

На правах рукописи



БОРОВСКОЙ Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВАНАДИЕВОЙ СТАЛИ**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Территориальная компания «ОМЗ-Ижора», г. Санкт-Петербург, Колпино

Научный руководитель:

доктор технических наук **Титова Татьяна Ивановна**,
генеральный директор, научный руководитель Научно-исследовательского центра
ООО «Территориальная компания «ОМЗ-Ижора» (г. Санкт-Петербург, Колпино)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Горынин Владимир Игоревич**,
главный научный сотрудник подразделения "Корпусные стали и наноматериалы"
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург)

доктор технических наук, доцент **Андреев Андрей Константинович**,
старший преподаватель факультета низкотемпературной энергетики ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « 06 » июня 2019г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.229.03 при Федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО
«СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " " _____ 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Швецов О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для решения задач импортозамещения и глубокой переработки нефти необходима широкомасштабная модернизация нефтеперерабатывающих предприятий РФ, что требует большого количества крупногабаритных нефтехимических реакторов (НХР), изготовленных по современным проектам и работоспособных длительный срок при высоких давлении и температуре в регионах с низкими климатическими температурами.

По имеющимся данным, в РФ основой топливно-энергетической отрасли являются 27 крупных нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Износ оборудования и устаревшие технологии гидрокрекинга большинства этих НПЗ не соответствуют современным требованиям к переработке сырья и к производству высококачественных автомобильных бензинов.

Современные крупногабаритные НХР изготавливаются за рубежом и в РФ по проектам компаний Chevron, Exxon Mobil, CB&I, Техасо и других в соответствии со стандартами ASME Code. В качестве основного материала для изготовления корпусов нового поколения НХР, в том числе реакторов гидрокрекинга нефти, работающих при высокой температуре и давлении водорода, используют стали хромомолибденовой композиции повышенной прочности с дополнительным легированием ванадием. До 2008 года в РФ отсутствовал опыт изготовления НХР из такой 2,25Cr-1Mo-V стали марок SA-336M F22V, SA-542M Tr.D cl.4a и SA-182M F22V по ASME Code. Поэтому при освоении производства корпусов крупногабаритных НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали с высоким уровнем служебных свойств потребовались исследования в области сварки и послесварочной термической обработки. При этом изготовление корпусов НХР из толстостенных поковок и листовых заготовок из 2,25Cr-1Mo-V стали было невозможно без решения ряда технологических проблем, основные из которых – обеспечение требуемых высоких служебных свойств и одновременное предотвращение образования трещин при сварке и термической обработке. Следует отметить, что сварные соединения 2,25Cr-1Mo-V стали склонны к образованию холодных трещин и трещин повторного нагрева (ТПН), которые недопустимы в крупногабаритных сосудах давления и требуют дорогостоящего ремонта сваркой с последующим отпуском, что снижает запас прочности конструкции.

В связи с изложенным, **целью работы** является разработка технологии послесварочной термической обработки металла корпуса крупногабаритных НХР, гарантирующей проектный высокий уровень служебных свойств и исключающей образование дефектов типа трещин, на основе комплексных исследований структуры, фазового состава и механических свойств металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали с учетом влияния на них температурно-временных параметров послесварочной термической обработки.

В соответствии с целью работы были поставлены и последовательно решены следующие задачи применительно к металлу сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали:

- Определить влияние тепловых параметров сварки на структуру и свойства металла сварных соединений для формирования исходной структуры, позволяющей обеспечить после отпуска требуемые служебные свойства;
- Исследовать влияние температурно-временных параметров (ТВП) послесварочной термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) для определения параметров отпусков, позволяющих обеспечить требуемые служебные свойства металла сварных соединений;
- Определить влияние ТВП послесварочного отпуска на склонность металла сварных соединений к образованию холодных трещин на основе аналитических и экспериментальных методов оценки склонности металла к хрупкому разрушению, в том числе под воздействием водорода, расчетных методов оценки распределения температурных полей при послесварочном отпуске;
- Определить влияние температуры послесварочного отпуска на склонность металла шва к образованию ТПН с помощью физического моделирования, натурных испытаний и анализа их результатов;
- На основании данных по влиянию режима отпуска на механические свойства и на склонность металла сварных соединений к образованию холодных трещин и ТПН разработать технологию послесварочной термической обработки крупногабаритных сварных соединений корпуса НХР;
- Выполнить апробацию и внедрение результатов работы в промышленное производство сварных корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали.

Научная новизна (положения, выносимые на защиту):

1. Определены особенности структурного состояния и фазового состава металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали после послесварочных отпусков в диапазоне температурно-временного параметра Ларсена-Миллера (параметра отпуска) P_{LM} от 13,0 до 21,1 и определены критические точки A_{C1} и A_{C3} на основе термокинетической диаграммы.
2. Установлены зависимости механических свойств металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали от параметра послесварочного отпуска, определен диапазон параметра отпуска P_{LM} от 20,4 до 21,1, в котором обеспечиваются требуемые кратковременные механические свойства.
3. Выявлено влияние водорода на сопротивление хрупкому разрушению металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в зависимости от температуры послесварочной термической обработки, предложены параметры проведения низкотемпературного режима термической обработки при 350°C для эффективного удаления водорода.
4. Исследовано влияние температурно-временных параметров послесварочного отпуска на сопротивление хрупкому разрушению металла шва и ЗТВ сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, позволившее установить параметры проведения промежуточных отпусков, исключающие образование холодных трещин.
5. Определена температура наибольшей склонности металла шва 2,25Cr-1Mo-V стали к образованию трещин повторного нагрева.
6. Определены температурно-временные параметры послесварочной термической обработки крупногабаритных сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали корпусов НХР, обеспечивающие одновременно высокий комплекс их служебных свойств и отсутствие трещин.

