

На правах рукописи

Мурашов Никита Андреевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛЕЙ
КЛАССОВ ПРОЧНОСТИ К70 И К80 НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ИХ
СВАРИВАЕМОСТИ**

Специальность – 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
ОЛЬШАНСКАЯ Татьяна Васильевна
ФГАОУ ВО «ПНИПУ», профессор

кандидат технических наук, доцент
ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валериевич
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», доцент

Ведущая организация: **Донской государственный технический университет**

Защита состоится «25» декабря 2025 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-66-33, доб 4057

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 <https://bmstu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н



А.С. Панкратов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Концепция строительства магистральных газопроводов (МГ) высокого давления вплоть до 14,7 МПа из труб класса прочности К70 и К80 имеет особую привлекательность для России с учетом специфики расположения регионов добычи газа и экстремальности природно-климатических условий этих территорий.

Преимущества сооружения таких МГ обеспечивает следующие потенциальные возможности: снижения капитальных и операционных расходов построенных газопроводов, в т.ч. за счет возможности оптимизации шага расстановки (уменьшения количества) компрессорных станций и повышения их производительности за счет транспортировки газа при более высоком рабочем давлении.

На данный момент имеется отечественный опыт строительства МГ «Бованенково – Ухта» из сталей класса прочности К65. При этом, применялось значительное количество сварочных технологий, отличающихся друг от друга уровнем тепловложения в свариваемый металл и параметрами термических циклов сварки. Возможность распространения его на сооружение газопроводов из сталей более высокого класса прочности, таких как К70 и К80, во многом будет определяться особенностями их свариваемости в условиях сварочных процессов, предполагаемых к применению при строительстве МГ, что свидетельствует об актуальности темы данной работы.

Цель работы: обоснование режимов сварочных процессов, перспективных к применению при строительстве магистральных газопроводов, гарантировано обеспечивающих комплекс заданных свойств сварных соединений (СС) из сталей классов прочности К70 и К80.

Задачи работы:

1. Выполнить анализ сварочных технологий, предполагаемых к применению при строительстве МГ высокого давления, и расчет их термических циклов для определения диапазонов значений скоростей охлаждения, реализация которых при исследовании позволит оценить свариваемость исследуемых сталей.

2. Оценить реакцию исследуемых сталей на термические циклы сварки на основе изучения особенностей: кинетики распада аустенита, склонности к росту зерна, структурно-фазовых изменений металла СС.

3. Оценить воздействие процессов структурообразования на изменение механических характеристик СС и определить диапазоны скоростей охлаждения, обеспечивающие их значения на уровне нормативных требований.

4. Разработать рекомендации по выбору параметров сварочных процессов, предполагаемых к использованию при строительстве МГ из труб классов прочности К70 и К80, позволяющих обеспечить равнопрочность СС и их высокое сопротивление хрупкому разрушению.

Методы исследований. Работа выполнена на основе анализа и обобщения литературных данных, лабораторных исследований и аналитических расчетов.

В работе использованы: дилатометрический 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 и микротвердости; определение механических свойств в условиях статического и динамического нагружения; методы математического моделирования сварочных процессов; экспериментальные методики записи термических циклов сварки.

Научная новизна:

1. Показано, что за счет повышенной устойчивости аустенита металла ЗТВ СС исследуемых сталей к распаду, рациональный диапазон скоростей охлаждения ($W_{8.5}$) при многослойных способах сварки, обеспечивающих комплекс механических свойств на уровне не ниже нормативного, составляет: $W_{8.5} = 30\text{--}60$ °С/с для стали класса прочности К70, $W_{8.5} = 25\text{--}40$ °С/с для стали класса прочности К80.

Определен структурно-фазовый состав, формирующийся в указанных диапазонах скоростей охлаждения.

Для стали класса прочности К70:

– металл ОШУ ЗТВ должен содержать при $W_{8.5} = 30$ °С/с примерно 80% смеси гранулярного (10 %) и речного (70 %) бейнита и не более 20 % мартенситной фазы; при $W_{8.5} = 60$ °С/с не более 50 % мартенситной фазы, остальное речный бейнит;

– металл участка неполной перекристаллизации ЗТВ должен содержать при $W_{8.5} = 30$ °С/с около 15 % квазиполигонального феррита и 85 % гранулярного бейнита; при $W_{8.5} = 60$ °С/с практически полностью бейнитную структуру гранулярной морфологии.

Для стали класса прочности К80:

– металл ОШУ ЗТВ должен содержать при $W_{8.5} = 25$ °С/с не более 20 % мартенситной фазы, 80% смеси гранулярного (10 %) и речного (70 %) бейнита; при $W_{8.5} = 40$ °С/с не более 50-55 % мартенсита, остальное речный бейнит;

– металл участка неполной перекристаллизации ЗТВ должен состоять полностью из гранулярного бейнита.

2. Показано, что повышение значений ударной вязкости объясняется увеличением в структуре металла ОШУ ЗТВ бейнита речной морфологии, суммарная протяженность высокоугловых границ пакетов которого, определяющая затраты энергии на разрушение, больше, чем суммарная протяженность границ блоков бейнита гранулярной морфологии.

3. Определены условия обеспечения рациональных диапазонов скоростей охлаждения при многослойной сварке за счет регулирования технологических параметров сварочных процессов, предполагаемых к использованию при строительстве МГ из сталей класса прочности К70 и К80.

Установлены зависимости изменения скоростей охлаждения металла ОШУ ЗТВ кольцевых соединений труб высокого давления, позволяющие выбирать значения режимов сварочного процесса с учетом особенностей используемого сварочного оборудования (от конкретных производителей), типоразмеров

сварочных материалов, наличия ограничений по проведению предварительного/межслойного подогревов свариваемых кромок.

Практическая значимость работы. Разработана методика по определению условий реализации рекомендуемых скоростей охлаждения от погонной энергии сварки кольцевых стыков трубопроводов высокого давления при следующих способах сварки: РД, МПИ и ААДП. Эта методика использована при разработке нормативного документа (СТО Газпром 15-2.1-014), регламентирующего технологии сварки при строительстве трубопроводов из труб класса прочности К70.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчета диапазона значений скоростей охлаждения металла СС, позволяющего оценить реакцию сталей классов прочности К70 и К80 на термический цикл сварки.

2. Результаты исследования особенностей кинетики распада аустенита, склонности к росту зерна, структурно-фазовых изменений металла СС и их влияния на показатели твердости и сопротивления хрупкому разрушению.

3. Установленные, с точки зрения обеспечения требуемых механических свойств, рациональные диапазоны скоростей охлаждения металла СС сталей классов прочности К70 и К80. Структурно-фазовый состав, формирующийся в рекомендуемых диапазонах скоростей охлаждения.

4. Рекомендации по выбору режимов сварки МГ из сталей классов прочности К70 и К80, позволяющие реализовать диапазоны скоростей охлаждения СС, в которых формируется структурно-фазовый состав металла шва и ЗТВ, обеспечивающий нормативные требования по твердости, ударной вязкости и отсутствию холодных трещин.

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

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на российских и международных научно-технических конференциях и форумах: 73-я, 74-я, 77-я, 78-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ», г. Москва, 2019-2020 гг., 2023-2024 гг.; VIII Региональная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию профессора Ю.П. Желтова, г. Москва, 2024 г.; XII отраслевое совещание «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром» (СВАРКА-2024), г. Москва, 2024 г.

Личный вклад автора состоит в обосновании задач и методов исследования с учетом опыта предыдущих работ в этой области, непосредственном выполнении экспериментальной части работы, аналитических расчетов, разработке практических рекомендаций для использования результатов в промышленности.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, из них 5 работ в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 3 работы в журналах из перечня Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 106 наименований. Работа изложена на 161 странице, содержит 21 таблицу, 71 рисунок.

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 химического состава и механических свойств металла труб класса прочности К70 и К80. Приведены нормативные требования к механическим свойствам основного металла и продольным сварным соединениям труб. Показаны особенности структурно-фазового состава высокопрочных трубных сталей класса прочности К70 и К80. Представлены результаты оценки исходных характеристик исследуемых сталей.

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

Вторая глава работы посвящена анализу технологий сварки, предполагаемых к применению при строительстве МГ из сталей классов прочности К70 и К80.

Анализ нормативной документации ПАО «Газпром», регламентирующей технологии сварки трубопроводов, позволил выделить рекомендуемые, на текущий момент, основные параметры режимов сварки кольцевых стыковых соединений из труб класса прочности по К65 включительно.

