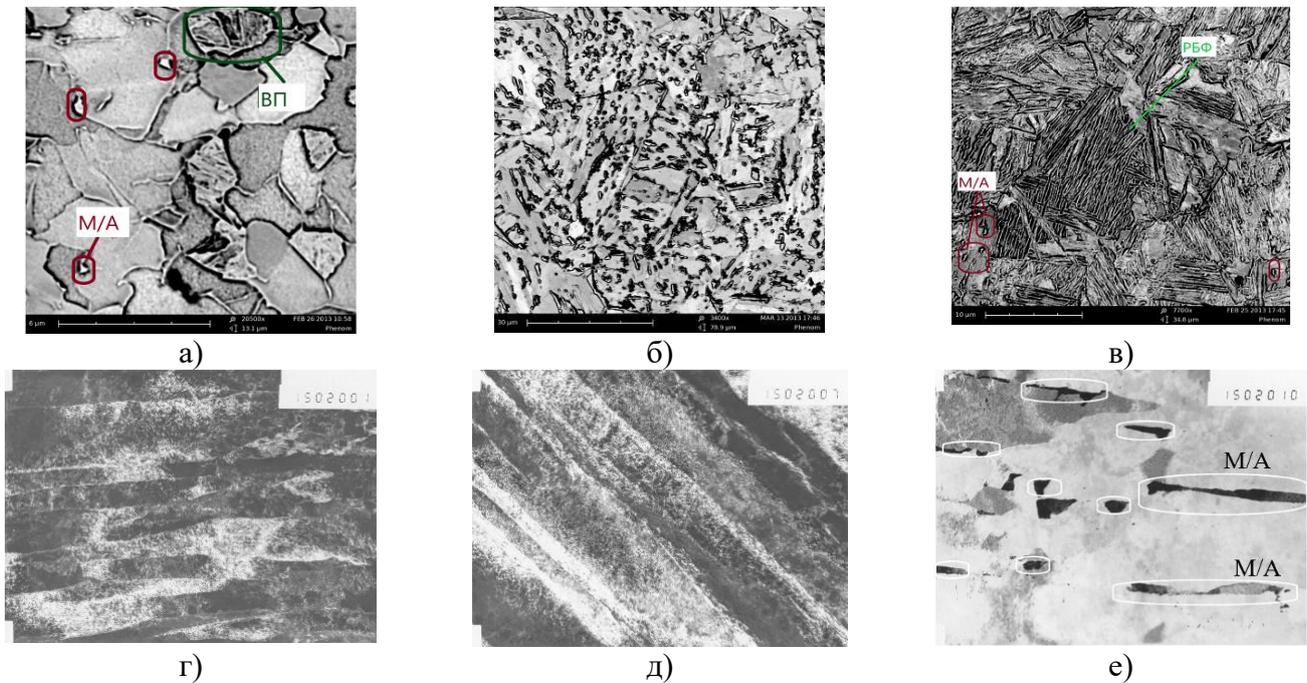


Рисунок 4. Микроструктура металла околошовного участка ЗТВ стали ПДС сформированная при скорости охлаждения (w_{8-5}) 2 °C/c (а), 20 °C/c (б), 40 °C/c (в) и 50 °C/c (г,д,е) (г – РБФ; д- малоуглеродистый мартенсит, д, - М/А фазы) (ВП – «вырожденный» перлит, РБФ – реечный бейнитный феррит, М/А – мартенситно-аустенитные фазы)

Бейнитное превращение так же является доминирующим, его морфология идентична структуре, сформированной при однократном нагреве. Следует отметить, что в обоих случаях в бейнитной составляющей структуры ОШУ ЗТВ наблюдается выделение мартенситно-аустенитных фаз (Рисунок 4, е). Область мартенситного превращения сдвигается в сторону быстрых скоростей охлаждения ($w_{8-5} = 35$ °C/c.) и его максимальное количество не превышает 30 % при $w_{8-5} 60$ °C/c. Значение твердости металла ОШУ ЗТВ при двукратном нагреве отличаются от соответствующих показателей при однократном нагреве во всем диапазоне скоростей охлаждения на 5- 10 %.

Одной из особенностей реакции стали ПДС на термический цикл сварки является её склонность к росту зерна аустенита, оказывающая влияние на сопротивление хрупкому разрушению.

Зависимость изменения условного диаметра зерна аустенита (d_y) исследуемых сталей ПДС от максимальной температуры нагрева в ЗТВ (Рисунок 5, а) показала, что интенсивный рост зерна аустенита начинается при нагреве выше температуры 1200 °C. При температуре нагрева характерной для ОШУ ЗТВ ($\approx 1300...1350$ °C) максимальный размер условного диаметра зерна аустенита достигает 105 мкм. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая сталь К60 ПДС-2 при сварке склонна к росту зерна аустенита, что может способствовать снижению ударной вязкости особенно металла ОШУ ЗТВ.

Анализ зависимости изменения KCV^{40} от размера зерна аустенита (Рисунок 5, б) показал, что значения ударной вязкости остаются стабильно высокими (более 300 Дж/см²) до тех пор, пока d_y не превышает 40 мкм. При $d_y = 40$ мкм значение $KCV^{40} = 305...317$ Дж/см².