Практическая значимость работы:

1. Разработана и впервые в РФ внедрена в серийное промышленное производство комплексная технология послесварочной термической обработки крупногабаритных сварных соединений корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали, обеспечивающая высокий комплекс их служебных свойств и исключающая образование трещин.
2. Разработана и впервые в РФ применена при изготовлении корпусов НХР из

2,25Cr-1Mo-V стали в толщинах до 290 мм технология низкотемпературной дегидрогенизационной термической обработки, позволяющая эффективно удалить диффузионно-подвижный водород, сократить количество высоких отпусков с целью сохранения запаса прочности и уменьшения сроков и себестоимости изготовления корпусов НХР.

3. Разработана и опробована методика определения температуры «провала» пластичности, то есть температуры наибольшей склонности металла шва 2,25Cr-1Mo-V стали к образованию ТПН.

Личный вклад автора заключается в расчетно-экспериментальном обосновании выбора комплексной технологии послесварочной термической обработки для исключения образования трещин и обеспечения служебных свойств металла крупногабаритных сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали на основе определения основных зависимостей влияния ТВП послесварочной термической обработки на микроструктуру, фазовый состав, механические и технологические свойства металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в толщинах до 290 мм, в разработке режимов послесварочной термической обработки в условиях промышленного производства, в разработке методики исследования склонности металла шва к ТПН в зависимости от температуры высокого отпуска, непосредственное участие в испытаниях и исследованиях, обработке и анализе их результатов, и в авторском надзоре за изготовлением НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали.

Достоверность полученных результатов экспериментальных исследований, научных выводов и практических рекомендаций, сделанных в работе, подтверждается применением стандартизированных методик испытаний и исследований и поверенных средств измерения, получением экспериментальных данных на металле натуральных крупногабаритных сварных соединений корпусов НХР и опробованием разработанных технологических режимов послесварочной термической обработки сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали непосредственно в процессе промышленного изготовления корпусов НХР.

Структура диссертационной работы: диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка используемой литературы. Объем работы составляет 179 страниц текста, включая 55 рисунков и 26 таблиц. Список литературы содержит 127 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой обзор научно-технической литературы и нормативно-технической документации, посвященный анализу отечественного и мирового опыта изготовления сварных соединений крупногабаритных нефтехимических сосудов давления из низколегированной 2,25Cr-1Mo-V стали. Отмечено, что на начало проведения опытных работ и исследований, результаты которых приведены в данной работе, ни одно предприятие РФ не имело опыта сварки и послесварочной термообработки крупногабаритных корпусов НХР из стали марок SA-336M F22V и SA-542M Tr.D cl.4a типа легирования 2,25Cr-1Mo-V с толщиной стенки до 290 мм сварочными материалами того же типа легирования 2,25Cr-1Mo-V с обеспечением жестких требований по качеству и комплексу служебных свойств сварных соединений в соответствии с современными требованиями проектов глубокой переработки нефти. Проанализированы основные требования к материалам и сварным соединениям современных корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали. Рассмотрены типичные дефекты сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, возникающие на этапе их изготовления, и технологические сложности изготовления крупногабаритных сосудов из сталей повышенной прочности. Сформулированы основные технологические задачи, решение которых необходимо для обеспечения комплекса служебных свойств и качества сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали.

Вторая глава посвящена изготовлению опытных сварных соединений методом автоматической дуговой сварки под флюсом и выбору методик их испытаний и исследований для решения поставленных научных задач, включая выбор методик определения химического состава, дилатометрических, металлографических и фрактографических исследований, химического и рентгеноструктурного анализа карбидной фазы, оценки стойкости к тепловому охрупчиванию и принципов компьютерного моделирования режимов послесварочной термической обработки. Химический состав основного металла и металла шва опытных сварных соединений приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Типичный химический состав металла опытных сварных соединений.

Зона сварного соединения	Содержание элементов, вес. %											
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si	Nb	P	S	As	Sn	Sb
Основной металл SA-336M F22V	0,13	2,38	1,01	0,28	0,48	0,07	0,01	0,006	0,002	0,004	0,003	0,001
Металл шва 2,25Cr-1Mo-V	0,10	2,49	1,08	0,35	0,86	0,17	0,02	0,007	0,003	0,003	0,0007	0,0006

Предложена методика физического моделирования для определения температуры высокого отпуска, провоцирующей образование ТПН в металле шва.

Третья глава посвящена исследованию влияния ТВП послесварочного отпуска на формирование структуры, фазовые превращения и свойства металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали с определением ТВП промежуточного (технологического) и окончательного, формирующего служебные свойства, послесварочных отпусков.

В первую очередь, было выполнено исследование влияния тепловых параметров сварки на структуру и свойства сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали. Установление взаимосвязи между параметрами сварки, структурой и свойствами сварных соединений позволило сформировать исходную структуру металла шва и ЗТВ, при которой возможно обеспечение требуемого комплекса механических свойств, а именно: полностью бейнитная преимущественно мелкозернистая структура с достаточно равномерным распределением карбидов (без крупных выделений по границам зерен/кристаллитов).

Исследования кинетики распада переохлажденного аустенита и микроструктуры сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали показали, что в металле шва и ЗТВ при многопроходной сварке АФ образуется полностью бейнитная структура (рис.1).