Использование расчетных схем, базирующихся на классической теории распространения теплоты при сварке Н.Н. Рыкалина, позволило выявить взаимосвязь между режимами сварочных процессов и температурно-временными параметрами термических циклов сварки (ТЦС) в различных зонах СС.

Оценено влияние выбора модели источника теплоты на параметры ТЦС. При использовании быстродвижущегося источника фиксируется более интенсивное приращение температуры и, как следствие, меньшая длительность пребывания металла рассматриваемого участка зоны термического влияния (ЗТВ) выше температуры начала интенсивного роста зерна аустенита. На параметры ветви охлаждения ТЦС влияние модели источника теплоты незначительно. Значения наиболее важного параметра ТЦС (скорости охлаждения металла в интервале диффузионного распада аустенита - $W_{8.5}$) практически не меняются.

В связи с тем, что рекомендуемые нормативной документацией дуговые способы сварки трубопроводов относятся к многослойным, металл шва и околошовного участка (ОШУ) ЗТВ претерпевает многократный нагрев и охлаждение. Показано, что металл ОШУ ЗТВ претерпевает повторный нагрев в диапазоне температур 850–1050 °С при выполнении последующего слоя шва.

Приведены результаты расчета возможных значений $W_{8.5}$ в ОШУ ЗТВ с учетом повторного нагрева для сварочных процессов: от 18,8 до 83,9 °С/с (при РД), от 16,3 до 51,2 °С/с (при МПИ), от 11,6 до 89,7 °С/с (при АПИ), от 21,0 до 87,8 °С/с (при ААДП), от 14,7 до 33,2 °С/с (при АФ).

Полученные диапазоны значений $W_{8.5}$ металла были использованы для оценки реакции стали классов прочности К70 и К80 на термический цикл сварки.

Третья глава посвящена исследованию особенностей структуро-образования рассматриваемых сталей на основе изучения их реакции на ТЦС следующих участков сварного соединения: металла шва; ОШУ, опасного с позиции формирования закалочных структур и снижения сопротивления хрупкому разрушению; возможного разупрочнения.

Анализ термокинетических и структурных диаграмм распада аустенита металла ОШУ ЗТВ при однократном и повторном нагревах (Рисунок 1) сталей показал, что во всех рассматриваемых случаях доминирующей структурой является бейнит различной морфологии.

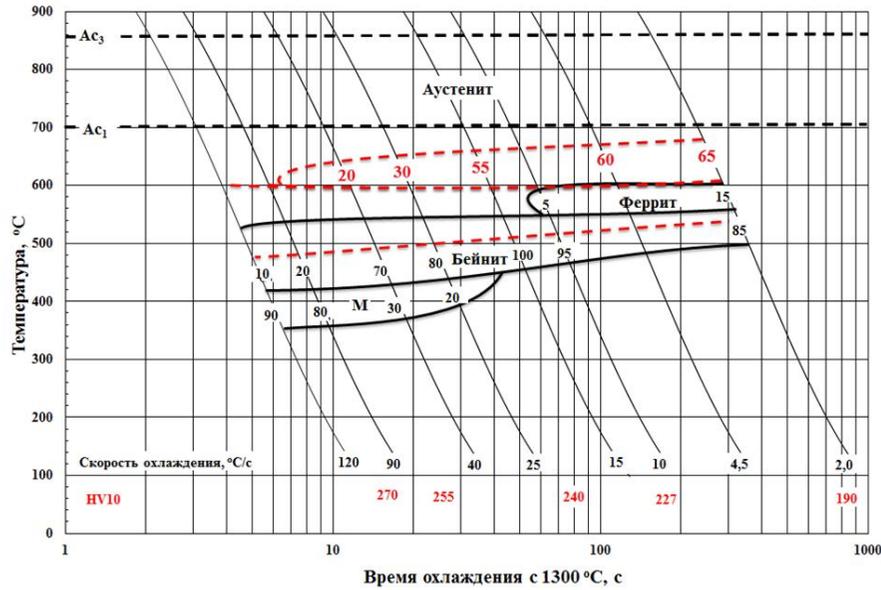
При однократном нагреве, аустенит стали К70, в диапазоне $W_{8.5}$ от 2 °C/c до 10 °C/c, распадается с выделением структурно-свободного феррита и преимущественно гранулярного бейнита (Рисунок 1, а, в). В интервале $W_{8.5}$ от 15 °C/c до 120 °C/c наблюдается образование мартенситной фазы и увеличение доли реечного бейнита (Рисунок 1, а, в). В отличие от К70, у стали К80 распад аустенита в ферритной области отсутствует (Рисунок 1, б). Бейнитная и мартенситная области характеризуются более низкими температурными интервалами образования, что способствует увеличению доли реечного бейнита при сопоставимых скоростях охлаждения (Рисунок 1, б, г).

Повторный нагрев металла ОШУ ЗТВ как той, так и другой стали вызывает формирование менее гомогенного аустенита. Это приводит к снижению его устойчивости к распаду и расширению области ферритного превращения в стали К70 (Рисунок 1, а) и фиксации ферритной фазы в структуре К80 при малых скоростях охлаждения (Рисунок 1, б). Мартенситное превращение смещается в сторону более высоких скоростей охлаждения и более высоких температур (Рисунок 1, б). Меняется морфология бейнитной структуры с реечной на гранулярную (Рисунок 1, г).

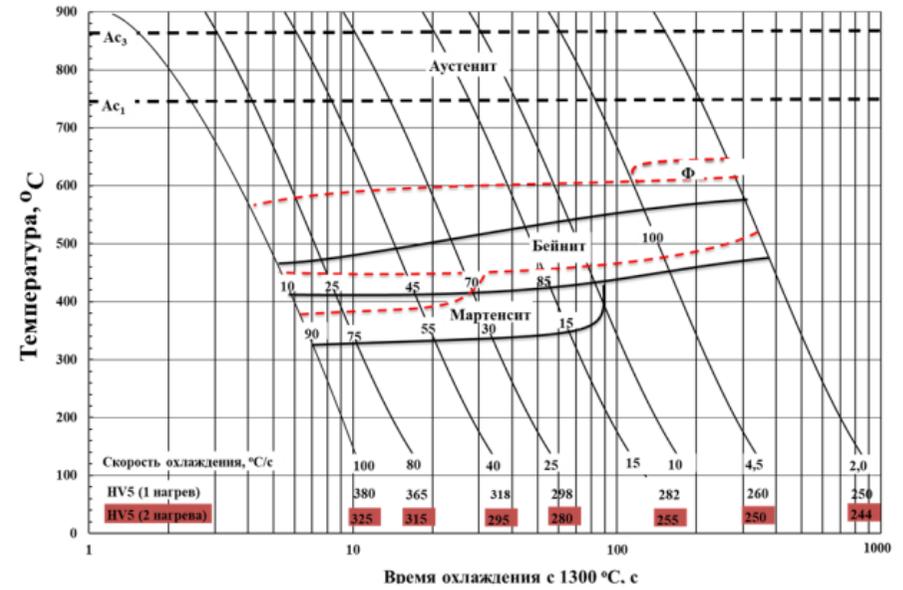
Следует отметить, что в структуре обеих сталей при однократном и повторном нагревах наблюдается незначительное выделение мартенситно-аустенитных фаз (М/А фаз), повышающих прочностные характеристики бейнита.

Таким образом, исследование особенностей кинетики распада аустенита металла ОШУ ЗТВ стали К80 показало, что, в отличии от стали К70, они заключаются в большей устойчивости аустенита к распаду, значительному ограничению ферритного превращения, расширению области образования мартенситной фазы и М/А-составляющей. Это свидетельствует о большей склонности стали класса прочности К80 к формированию закалочных структур.