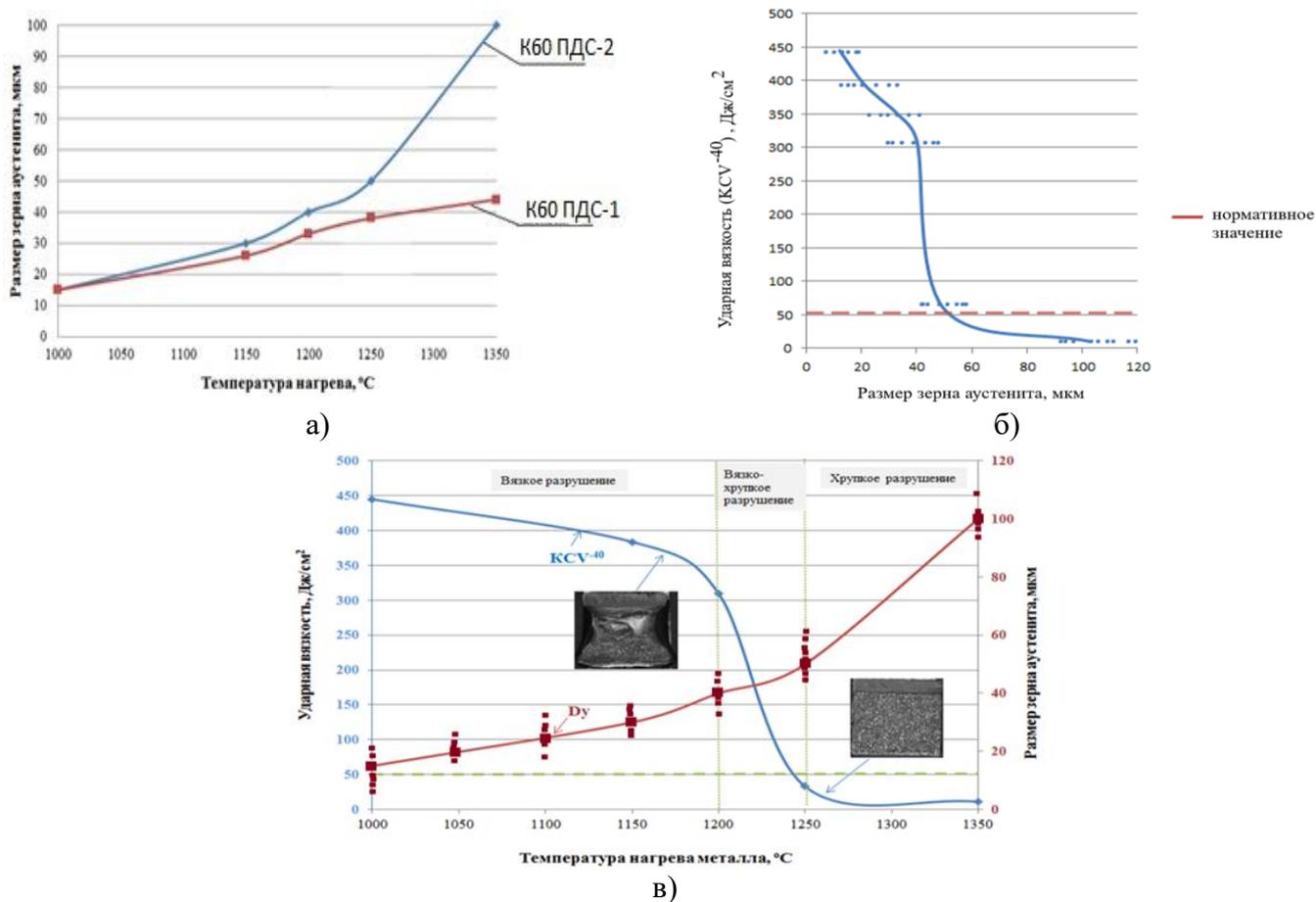


Рисунок 5. Кинетика роста зерна аустенита сталей ПДС от максимальной температуры нагрева (а) и ее взаимосвязь с ударной вязкостью (б, в)

Дальнейшее увеличение размера зерна аустенита способствует резкому снижению ударной вязкости. При $d_y = 50$ μm разброс ее значений довольно велик и составляет 25...195 $\text{Дж}/\text{см}^2$. У образцов со значениями KCV^{-40} менее нормативного уровня наблюдается смена микромеханизма разрушения с практически вязкого на хрупкий транскристаллитный. Зерно указанных размеров формируется в достаточно узком диапазоне максимальных температур нагрева 1200...1250 $^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 5, в). Для определения причины столь резкого снижения ударной вязкости даже при таком незначительном условном диаметре аустенитного зерна (около 50 μm) была изучена морфология структуры металла ОШУ ЗТВ. Результаты исследования морфологических особенностей структурно-фазового состава показали, что негативное влияние на ударную вязкость ОШУ ЗТВ оказывает наличие в структуре мартенситно-аустенитных фаз в количестве около 20 %, формирующихся преимущественно по границам глобулярного бейнитного феррита, и карбидов размером не более 0,3-0,5 μm .