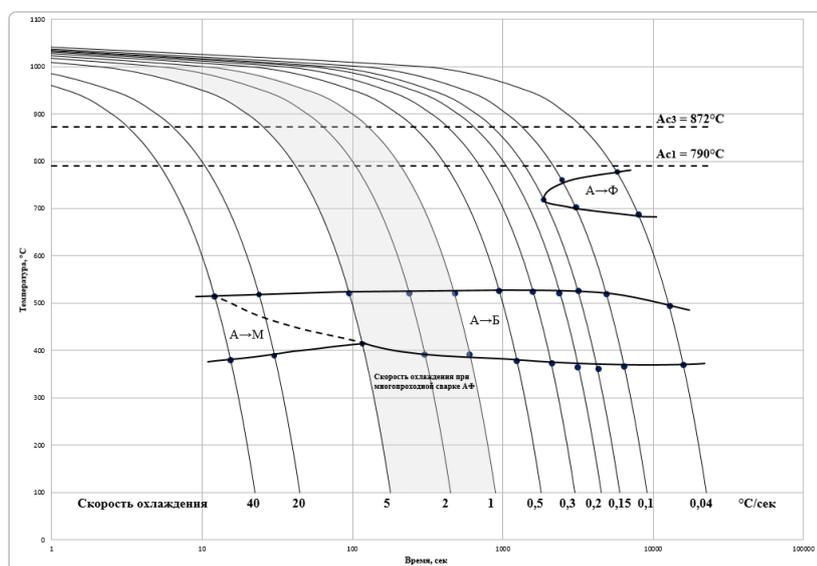


Рисунок 1 – Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита 2,25Cr-1Mo-V стали.

Для металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, выполненных с погонной энергией сварки q/V в диапазоне 17 – 28 кДж/см, установлено, что максимальная доля мелкозернистой (перекристаллизованной) структуры в металле шва в объеме до 60 % с размером зерна не более 50 мкм образуется при сварке с $q/V \approx 23$ кДж/см (рис.2).

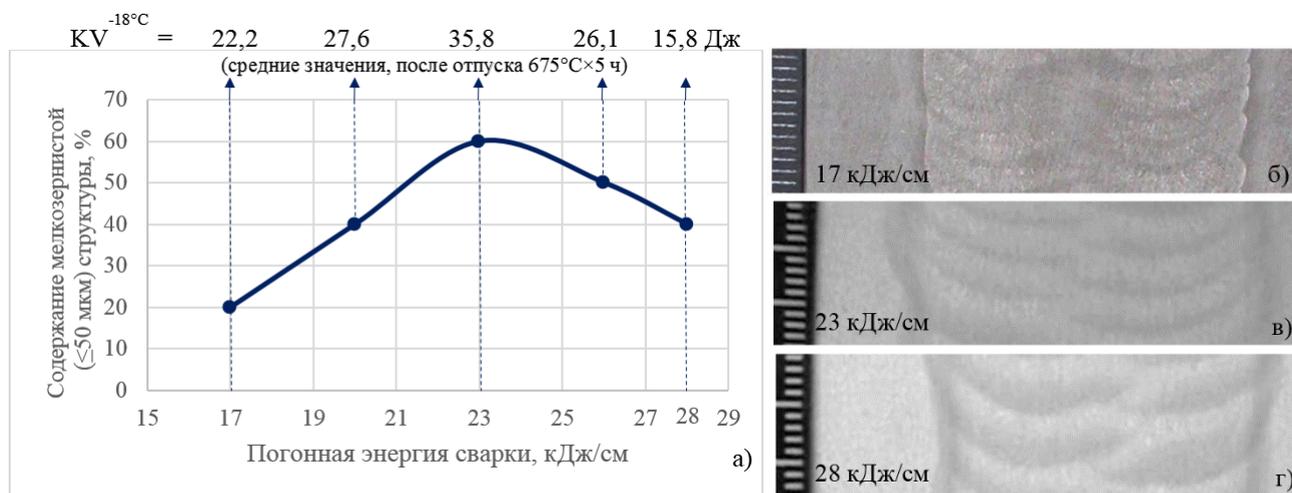


Рисунок 2 – Влияние погонной энергии сварки на объемное содержание распавшегося аустенита с размером зерна менее 50 мкм в структуре металла шва и на работу удара металла шва.

На рисунке 2 также показано, что увеличение доли мелкозернистой структуры способствует росту низкотемпературной работы удара металла шва, достигающей максимального уровня $KV^{-18^\circ\text{C}}=35,8$ Дж при $q/V \approx 23$ кДж/см. Снижение q/V до 17-20 кДж/см и, соответственно, количества подводимого тепла приводит к уменьшению объема металла, подвергающегося перекристаллизации, и к уменьшению $KV^{-18^\circ\text{C}}$. Повышение q/V до 26-28 кДж/см приводит к увеличению объема наплавленного за проход металла, а значит и к увеличению объема неблагоприятной литой структуры и размера дендритов, что также уменьшает $KV^{-18^\circ\text{C}}$. При этом структура металла ЗТВ в диапазоне q/V от 17 до 28 кДж/см преимущественно мелкозернистая, что предполагает ее высокий уровень работы удара и сопротивления хрупкому разрушению.

По данным исследования влияния температуры предварительного и сопутствующего подогрева (далее - подогрев) на свойства металла шва и ЗТВ сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали установлено, что приемлемая структура бейнита с достаточно равномерным распределением карбидов для металла шва и ЗТВ обеспечивается при сварке с подогревом 200-250°C (рис.3). Структура металла шва, выполненного без подогрева, состоит из нижнего бейнита с выраженным

игольчатым строением. Выполнение сварки с подогревом до 300°C приводит к увеличению количества и размеров карбидов, выделяющихся по границам дендритов и увеличивающих степень охрупчивания этих границ.