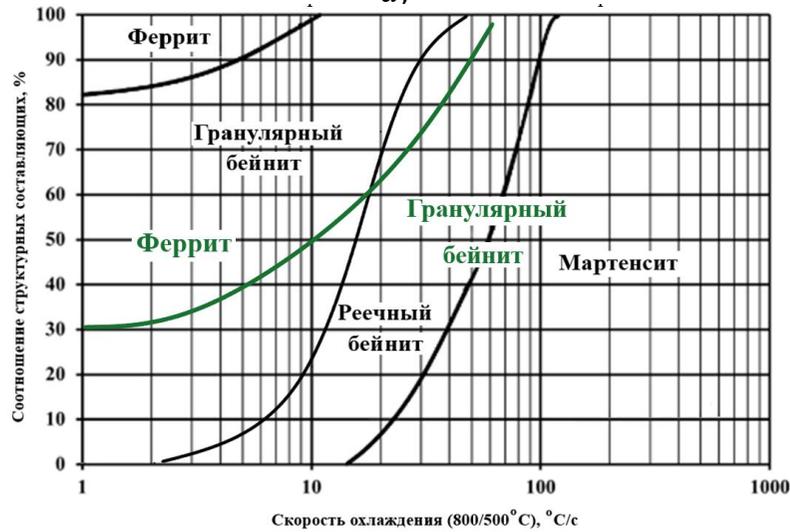
Оценка кинетики распада аустенита металла шва, на примере стали К80, (Рисунок 2), выполненного рекомендованным сварочным материалом (BÖHLER FOX EV 85) показала, что аустенит наплавленного металла в силу более высокой легированности ($CE_{IIW}=0,71$ %) более устойчив к распаду (Рисунок 2, а) по сравнению с аустенитом ОШУ ЗТВ (Рисунок 1, б) ($CE_{IIW}=0,53$ %), что выражается в увеличении объема закалочных структур при сопоставимых скоростях охлаждения и, как следствие, в повышении твердости металла (особенно облицовочных слоев) вплоть до критических значений (320 HV₁₀) (Рисунок 2, б).



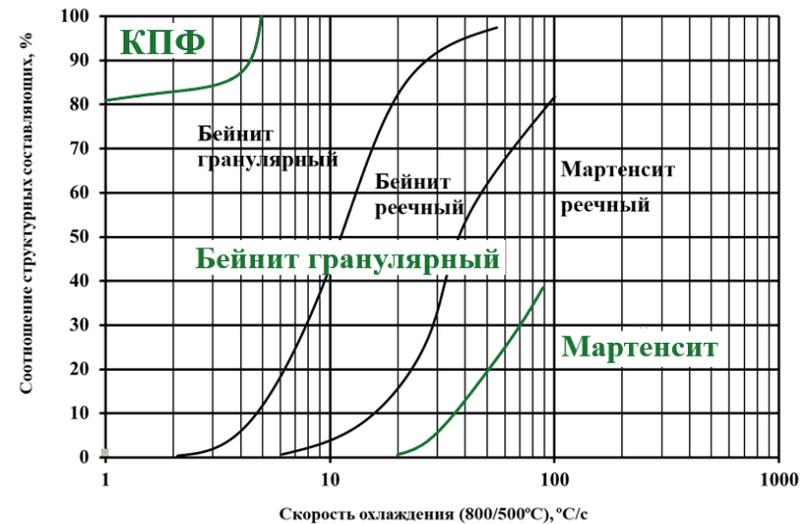
— однократный нагрев ($T_{max} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$)
а)



--- повторный нагрев ($T_{max} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$)
б)

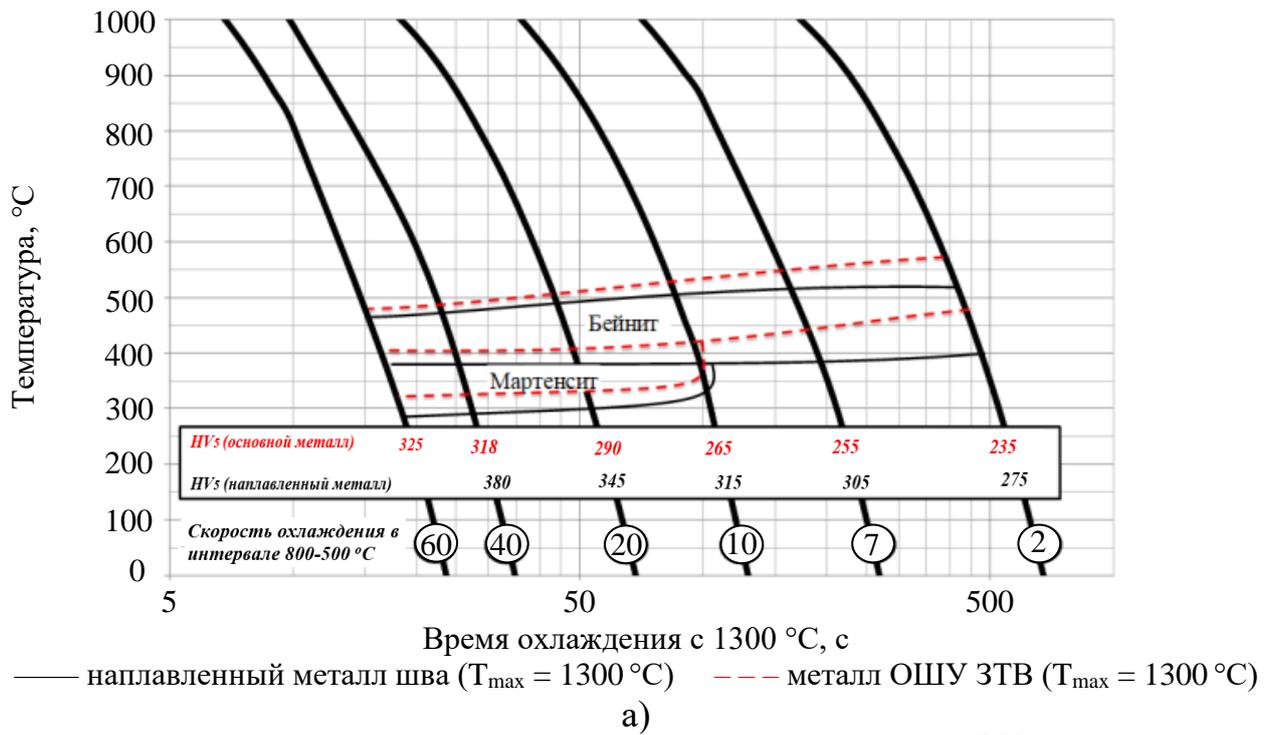


— однократный нагрев ($T_{max} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$)
в)

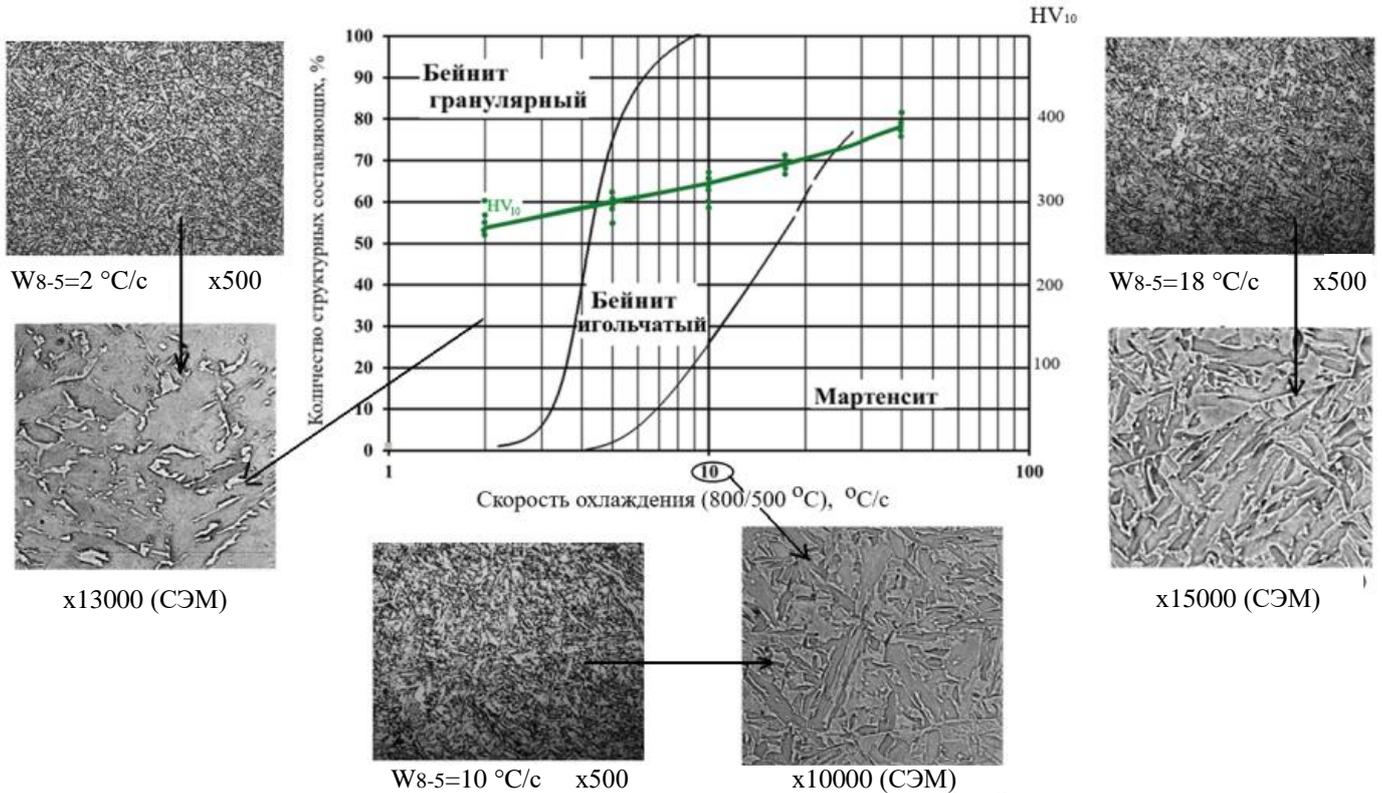


— повторный нагрев ($T_{max} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$)
г)