Определен структурно-фазовый состав ОШУ ЗТВ, гарантированно обеспечивающий нормативный уровень ударной вязкости, состоящий преимущественно из реечного бейнитного феррита и мартенситной фазы в количестве не более 20 %. Содержание мартенситно-аустенитных составляющих не должно превышать 5-7 %.

Для решения проблемы обеспечения ударной вязкости сварку исследованной стали целесообразно проводить способами с меньшими тепловложениями.

Исследование особенностей структурообразования при сварке и их влияние на изменение прочностных характеристик металла ЗТВ показало, что низкой гомогенностью и устойчивостью к распаду обладает аустенит металла участка ЗТВ с максимальными температурами нагрева 850 – 950 °С. Распад аустенита происходит при высоких температурах с образованием мягких фаз и структур, что способствует снижению твердости этого участка относительно основного металла на 20 – 25% (Рисунок 6, а).

Исследование структурно-фазового состава (Рисунок 6, б) и его морфологии (Рисунок 7) показали, что при наличии разупрочнения в структуре металла рассматриваемого участка ЗТВ при $w_{8.5} \geq 3$ °С/с характерно формирование феррита (около 70 %) полигональной формы (Рисунок 6, б). Ферритно-карбидная смесь состоит из «вырожденного» перлита и глобулярного бейнитного феррита (Рисунки 6, б, 7, б). В структуре наблюдается выделение карбидных фаз (TiC, NbC) (Рисунок 7, д, е) овальной формы (от 2 – 8 нм и 30-100 нм).

Обеспечение равнопрочности рассматриваемого участка ЗТВ с основным металлом требует повышение скорости охлаждения ($w_{8.5} \geq 25$ °С/с (Рисунок 6, а). Структура, сформированная при скорости охлаждения ($w_{8.5} = 25$ °С/с), нивелирующая разупрочнение (Рисунок 6, б), состоит из квазиполигонального феррита (около 45%) средним диаметром зерна (d_{ϕ}) 3 – 4 мкм (Рисунок 7, а) и 55 % ферритно-карбидной смеси. Ферритно-карбидная смесь представлена преимущественно глобулярным бейнитным ферритом (Рисунок 7, б), характеризующийся ячеистой дислокационной структурой и наличием участков «вырожденного» перлита около 20 % размером порядка 5 мкм. Внутри и по границам глобулярного бейнитного феррита присутствуют обогащённые углеродом «островки» - М/А фазы (Рисунки 7, в, г), форма которых различна. Встречаются как равноосные, так и вытянутые с гладкими или угловатыми контурами (средним размером $\approx 1,2$ мкм), которые, наравне с бейнитной составляющей, упрочняют структуру. Значения твердости повышаются до уровня основного металла (205-210 HV₁₀).

На основе электронно-микроскопических исследований металла участка ЗТВ с максимальными температурами нагрева 850 °С - 950°С выявлено, что наличие в структуре более 50 % ферритной фазы, а также выделение специальных карбидных фаз (NbC, TiC, VC), которые выводят из твердого раствора значительное количество углерода и легирующих элементов, снижают прочностные свойства структуры.

Определен структурно-фазовый состав рассматриваемого участка ЗТВ, нивелирующий его разупрочнение. Установлено, что содержание квазиполигонального феррита не должно превышать 45-50 %, «вырожденного» перлита не более 20 % и около 25 – 30 % глобулярного бейнитного феррита с диспергированными в бейнитную матрицу М/А фазами в количестве не менее 10-12 %.

Таким образом, определен рациональный диапазон скоростей охлаждения ($w_{8.5}$), гарантирующий формирование указанного структурно-фазового состава. Установлено, что при сварке труб из сталей ПДС минимальные значения скоростей охлаждения ($w_{8.5}$), нивелирующие разупрочнение в ЗТВ, должны быть не менее 25 °С/с, верхняя граница $w_{8.5}$ с учетом обеспечения нормативных значений по ударной вязкости (KCV⁻⁴⁰) в ОШУ ЗТВ не должна превышать 50 °С/с.