Таким образом, режим сварки с погонной энергией на уровне 23 кДж/см и температурой подогрева 200÷250°C обеспечивает наибольший уровень работы удара металла шва (35,8 Дж после отпуска с минимальными рекомендуемыми параметрами 675°C - 5 ч) и формирует преимущественно мелкозернистую структуру металла шва и ЗТВ сварных соединений с равномерным распределением карбидов. С использованием данного теплового режима сварки были изготовлены все сварные соединения для дальнейших исследований.

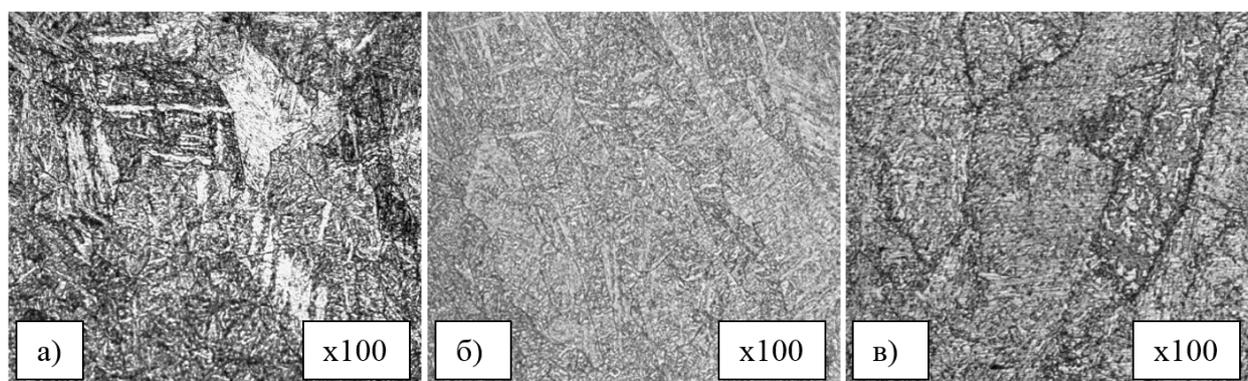


Рисунок 3 – Микроструктура металла шва, выполненного без подогрева (а), с подогревом 200°C (б) и 300°C (в).

Для разработки комплексной технологии термической обработки сварных соединений НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали выполнен ряд исследований с целью определения ТВП низкотемпературной обработки для удаления водорода (НДТО), промежуточного отпуска (ПрТО) для уменьшения напряжений и твердости и, соответственно, снижения вероятности образования трещин, и окончательного отпуска (ОТО), формирующего служебные свойства. Для решения этих задач были определены основные структурные и фазовые превращения, происходящие в металле шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали при отпусках с различными вариациями температуры и времени в диапазоне параметра P_{LM} от 13,0 до 21,6.

Установлено, что структура металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали во всех термических состояниях представлена бейнитом с различным содержанием, распределением и составом карбидной фазы (рис.4). После термической обработки по режиму 350°C – 7,0 ч структура металла шва близка к исходной (после сварки), а значит, обладает сходными свойствами (рис. 4 а).

Повышение температуры отпуска до 660°C ($19,3 R_{LM}$) и выше сопровождается выделением карбидов, увеличением их размеров и количества и коагуляцией по границам зерен (рис.4 и 5), что должно приводить к снижению временного сопротивления металла шва и его длительной прочности. Отпуск при температурах 730°C и выше нецелесообразен, так как ведет к интенсивной коагуляции карбидов, а при температурах $\sim 760^{\circ}\text{C}$ к частичному их растворению (рис. 4 г).