Рисунок 1 – Термокинетические диаграммы распада аустенита (а, б) и структурные диаграммы (в, г) металла ОШУ ЗТВ сталей класса прочности К70 (а, в) и К80 (б, г)



а)



б)

Рисунок 2 – Термокинетическая (а) и структурная (б) диаграммы распада аустенита наплавленного металла шва стали класса прочности К80

Так как исследуемые стали получены методом контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, воздействие сварочного процесса может отразиться на изменении прочностных характеристик не только участка ОШУ ЗТВ, но и участков с более низкой температурой максимального нагрева.

Реакция исследуемых сталей на ТЦС изучалась по построению зависимостей изменения твердости от максимальной температуры нагрева и скоростей охлаждения. Установлено, что у обеих сталей наибольшему разупрочнению подвергается участок ЗТВ, нагреваемый в диапазоне температур 850–950 °С (Рисунок 3). Для стали К70 снижение твердости на этом участке относительно показателя основного металла составляет 25 %, 20 %, 3 % при W_{8-5} 2 °С/с, 10 °С/с, 30 °С/с соответственно. Для стали К80 минимальное значение твердости на этом участке составляет 230 HV_{10} , что соответствует 15 % разупрочнению металла. С повышением W_{8-5} , твердость металла данного участка возрастает практически до соответствующих показателей основного металла ($\approx 270 HV_{10}$) при $W_{8-5} = 30 °С/с$.

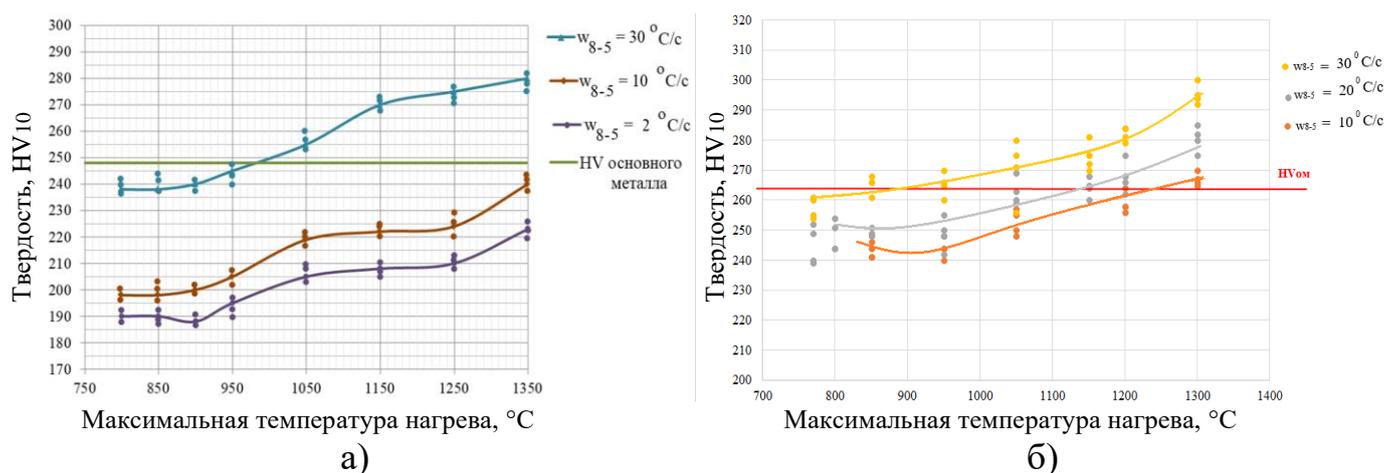


Рисунок 3 – Зависимость изменения твердости от максимальной температуры нагрева: а) – сталь К70; б) – сталь К80

Во всем исследованном диапазоне W_{8-5} основная структура участка неполной перекристаллизации ЗТВ сталей К70 и К80 представлена бейнитом гранулярной морфологии, упрочненным М/А-составляющей (Рисунок 4, а, б). Внутреннее строение М/А-составляющей блочное, содержащее высокодислокационный, частично двойникованный мартенсит и аустенит, располагающийся преимущественно по периферии блоков бейнита (Рисунок 4, в, г).

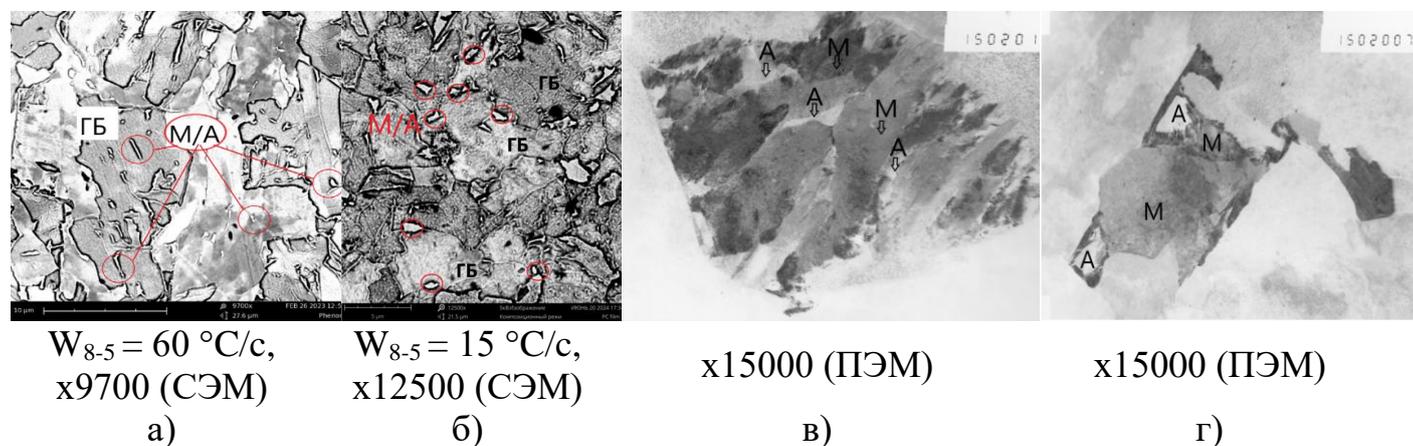


Рисунок 4 – Микроструктура участка неполной перекристаллизации ЗТВ: а) – сталь К70; б), в), г) – сталь К80 (ГБ - гранулярный бейнит, М/А - М/А составляющая, М - мартенсит, А - остаточный аустенит)

Таким образом, показанные особенности структурно-фазовых превращений в отдельных участках СС необходимо учитывать при выборе параметров ТЦС, обеспечивающих комплекс механических характеристик на уровне не ниже нормативных требований.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ТЦС на изменение твердости и ударной вязкости металла сварных соединений.