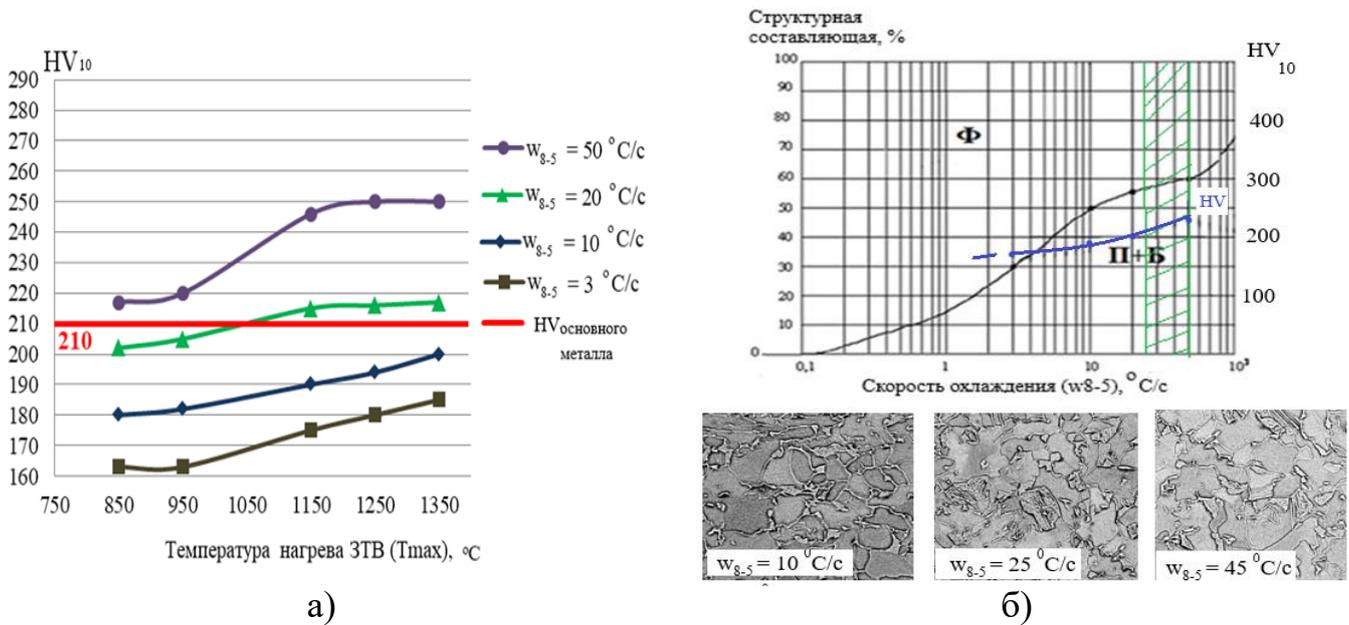


Рисунок 6. Зависимости изменения твердости от максимальной температуры нагрева (б, а) и структурная диаграмма (б, б) участка ЗТВ с максимальными температурами нагрева 850-950 °С

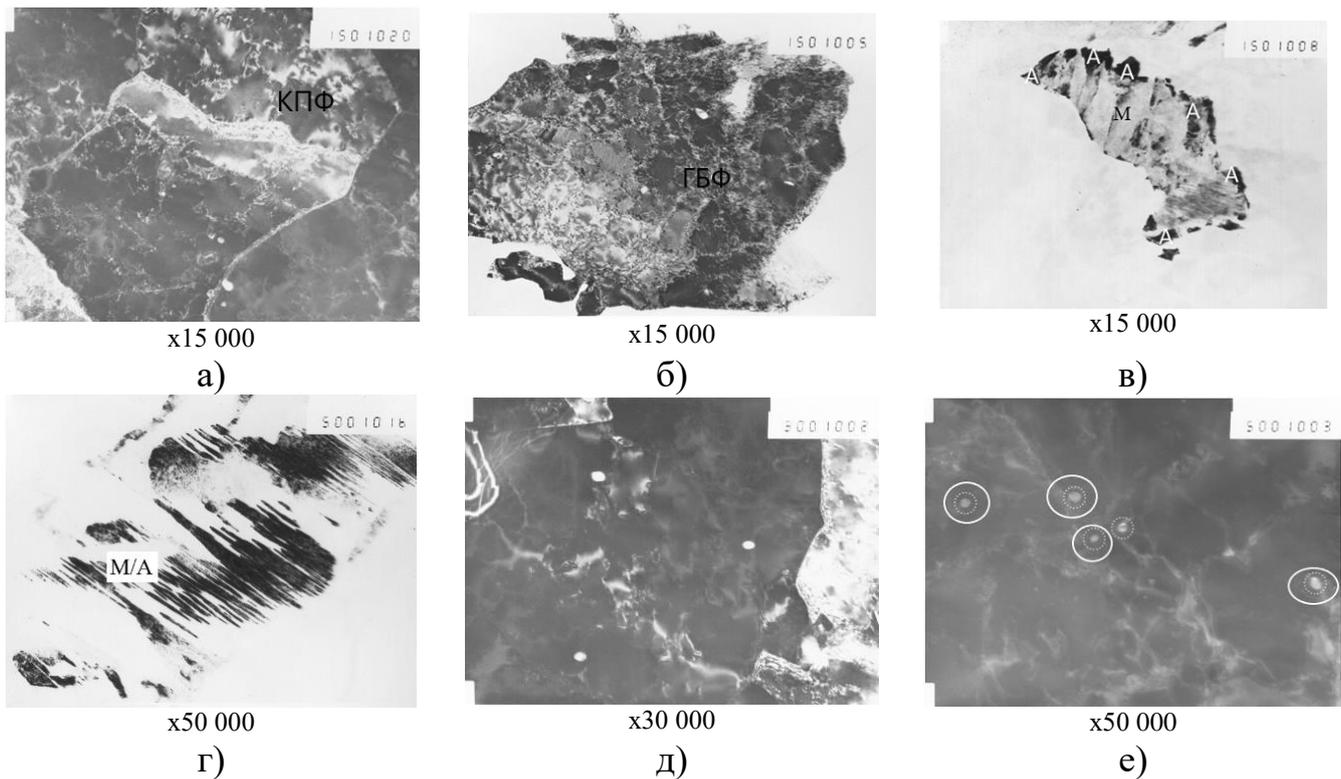


Рисунок 7. Морфология структурно-фазового состава участка ЗТВ с T_{max} 850-950 °С (ПЭМ): а – КПФ – квазипolygonальный феррит; б - ГБФ – глобулярный бейнитный феррит; в, г – выделение мартенситно-аустенитных фаз; д, е – выделение высокоуглеродистых карбидов