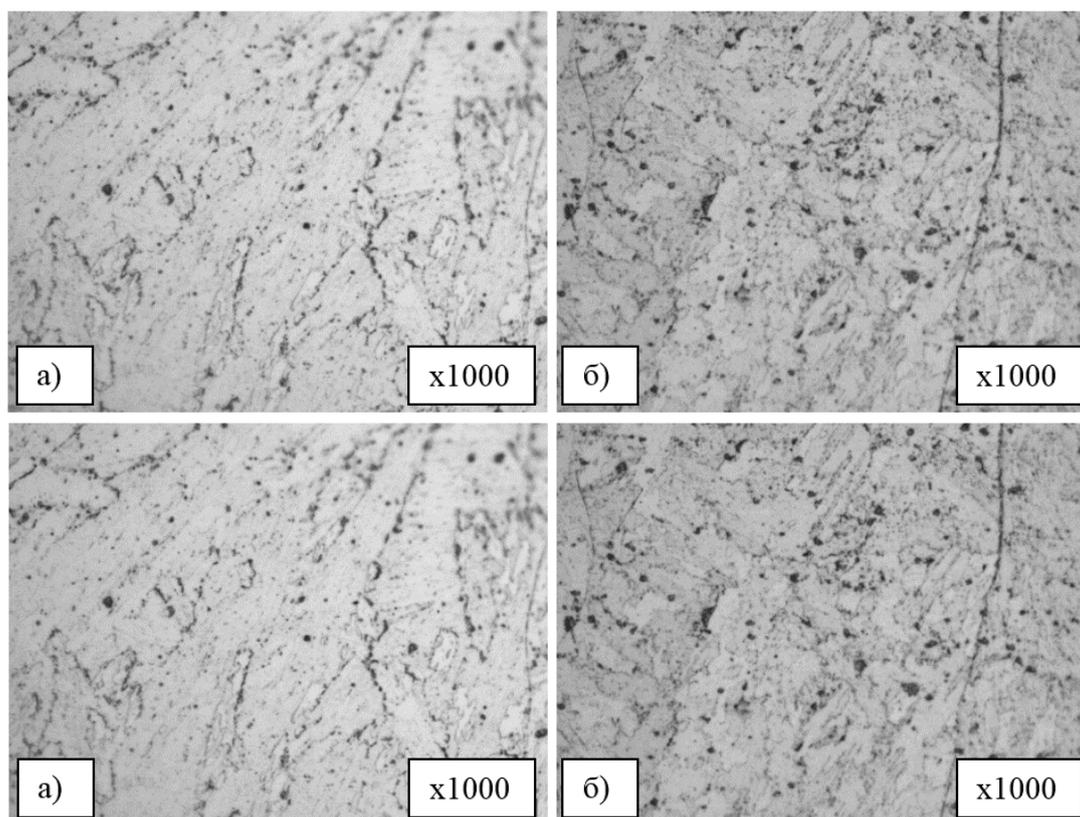


Рисунок 4 – Микроструктура металла шва после различных термических обработок: а) 350°C ($13,0 R_{LM}$), б) 660°C ($19,3 R_{LM}$), в) 705°C ($20,5 R_{LM}$), г) 760°C ($21,6 R_{LM}$).

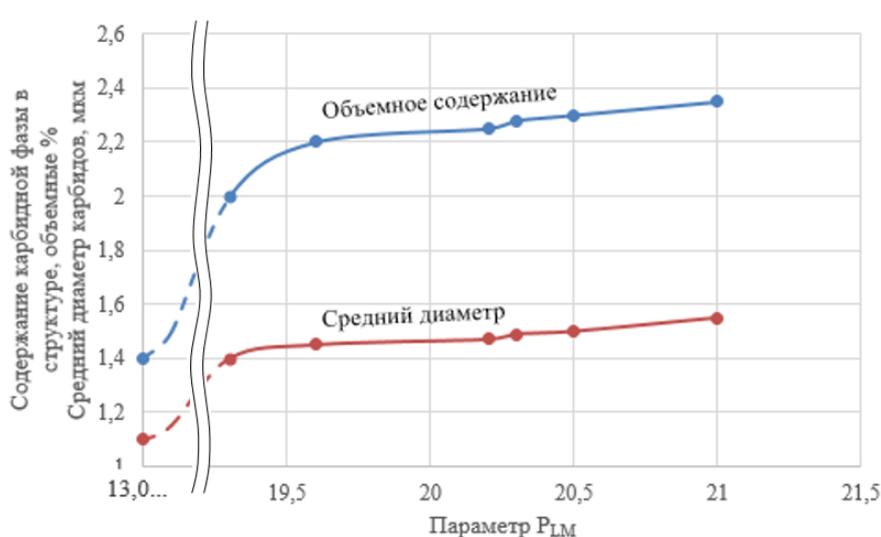


Рисунок 5 – Объемное содержание карбидной фазы в структуре металла шва и средний диаметр карбидов в зависимости от параметра отпуска R_{LM} .

Исследованы фазовые (карбидные) превращения в металле шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали при послесварочных отпусках. Анализ результатов исследований фазовых превращений позволяет утверждать следующее:

- выдержка при 350°C приводит к увеличению содержания цементитных карбидов типа M_3C , которые способствуют охрупчиванию металла, поэтому время выдержки при 350°C должно быть ограничено;
- отпуск при 650°C ведет к значительному увеличению содержания карбидов MC (преимущественно VC) и карбидов M_2C , что способствует дисперсионному твердению и обеспечивает отпускостойчивость, но повышает склонность к ТПН;
- карбиды MC ($VC+NbC$), M_2C ($(Mo,V,Nb)_2C$), M_7C_3 ($(Cr,Fe,Mo)_7C_3$) и $M_{23}C_6$ ($(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$), образующиеся при температурах отпуска в диапазоне 650-705°C способствуют обеспечению высоких служебных свойств металла шва и его отпускостойчивости;
- длительные выдержки при 705°C ведут к уменьшению содержания карбидов MC, M_7C_3 и $M_{23}C_6$, что приводит к понижению уровня прочности, поэтому параметр отпуска R_{LM} должен быть ограничен.

Исследована отпускостойчивость металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали с определением зависимости изменения твердости и характеристик прочности металла шва от параметра отпуска R_{LM} (рис.6). Определена хладостойкость по норме низкотемпературной работы удара KV^{-18°C} для металла шва в зависимости от параметра отпуска R_{LM} (рис.7).