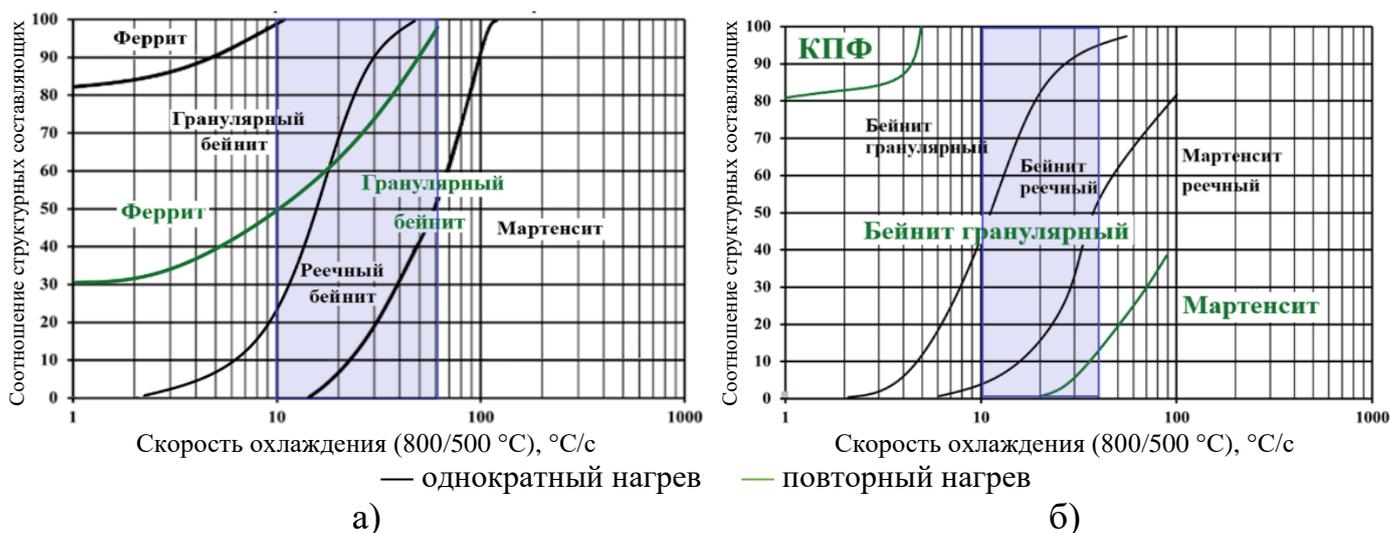
С позиции обеспечения равнопрочности сварных соединений выбор возможного диапазона $W_{8.5}$ металла ЗТВ проводился с учетом того, что его нижняя граница не должна допустить разупрочнения металла, а верхняя – превышения твердости выше нормативного значения ($320 HV_{10}$).

Анализ зависимостей изменения твердости от $W_{8.5}$ различных участков сварного соединения показал, что в случае однократного нагрева металла ОШУ ЗТВ данные условия обеспечиваются при $W_{8.5}$ от 10 до 60 °C/c для стали К70 (Рисунок 5, в) и от 10 до 40 °C/c для стали К80 (Рисунок 5, г). При повторном нагреве металла ОШУ ЗТВ данные условия обеспечиваются при $W_{8.5}$ от 30 до 60 °C/c для стали К70 (Рисунок 5, в) и от 10 до 70 °C/c (Рисунок 5, г) для стали К80.

В то же время нормативный уровень значений твердости в металле участка неполной перекристаллизации ЗТВ для стали К70 обеспечивается при $W_{8.5}$ от 30 до 60 °C/c (Рисунок 5, ж), для стали К80 $W_{8.5}$ от 25 до 40 °C/c (повысилась нижняя граница интервала $W_{8.5}$, установленного ранее для ОШУ ЗТВ, с 10 °C/c до 25 °C/c) (Рисунок 5, з).

Таким образом, указанные диапазоны скоростей охлаждения могут быть выбраны в качестве рациональных с позиции обеспечения требуемого уровня твердости металла обоих участков ЗТВ.

Вторым важным показателем механических свойств сварных соединений является их сопротивление хрупкому разрушению. Среди значимых факторов, оказывающих влияние на сопротивление сварных соединений хрупкому разрушению, выделяются: размер зерна аустенита (действительный диаметр - d_y), структурно-фазовый состав и дисперсность элементов структуры.



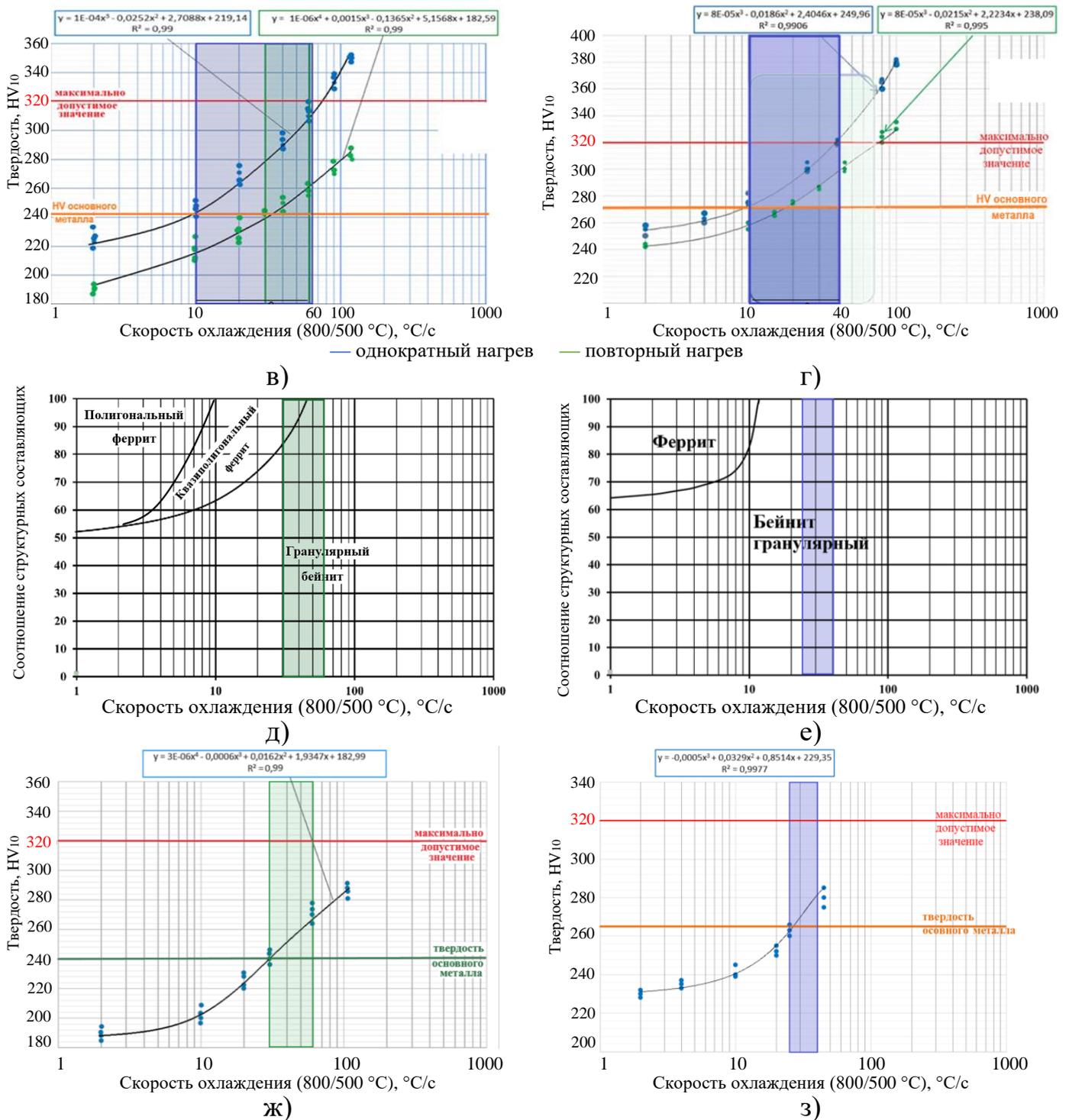


Рисунок 5 – Структурные диаграммы (а, б, д, е) и зависимости изменения твердости (в, г, ж, з) металла участков ЗТВ: а), в) - ОШУ ЗТВ стали К70; б), г) - ОШУ ЗТВ стали К80; д), ж) - участок неполной перекристаллизации ЗТВ стали К70; е), з) - участок неполной перекристаллизации ЗТВ стали К80

Анализ кривых кинетики роста зерен аустенита от максимальной температуры нагрева показывает, что конечный действительный диаметр зерна аустенита не превышает 50 мкм (Рисунок б), т.е. обе стали обладают низкой склонностью к росту зерна, а значения ударной вязкости, в данном случае, в значительной степени определяются структурно-фазовым составом и дисперсностью элементов структуры.