Так как одной из характеристик сталей ПДС является отношение σ_T/σ_B был выполнен расчет изменения этого показателя металла ОШУ ЗТВ в зависимости от скорости его охлаждения при сварке. Показано, что при верхней границе указанного диапазона скоростей охлаждения (50 °C/c), отношение σ_T/σ_B не превышает

нормативного требования ($\sigma_T/\sigma_B \leq 0,89$). Дальнейшее повышение скорости охлаждения до $60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ способствует увеличению этого показателя до значений $0,9$, что свидетельствует о целесообразности учета данного показателя также и для металла ЗТВ при выборе режимов сварки кольцевых сварных соединений из сталей ПДС.

Четвертая глава работы посвящена экспериментальному подтверждению реализации рекомендуемых скоростей охлаждения, обеспечивающих требуемую структуру и свойства ремонтных кольцевых стыковых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью.

На кольцевом сварном соединении, выполненном по технологии ручной дуговой сварки электродами с основным видом покрытия марки Boehler Fox EV Pipe ($\text{Ø } 3,2 \text{ мм}$) корневого слоя шва и марки Boehler Fox EV 65 ($\text{Ø } 3,2 \text{ мм}$) заполняющих и облицовочного слоев шва, труб $\text{Ø}1420 \times 25,8 \text{ мм}$ класса прочности К60 ПДС были подготовлены выборки в соответствии с Рисунками 8 и 9.

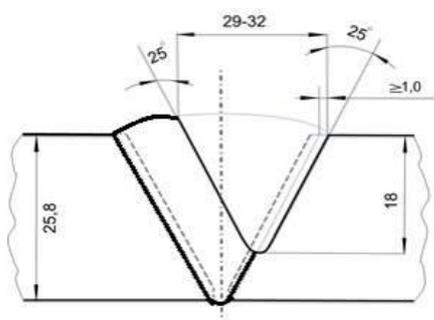


Рисунок 8. Выборка со смещением («узкая» выборка)

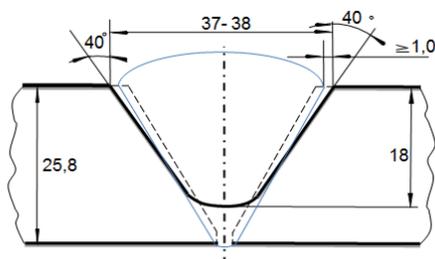


Рисунок 9. Выборка по центру («широкая» выборка)

Заварка выборок выполнялась с применением следующих технологий сварки:

- ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия (РД);
- механизированная сварка порошковой проволокой в среде защитных газов (МПИ);
- механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС).

Ремонт заваркой с применением технологий РД, МПИ и МПС выполнялся с предварительным подогревом до температуры $100-130 \text{ }^\circ\text{C}$. Межслойная температура перед выполнением каждого последующего прохода поддерживалась не выше $200 \text{ }^\circ\text{C}$. По окончании сварки, отремонтированные участки сварного соединения прошли неразрушающий контроль следующими методами: визуальный и измерительный, ультразвуковой, радиационный. По результатам неразрушающего контроля сварные соединения признаны годными и был выполнен комплекс металлографических исследований и механических испытаний.

Исследования микроструктуры и свойств сварных соединений показало их соответствие нормативным требованиям. В частности, при заварке выборок во всех случаях в металле швов и зоны термического влияния формируется преимущественно бейнитная структура. Содержание ферритной фазы, как правило, не превышает 10 %.

Механические свойства отремонтированных участков сварных соединений оценивались согласно ГОСТ 6996 на основании определения временного сопротивления разрыву при испытаниях на статическое растяжение, угла загиба при испытаниях на статический изгиб, ударной вязкости металла шва и линии сплавления при испытаниях на ударный изгиб на образцах Шарпи при температуре испытания минус 40 °С. измерению твердости металла шва и зоны термического влияния по Виккерсу согласно ГОСТ 2999.

Анализ полученных данных показал, что независимо от применяемой технологии сварки для ремонта сварных соединений все образцы разрушались по основному металлу. Значения временного сопротивления разрыву во всех случаях были выше нормативного уровня (Рисунок 10).

При испытаниях на статический изгиб угол изгиба образцов составил около 180°. На образцах, отремонтированных РД и МПС трещин, надрывов и других дефектов обнаружено не было. На образцах, отремонтированных МПИ в металле шва и по линии сплавления были обнаружены дефекты в виде трещин размером, не превышающим 3 мм.