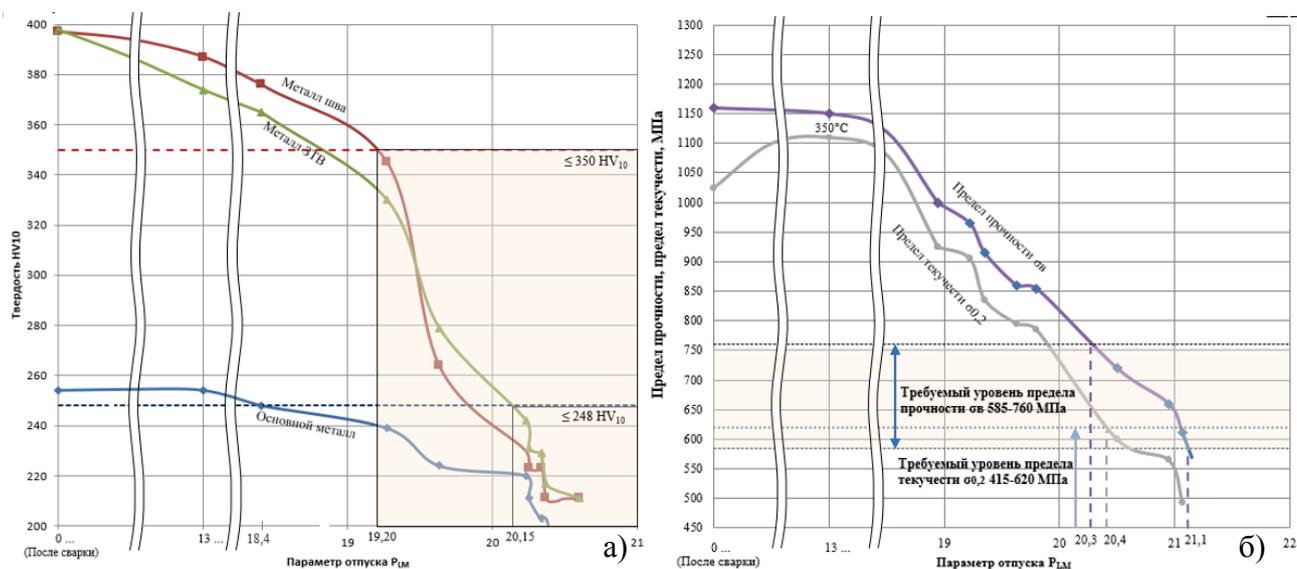


Рисунок 6 – Зависимости твердости сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали (а) и характеристик прочности металла шва (б) от параметра отпуска R_{LM} .

Установлено, что для снижения твердости ниже критического значения 350 HV₁₀ и подтверждения отсутствия хрупких структур в металле сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, параметр P_{LM} должен быть не менее 19,20, что соответствует отпуску при 660°C не менее 4 ч (рис. 6 а). Для совокупного получения требуемых характеристик прочности ($\sigma_B=585-760$ МПа, $\sigma_{0,2}=415-620$ МПа), твердости (не более 248 HV₁₀) и работы удара металла шва (KV^{-18°C} не менее 55 Дж) параметры послесварочных отпусков должны находиться в диапазоне P_{LM}=20,4÷21,1, что соответствует отпуску при 705°C - 8÷37 ч (рис.6, 7).

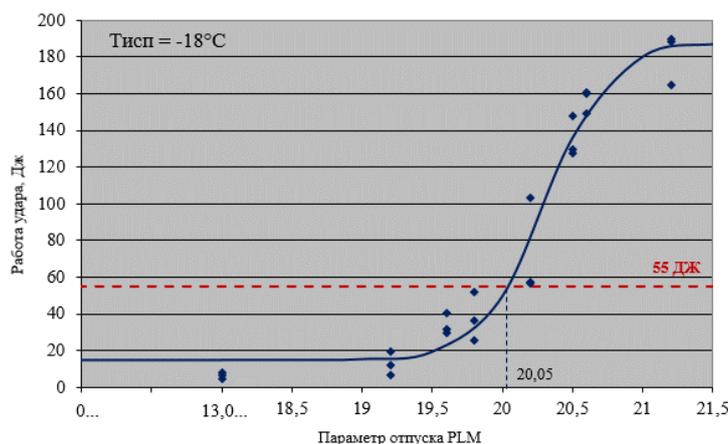


Рисунок 7 - Работа удара KV^{-18°C} металла шва сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали в зависимости от параметра отпуска P_{LM}

Четвертая глава посвящена исследованию влияния параметров послесварочного отпуска на склонность сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали к образованию холодных трещин. Сварные соединения 2,25Cr-1Mo-V стали изначально склонны к образованию холодных трещин в состоянии «после сварки», на что указывает высокий углеродный эквивалент $C_{э\text{кв}} \approx 1,0$ % и высокий уровень твердости (более 350 HV) и характеристик прочности в данном состоянии (рис.6). Известно также негативное влияние на образование холодных трещин диффузионно-подвижного водорода (ДПВ). Для определения ТВП промежуточного отпуска, обеспечивающих высокую стойкость металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали к холодным трещинам, выполнено следующее:

- оценка эффективности удаления ДПВ из сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали при отпуске с помощью косвенных методов фрактографического исследования изломов образцов после испытаний на ударный изгиб;
- определение ТВП отпуска, при которых металл сварных соединений не склонен к образованию трещин и к хрупкому разрушению под действием ДПВ (твердость не более 350 HV₁₀, количество вязкой составляющей в изломе ВИ не менее 30%).

Кроме того, выполнены расчеты по определению температурных полей крупногабаритных сварных соединений в процессе послесварочной термической обработки для поиска решений по уменьшению уровня термических напряжений.

Установлено, что проведение низкотемпературной обработки с температурой до 300°C неэффективно для удаления ДПВ и приводит к образованию микропор, что свидетельствует об охрупчивании металла шва водородом (рис. 8 а, б). В результате металл шва подвергается необратимому водородному охрупчиванию, что резко снижает работу удара даже после выполнения дополнительного высокого отпуска по режиму 705°C – 8 ч.