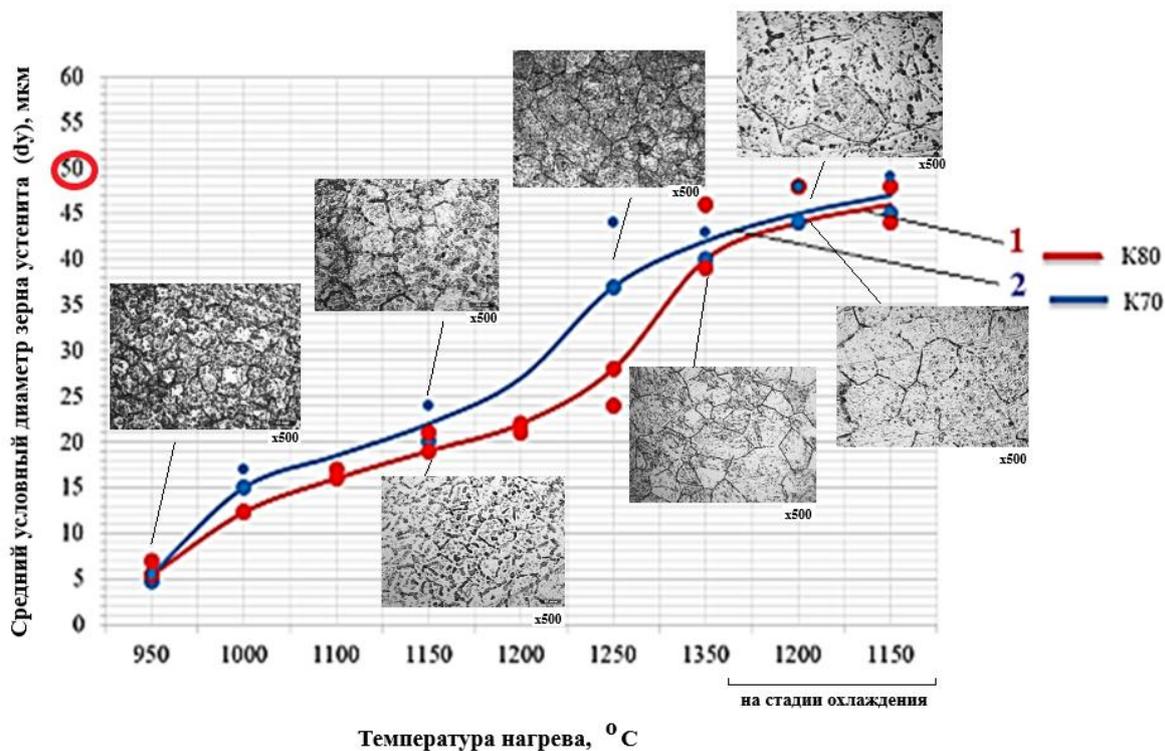


Рисунок 6 – Кинетика роста зерна аустенита в ОШУ ЗТВ сталей К80 (кривая 1) и К70 (кривая 2)

Анализ кривых изменения ударной вязкости ОШУ ЗТВ исследованных сталей (Рисунок 7) показал, что в диапазоне $W_{8.5}$, обеспечивающих требуемый уровень прочностных характеристик (≥ 70 Дж/см²), значения KCV^{40} значительно превышают нормативный уровень и достигают максимальных, порядка 330–370 Дж/см², при полностью вязком ямочном (Я) микромеханизме разрушения. Это обеспечивается за счет формирования преимущественно речного бейнита и содержания мартенситной фазы не более 20 %. При этом $W_{8.5}$ в обоих случаях 25–30 °С/с.

Последующее увеличение $W_{8.5}$ до верхней границы интервала 60 °С/с и 40 °С/с для стали К70 и К80 соответственно, вызывает снижение значений ударной вязкости за счет формирования до 50–60 % мартенситной фазы. При этом в изломе ударных образцов, появляются участки квазискола (ФКС – фасетки квазискола). Вместе с тем, значения KCV^{40} остаются выше нормативного уровня.

Повторный нагрев (Рисунок 7, а) не оказывает существенного отрицательного влияния на рассматриваемый показатель механических свойств.

Изучение влияния морфологии структурно-фазового состава и дисперсности его элементов на сопротивление хрупкому разрушению исследуемых сталей показало, что повышение значений ударной вязкости объясняется увеличением в структуре металла ОШУ ЗТВ бейнита речной морфологии, суммарная протяженность высокоугловых границ пакетов которого, определяющая затраты энергии на разрушение, больше, чем суммарная протяженность границ блоков бейнита гранулярной морфологии (Рисунок 8).

Таким образом, на основе исследования реакции сталей на ТЦС (по показателям твердости и сопротивления хрупкому разрушению) определен

рациональный $W_{8.5}$, гарантирующий формирование структурно-фазового состава, обеспечивающего свойства сварных соединений на уровне нормативных требований, составляющий 30-60 °C/c и 25-40 °C/c для стали К70 и К80 соответственно.

Оценка сопротивляемости металла СС образованию холодных трещин в данных интервалах $W_{8.5}$ показала отсутствие склонности к их образованию (выполнено совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана).

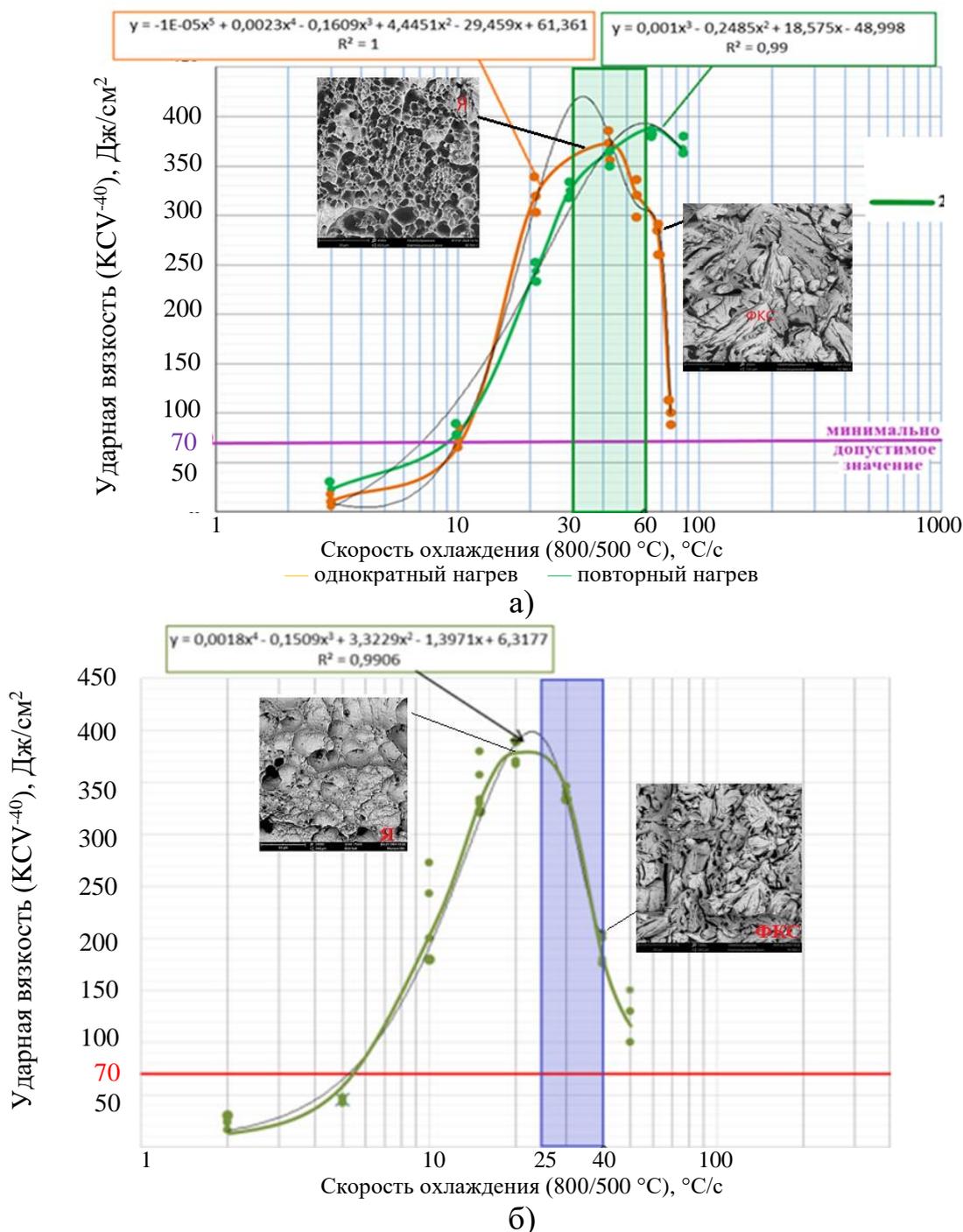


Рисунок 7 – Зависимости изменения ударной вязкости от скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ сварных соединений сталей К70 (а) и К80 (б) при однократном (а, б) и двукратном (а) нагревах