Анализ результатов испытаний на ударный изгиб (Рисунок 11) показал, что максимальные значения ударной вязкости получены в сварных соединениях, отремонтированных методом РД. При этом в зависимости от применяемой технологии сварки значения KCV^{-40} металла шва составили от 75 до 180 Дж/см², по линии сплавления с основным металлом от 80 до 315 Дж/см².

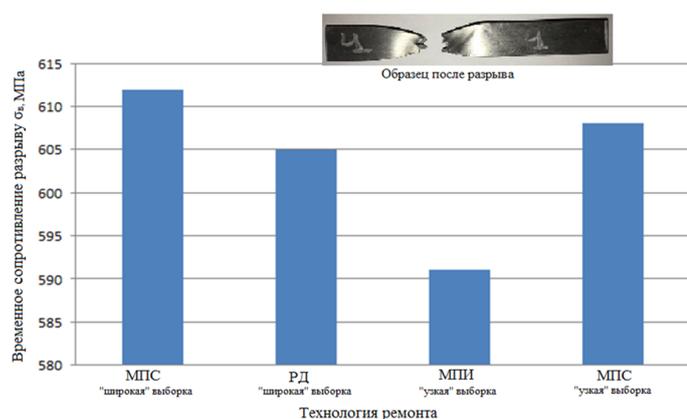


Рисунок 10. Результаты испытаний на статическое растяжение

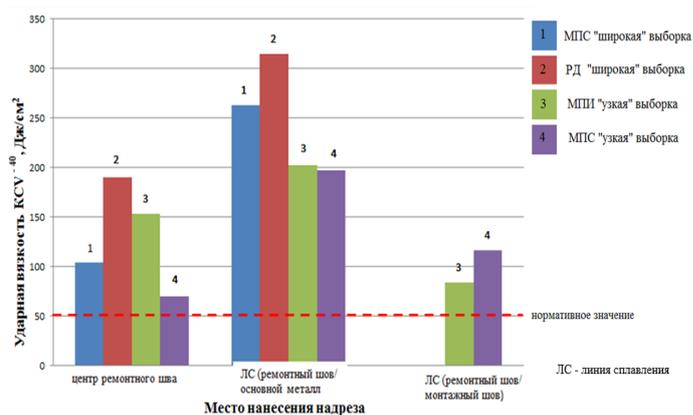


Рисунок 11. Результаты испытаний на ударный изгиб

Твердость металла, измеренная по оси ремонтных швов (Рисунок 12), выполненных по рассматриваемым технологиям, изменяется в следующих пределах. При использовании РД от 182 до 210 HV₁₀, при МПС от 190 до 225 HV₁₀, МПИ от 163 до 188 HV₁₀. Значения твердости металла зоны термического влияния (Рисунок 13) при всех рассматриваемых способах сварки (заварки) не превышают 225 HV₁₀ и остаются на уровне значений основного металла.