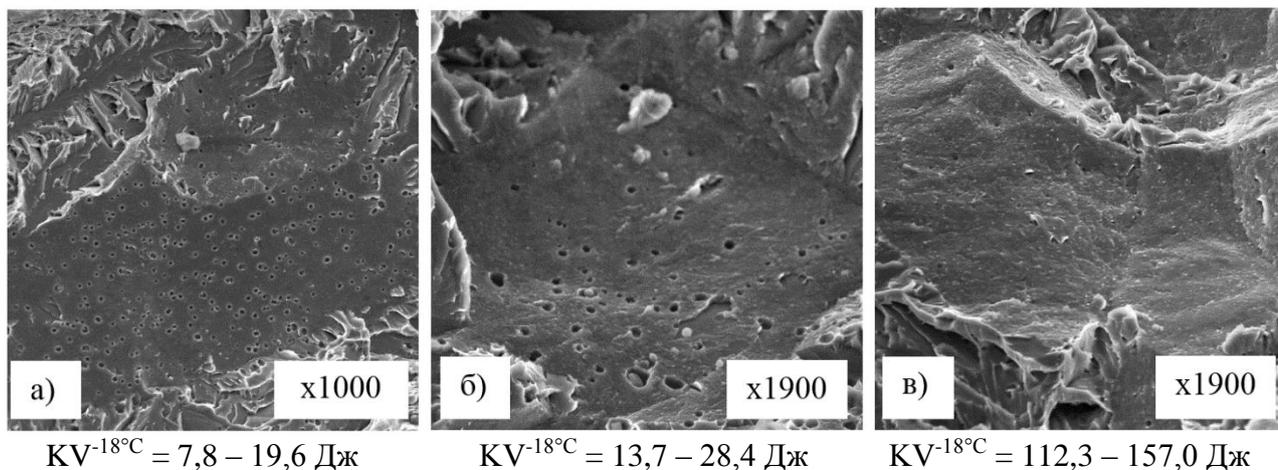


Рисунок 8 – Фрактограммы изломов ударных образцов и работа удара металла шва после различных термических обработок: а) 260°C – 7 ч, б) 300°C – 7 ч, в) 350°C – 7 ч (После охлаждения каждое сварное соединение термообработано по режиму 705°C – 8 ч).

Отсутствие микропор в металле шва и высокий уровень работы удара $KV^{-18^{\circ}C}$ более 112 Дж после послесварочной термической обработки по режиму 350°C - 7 ч подтверждают отсутствие водородного охрупчивания (рис 8 в). Таким образом, низкотемпературную дегидрогенизационную термическую обработку (НДТО) по режиму 350°C – 7,0 ч и по режиму с более высокими ТВП можно использовать в качестве немедленной (промежуточной) послесварочной термической обработки для удаления водорода из сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали.

Зависимость количества вязкой составляющей в изломе (ВИ) от температуры испытания металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в состоянии после отпуска с различными ТВП представлена на рисунке 9. По литературным данным заданы критерии сопротивления металла хрупкому разрушению в процессе изготовления (ВИ не менее 30%). Установлено, что металл шва после сварки или НДТО находится в охрупченном состоянии при температурах 0÷20°C

(ВИ = 0-10 % и ВИ = 5-16 % соответственно). Достаточного сопротивления хрупкому разрушению (ВИ не менее 30%) металл шва достигает при температуре 80°C, поэтому все технологические операции необходимо выполнять с подогревом сварного соединения выше указанной температуры.

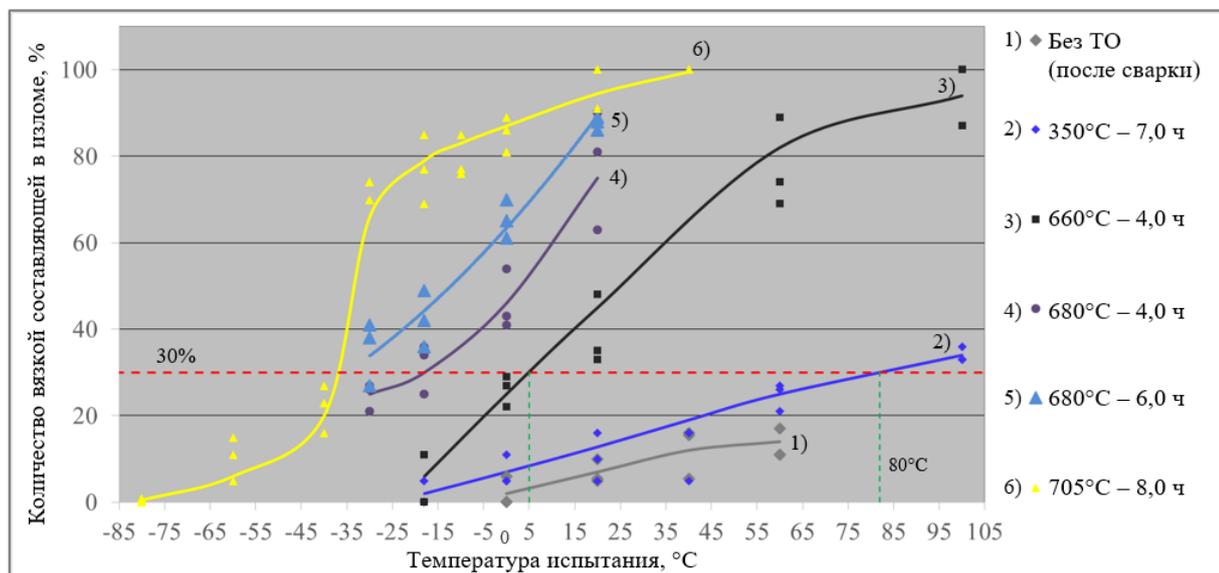


Рисунок 9 – Температурная зависимость ВИ металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в состоянии после различных термических обработок.

Как было показано выше, критерий низкой чувствительности структуры к ДПВ - твердость $\leq 350 \text{ HV}_{10}$ обеспечивается после отпуска с параметром R_{LM} не менее 19,20, что соответствует термической обработке при 660°C не менее 4,0 ч (рис. 6 а). После отпуска по режиму 660°C – 4,0 ч металл шва достигает необходимого уровня сопротивления хрупкому разрушению уже при температуре более 5°C (рис. 9). Сопротивляемость хрупкому разрушению значительно возрастает после отпуска 680°C. Продолжительность отпуска при температуре 680°C должна составлять не менее 2 часов, но при этом на практике температуру сварного соединения не следует опускать ниже 5°C до проведения высокого отпуска.