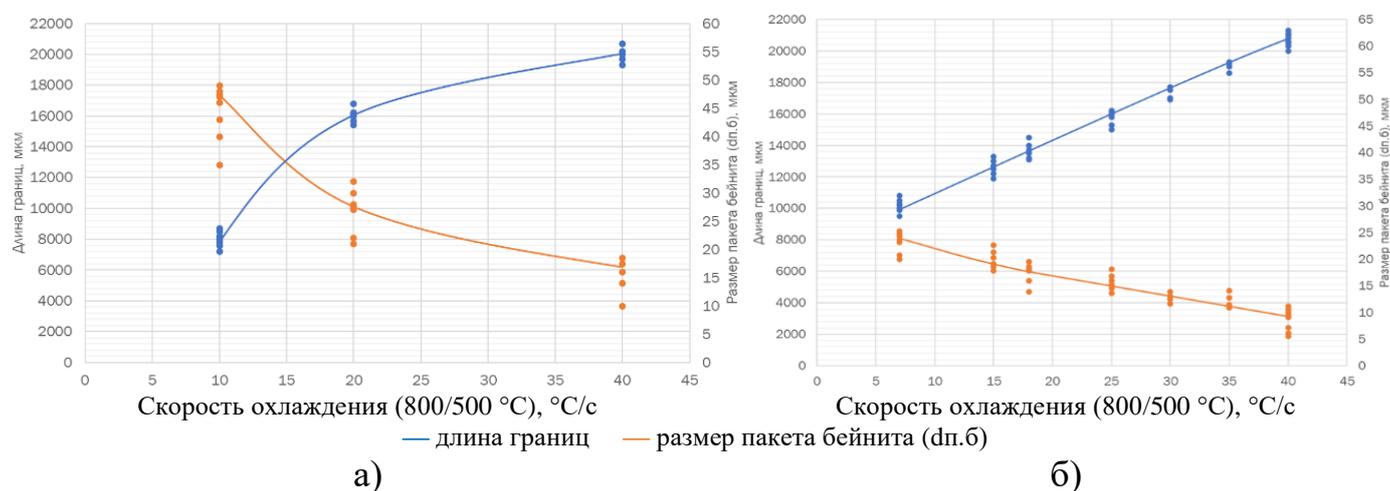


Рисунок 8 – Зависимости изменения длины границ пакетов бейнита и среднего размера (d_{cp}) пакета бейнита от скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ стали K70 (а) и K80 (б)

Пятая глава посвящена разработке рекомендаций по определению условий реализации рекомендуемых скоростей охлаждения при дуговых способах сварки кольцевых стыков трубопроводов.

Типоразмеры труб ($\varnothing 1220 \times 22,6$ мм и $\varnothing 1420 \times 38,1$ мм из стали K70, $\varnothing 1220 \times 20,0$ мм и $\varnothing 1420 \times 28,0$ мм из стали K80) для проведения расчетов выбирались исходя из минимальных и максимальных толщин стенок трубной продукции, планируемой к применению на объектах ПАО «Газпром» с целью транспортировки природного газа при рабочем давлении 14,7 МПа. Это в полной мере позволило оценить влияние толщины стенки на значения W_{8-5} металла ЗТВ.

Выполнен расчет зависимостей изменения W_{8-5} металла ОШУ ЗТВ от погонной энергии следующих способов сварки: РД, МПИ и ААДП. С целью обеспечения рекомендуемых диапазонов W_{8-5} показана целесообразность регулирования погонной энергии при МПИ и ААДП, в основном, за счет изменения электрических параметров процесса (в рамках НД), а при РД за счет повышения температур предварительного/межслойного подогревов.

Результаты расчетов W_{8-5} были представлены в виде таблиц, в которых приведены конкретные параметры режимов сварочных процессов, значения погонной энергии и температуры предварительного/межслойного подогревов, обеспечивающие требуемые W_{8-5} металла ЗТВ. Также были построены графические зависимости изменения W_{8-5} металла ОШУ ЗТВ от значений погонной энергии. На Рисунке 9, в качестве примера, представлены указанные графические зависимости для способа РД кольцевых стыков труб, на которых зеленым цветом выделены области значений погонной энергии, гарантированно обеспечивающие требуемый диапазон W_{8-5} с учетом температур предварительного подогрева. Аналогичные зависимости также построены для способов МПИ и ААДП. Указанные зависимости позволяют выбирать значения режимов сварочного процесса с учетом: особенностей используемого сварочного оборудования (от конкретных производителей), типоразмеров сварочных материалов, наличия ограничений по проведению предварительного подогрева свариваемых кромок. В этих случаях выбор режимов сварки проводится по следующей методике:

– для конкретного способа сварки, определенного слоя сварного шва и температуры предварительного подогрева выбирается значение погонной энергии q , входящее в «зеленый» диапазон согласно рисункам (зависимостям);

– по выбранному значению погонной энергии q , с учетом ее зависимости от режимов сварочного процесса, осуществляется выбор режимов сварки.

Построенные зависимости изменения W_{8-5} металла ОШУ ЗТВ использованы при разработке нормативного документа (СТО Газпром 15-2.1-014), регламентирующего технологии сварки при строительстве трубопроводов из труб класса прочности К70.