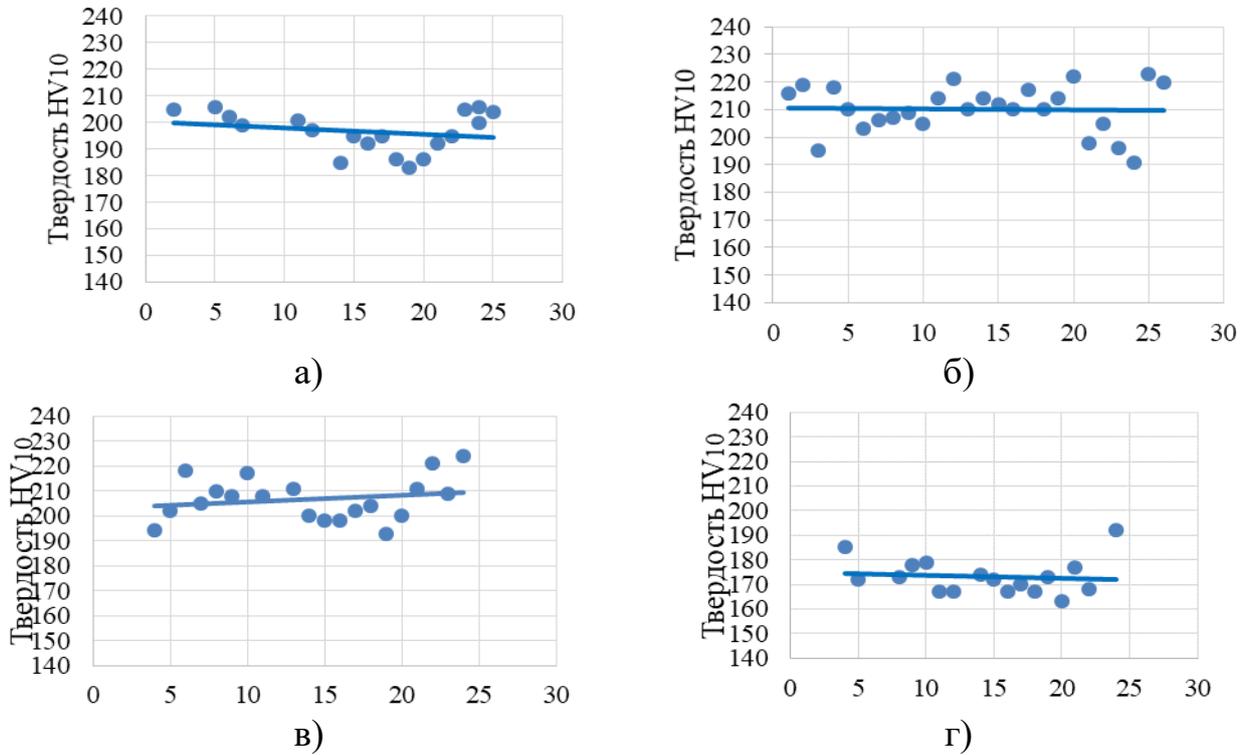


Рисунок 12. Распределение твердости в металле ремонтных швов в направлении от корневого к облицовочным слоям вдоль центральных осей: а – РД «широкая» выборка; б – МПС «широкая» выборка, в – МПС «узкая» выборка, г – МПИ «узкая» выборка

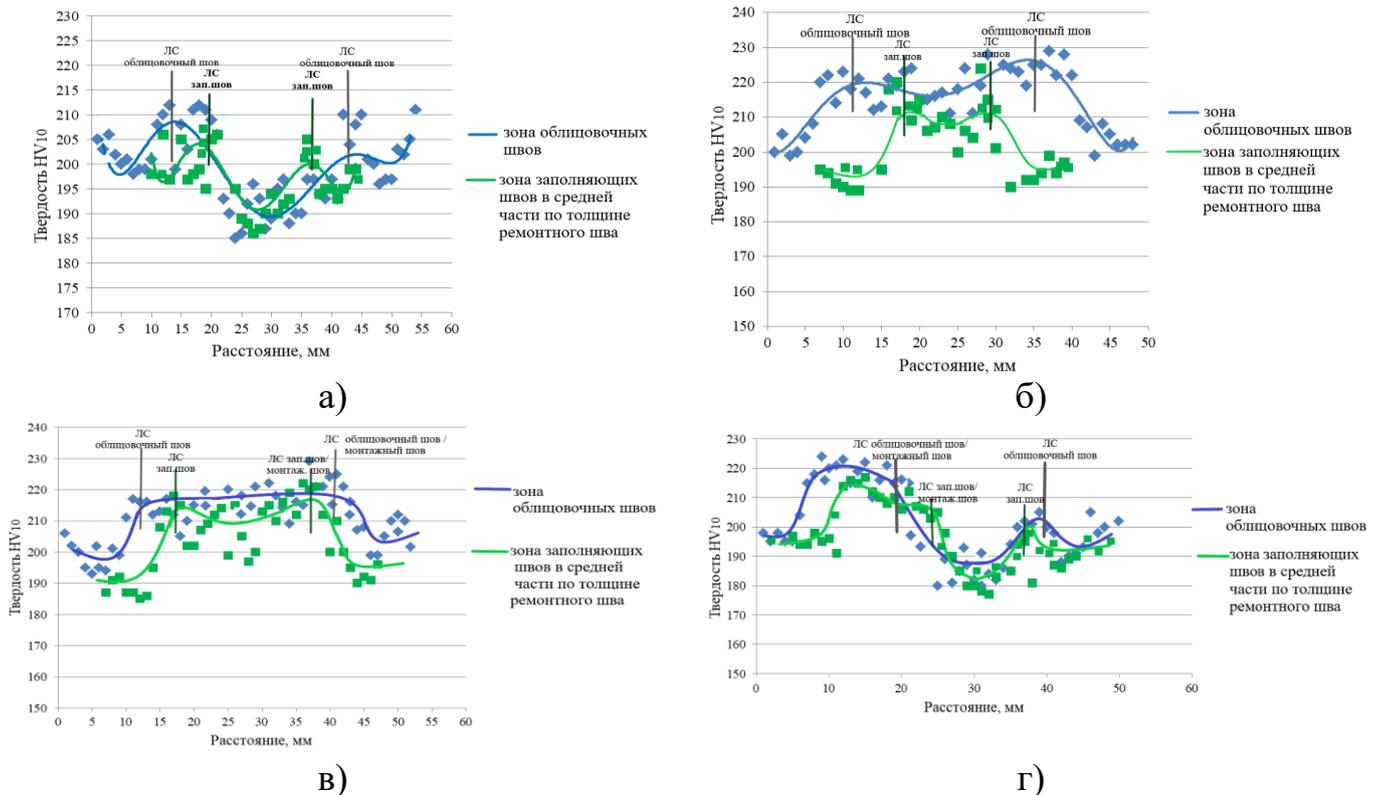


Рисунок 13. Распределение твердости металла вдоль зоны облицовочных и заполняющих слоев ремонтного шва: а – РД «широкая» выборка; б – МПС «широкая» выборка, в – МПС «узкая» выборка, г – МПИ «узкая» выборка

На основе проведенных металлографических исследований и механических испытаний подтверждена возможность формирования в ремонтных кольцевых

стыковых сварных соединениях структурно-фазового состава металла шва и ЗТВ, обеспечивающего требуемый комплекс механических характеристик.