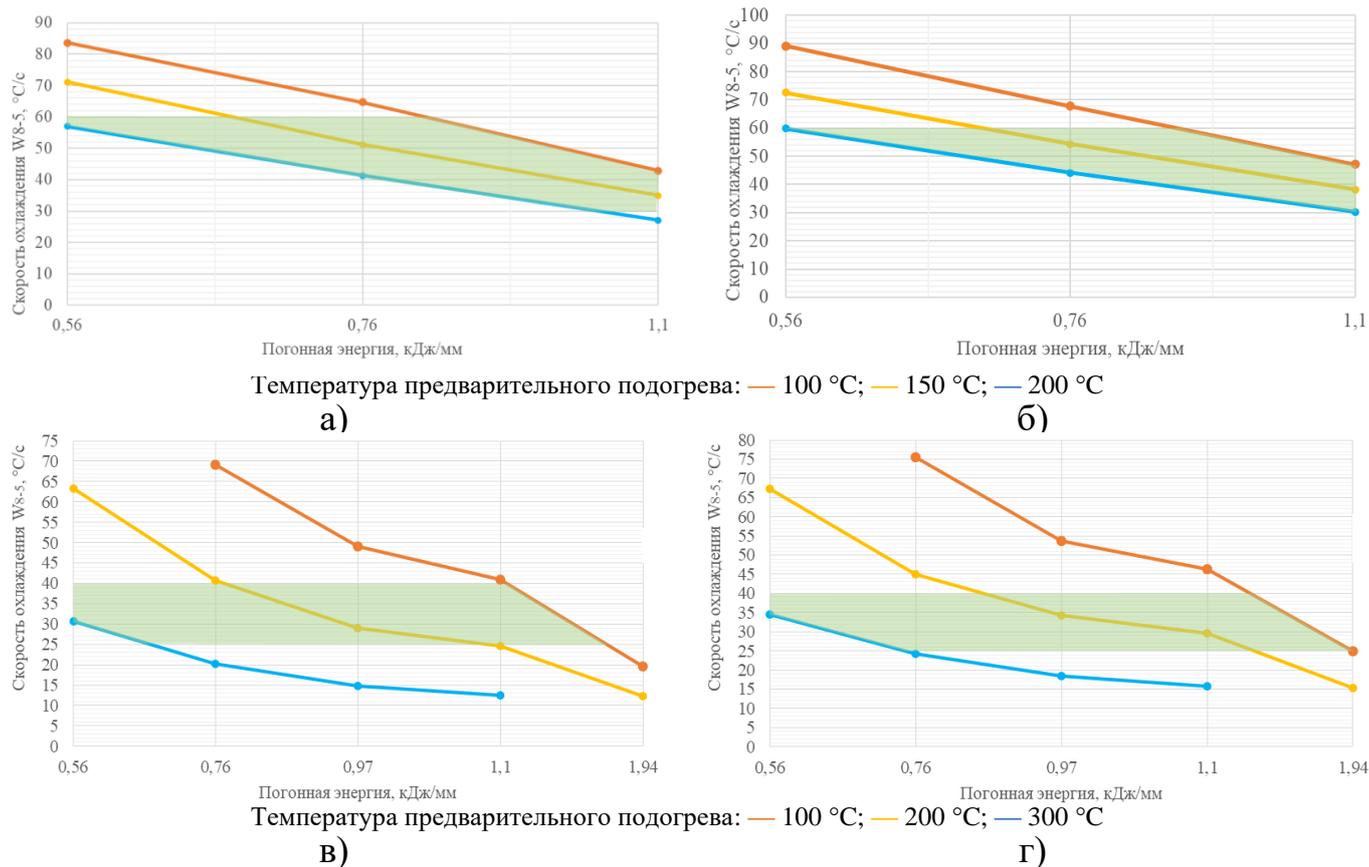


Рисунок 9 – Изменение скоростей охлаждения металла ОШУ ЗТВ в зависимости от погонной энергии ручной дуговой сварки (РД): а) - корневой слой шва труб Ø1220x22,6 мм класса прочности К70; б) - корневой слой шва труб Ø1420x38,1 мм класса прочности К70; в) - 1-ый заполняющий слой шва труб Ø1220x20,0 мм класса прочности К80; г) - 1-ый заполняющий слой шва труб Ø1420x28,0 мм класса прочности К80

Основные выводы и результаты работы:

1. На основе анализа сварочных технологий, предполагаемых к применению при строительстве МГ высокого давления, и расчета параметров термических циклов в ОШУ ЗТВ с учетом многократного нагрева и охлаждения, определены диапазоны значений параметров ТЦС, реализация которых при исследовании позволила оценить свариваемость сталей классов прочности К70 и К80. Показано, что металл ОШУ ЗТВ претерпевает повторный нагрев в диапазоне температур 850–1050 °С при выполнении последующего слоя шва.

2. Оценка химического и исходного структурно-фазового составов исследуемых сталей показала, что металл стали К80 имеет более высокие значения эквивалента углерода (0,53–0,55 %) по сравнению со сталью К70 (0,43–0,47 %). Основной структурной составляющей обеих сталей является высокодисперсный бейнит различной морфологии. В структуре стали К70 содержится до 15 % ферритной фазы. В структуре стали К80 структурно-свободный феррит отсутствует, но присутствует до 15-20 % мартенситной фазы. В бейнитной структуре обеих сталей наблюдается выделение М/А–составляющей.

3. Исследование особенностей кинетики распада аустенита ОШУ ЗТВ стали класса прочности К80 показало, что, в отличие от стали класса прочности К70, аустенит стали К80 обладает большей устойчивостью к распаду, что выражается в отсутствии области ферритного превращения, расширении области образования мартенситной фазы и М/А–составляющей. Морфологическое строение бейнитной структуры с увеличением скорости охлаждения меняется с гранулярной на игольчатую, в металле шва, и с гранулярной на речную в ОШУ ЗТВ. Это свидетельствует о большей склонности стали класса прочности К80 к формированию закалочных структур, и, как следствие, к образованию холодных трещин.

4. На основе изучения влияния параметров термического цикла сварки на изменение механических свойств металла исследованных участков сварного соединения стали класса прочности К70 установлен рациональный диапазон скоростей охлаждения ($W_{8.5} = 30\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$), в котором их значения соответствуют нормативным требованиям (твердость – от твердости основного металла до 320 НV₁₀, ударная вязкость при минус 40 °С – не менее 70 Дж/см²). Определен структурно-фазовый состав, формирующийся в указанном диапазоне скоростей охлаждения: для металла шва примерно от 90 % смеси игольчатого и гранулярного бейнита и 10 % мартенсита (при $W_{8.5} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$) до 65 % смеси игольчатого и гранулярного бейнита и 35% мартенсита (при $W_{8.5} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$); для металла ОШУ ЗТВ примерно от 80 % смеси гранулярного (10 %) и речного (70 %) бейнита и мартенситной фазы до 20 % (при $W_{8.5} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$) до примерно равных (по 50 %) количеств мартенсита и речного бейнита (при $W_{8.5} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$); для металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ примерно от 15 % квазиполигонального феррита и 85 % гранулярного бейнита (при $W_{8.5} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$) до практически полностью бейнитной структуры гранулярной морфологии ($W_{8.5} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$).

5. На основе изучения влияния параметров термического цикла сварки на изменение механических свойств металла исследованных участков сварного соединения стали класса прочности К80 установлен рациональный диапазон скоростей охлаждения ($W_{8.5} = 25\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$), в котором их значения соответствуют нормативным требованиям (твердость – от твердости основного металла до 320 НV₁₀, ударная вязкость при минус 40 °С – не менее 70 Дж/см²). Установлен структурно-фазовый состав, формирующийся в указанном диапазоне скоростей охлаждения: металл ОШУ ЗТВ должен содержать до 20 % мартенситной фазы, не более 10 % гранулярного бейнита и около 70 % речного бейнита (при $W_{8.5} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$) до 50-55 % мартенсита, около 5 % гранулярного бейнита и 40–45 % речного бейнита ($W_{8.5} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$); металл участка неполной перекристаллизации ЗТВ должен

состоять полностью из гранулярного бейнита.

6. Показано, что высокие значения ударной вязкости металла ОШУ ЗТВ в рациональных диапазонах $W_{8.5}$ обеспечиваются в обеих сталях их низкой склонностью к росту зерна аустенита ($d_y < 50$ мкм) и формированием высокодисперсного реечного бейнита с большой суммарной протяженностью высокоугловых границ пакетов бейнита, определяющих затраты энергии на разрушение.

7. На основании выполненных исследований разработаны рекомендации по выбору режимов способ сварки РД, МПИ и ААДП магистральных газопроводов из стали классов прочности К70 и К80, позволяющие реализовать диапазоны скоростей охлаждения сварных соединений ($W_{8.5} = 30-60$ °С/с – для стали К70 и $W_{8.5} = 25-40$ °С/с – для стали К80), в которых формируется структурно-фазовый состав, обеспечивающий нормативные требования по твердости, ударной вязкости и отсутствию холодных трещин.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Ефименко Л.А., Рамусь А.А., Мурашов Н.А. Анализ технологий сварки перспективных к применению при строительстве магистральных трубопроводов из высокопрочных сталей // Сварочное производство. – 2025. – № 2. – С. 37-45. (0,56 п.л./0,19 п.л.).

2. Определение допустимых технологических параметров ручной дуговой сварки для стали класса прочности К70 на основании моделирования процесса / Мурашов Н.А. [и др.] // Сварочное производство. 2025. № 1. С. 9—14 (0,58 п.л./0,15 п.л.).

3. The Role of the Weld Metal Structure Formation in Selecting Rational Cooling Rates When Welding K80 Strength Grade Steel / Murashov N.A. [etc.] // Metallurgist. 2024. Vol. 67. № 9-10. P. 1344—1350 (0,81 п.л./0,12 п.л.).

4. Murashov N. A., Utkin I. Yu. Use of Analytical Calculation Methods for Selecting Welding Regimes for Pipe Longitudinal Seams and Pipeline Circular Joints of Steels of Strength Classes K65 and K80 // Metallurgist. 2023. Vol. 67. № 7-8. P. 947—953 (0,81 п.л./0,41 п.л.).

5. Уткин И.Ю., Ахметова М.У., Мурашов Н.А. Обоснование рационального диапазона скоростей охлаждения металла зоны перегрева сталей классов прочности К65 и К80 // Сварочное производство. 2023. № 3. С. 26—29 (0,46 п.л./0,15 п.л.).

6. Обоснование режимов ручной дуговой сварки монтажных кольцевых стыковых соединений труб 1220x20 мм класса прочности К80/ Мурашов Н.А. [и др.] // Сварочное производство. 2022. № 12. С. 32—38 (0,81 п.л./0,12 п.л.).

7. Мурашов Н.А. Расчетно-экспериментальный анализ параметров термических циклов способов ремонта кольцевых стыков газопроводов / Мурашов Н.А. [и др.] // Сварочное производство. 2019. № 11. С. 9—14 (0,69 п.л./0,12 п.л.).

8. Calculation and experimental analysis of the parameters thermal cycles of welding methods used in the repair of ring joints of gas pipelines / Murashov N.A. [etc.] // Welding International. – 2019. – Vol. 33, No. 7-9. – P. 302-307. (0,38 п.л./0,05 п.л.).