Основные выводы и результаты работы:

1. Показано, что реакция сталей с повышенной деформационной способностью на термические циклы сварочных процессов, используемых при ремонте кольцевых стыковых сварных соединений, выражается в снижении сопротивления хрупкому разрушению металла околошовного участка, появлению разупрочнения (до 20 – 24%) на участке зоны термического влияния с максимальной температурой нагрева 850 – 950 °С и повышению отношения предела текучести к временному сопротивлению разрушения (σ_T/σ_B).

2. По результатам экспериментальных исследований выявлен диапазон возможных скоростей охлаждения (w_{8-5}) способов сварки (заварки), применяемых при ремонте сварных соединений магистральных газопроводов из высокопрочных сталей: ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия от 10 °С/с до 50 °С/с, механизированная сварка порошковой проволокой в среде защитных газов от 30 °С/с до 60 °С/с, механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой от 10 °С/с до 20 °С/с.

3. На основе изучения кинетики распада аустенита, роста зерна аустенита и их влияния на изменение свойств установлен структурно-фазовый состав металла зоны термического влияния, обеспечивающий нормативные требования к ремонтным сварным соединениям из высокопрочных сталей с повышенной деформационной способностью по сопротивлению хрупкому разрушению, обеспечению равнопрочности и запасу пластичности:

- на околошовном участке бейнитно-мартенситная структура реечной морфологии с содержанием мартенситной фазы не более 20 %. При этом размер условного диаметра зерна аустенита металла данного участка должен составлять не более 50 мкм.

- на участке возможного разупрочнения смесь квазиполигонального феррита (около 45 %), «вырожденного» перлита (не более 20 %) и глобулярного бейнитного феррита с диспергированными в бейнитную матрицу мартенситно-аустенитными фазами в количестве не менее 10 – 12 %.

4. Показана целесообразность при оценке реакции сталей с повышенной деформационной способностью на термический цикл сварки дополнительно учитывать отношение механических характеристик σ_T/σ_B металла зоны термического влияния сварных соединений.

5. Установлено, что при сварке (заварке) труб из сталей с повышенной деформационной способностью минимальные значения скоростей охлаждения (w_{8-5}), нивелирующие разупрочнение в ЗТВ, должны быть не менее 25 °С/с. Верхняя граница w_{8-5} с учетом обеспечения нормативных значений по ударной вязкости (KCV^{40}) и отношения σ_T/σ_B ($\leq 0,89$) в ОШУ ЗТВ может быть увеличена до 50 °С/с. Этот диапазон скоростей охлаждения может быть реализован при способах сварки, применяемых при сооружении и ремонте газопроводов из малоуглеродистых высокопрочных сталей с повышенной деформационной способностью.

6. Обоснована целесообразность использования для ремонта сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью следующих способов сварки: ручная дуговая сварка электродами с

основным видом покрытия (РД), механизированная сварка порошковой проволокой в защитных газах (МПИ), механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (МПС). Определены параметры режимов сварки, обеспечивающие требуемый структурно-фазовый состав и свойства ремонтных сварных соединений.

7. Показано, что отличительной особенностью технологий ремонта сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью в сравнении с технологиями ремонта сварных соединений из традиционных сталей является необходимость выполнения ряда технологических мероприятий, направленных на снижение тепловложения при сварке (заварке), а именно:

- скорость сварки должна быть максимально возможной с учетом обеспечения стабильности сварочного процесса;

- значения силы тока и напряжения должны назначаться по нижней границе диапазонов параметров с учетом обеспечения необходимого проплавления и геометрических параметров шва;

- межслойная температура не должна превышать 200 °С.

8. Экспериментально подтверждена возможность обеспечения требуемой структуры и свойств ремонтных сварных соединений при квалификационных испытаниях технологий ремонта кольцевых сварных соединений.

9. Результаты выполненной работы использованы при создании Р Газпром 2-2.3-1204-2020 «Технологии ремонта кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости».

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Оценка свариваемости сталей с повышенной деформационной способностью как средство обоснования ремонтных технологий / Рамусь Р.О. [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. 2020. №4 (84). С. 75 – 84 (0,58 п.л./ 0,1 п.л.).

2. Исследование влияния склонности к росту зерна аустенита на ударную вязкость ЗТВ сварных соединений малоуглеродистых низколегированных сталей / Рамусь Р.О. [и др.] // Металлург. 2020. №4. С. 62 – 65 (0,23 п.л./ 0,06 п.л.).

3. Расчетно-экспериментальный анализ параметров термических циклов способов ремонта кольцевых стыков газопроводов / Рамусь Р.О. [и др.] // Сварочное производство. 2019. №11. С.9 – 14 (0,35 п.л./ 0,06 п.л.).

4. Оценка структуры и свойств ремонтных сварных соединений газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости / Рамусь Р.О. [и др.] // Сварочное производство. 2019. №12. С. 40 – 46 (0,4 п.л./ 0,06 п.л.).

5. Регулирование процессов разупрочнения зоны термического влияния при сварке высокопрочных сталей / Рамусь Р.О. [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. №7 (733). С. 55 – 60 (0,35 п.л./0,09 п.л.).