При исследованиях установлено, что металл ЗТВ сварных соединений имеет достаточно высокий уровень ВИ, а также работы удара как в состоянии после НДТО 350°C–7,0 ч, так и после отпусков при температурах 660-710°C ($KV^{-18^\circ C}$ в диапазоне 176,6-350,0 Дж, ВИ в диапазоне 52-100%). Это указывает на низкую склонность металла ЗТВ сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали к хрупкому разрушению, что

связано с формированием мелкозернистой бейнитной структуры и «самоотпуском» при сварке.

Для уменьшения уровня термических напряжений во время нагрева до температуры высокого отпуска были выполнены расчеты для исследования равномерности температурных полей крупногабаритных сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в процессе послесварочной термической обработки. Расчеты выполняли в программе «ПолигонСофт» применительно к послесварочному отпуску продольного шва крупногабаритной цилиндрической заготовки. Было показано, что в этой заготовке во время нагрева до температуры 660°C имеются значительные – более 55°C перепады температуры по длине шва и перепады температуры до 161°C по телу заготовки, что значительно повышает уровень напряжений и увеличивает вероятность образования трещин (рис.8).

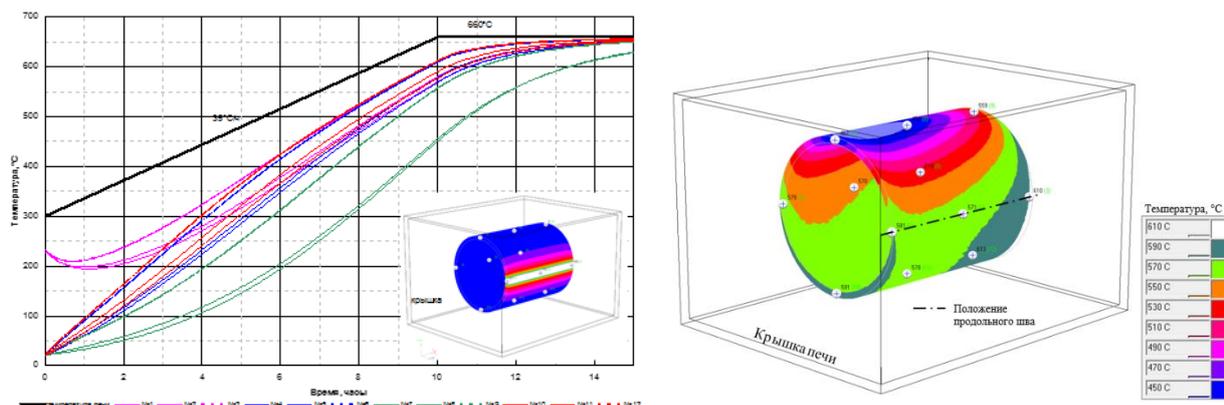


Рисунок 8 –Изменение температуры в контрольных точках сварной заготовки в процессе печного нагрева на температуру отпуска и температурное поле обечайки на момент выхода печи на температуру выдержки 660°C .

С целью уменьшения перепадов температур по всей заготовке во время термической обработки было предложено снижение скорости нагрева при послесварочной термической обработке - не более $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ и введение промежуточной выдержки при температуре 400°C во время нагрева до температуры высокого отпуска.

Опробование предложенных ограничений выполнено расчетным методом применительно к послесварочным отпускам сварного полукорпуса НХР диаметром 5870 мм и толщиной стенки 155 мм. В результате расчетов показано, что использование промежуточной выдержки при 400°C и снижение скорости нагрева до $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ уменьшает перепады температуры по объему заготовки до не более 20°C в процессе нагрева до температуры отпуска (рис. 9). Равномерное распределение

температуры в области сварного соединения и во всем объеме заготовки, безусловно снижает общий уровень напряжений и уменьшает вероятность образования трещин.

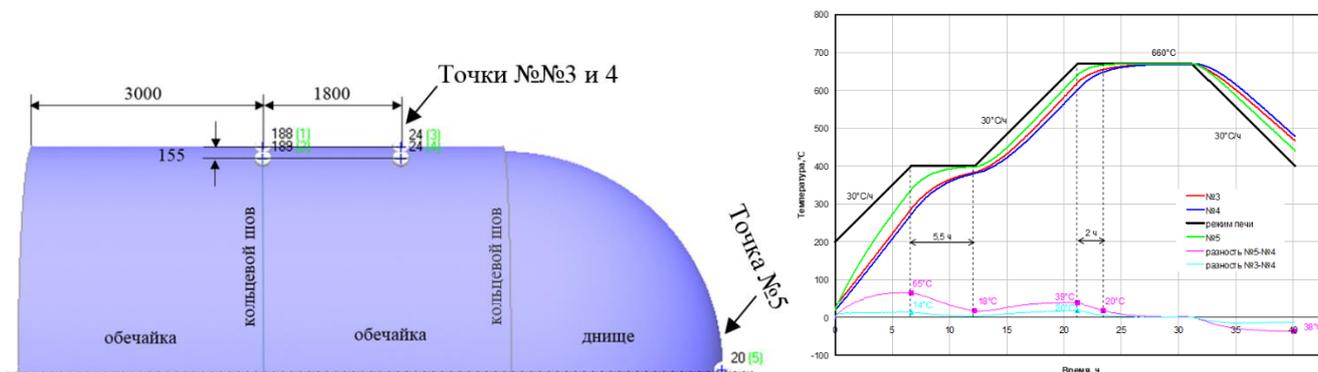


Рисунок 9 – Схема расположения контрольных точек (а) и изменение температуры в контрольных точках (б) при нагреве на отпуск полукопуса НХР. Расчёты выполнены для контрольных точек №3 и 5 (наружная поверхность), №4 (внутренняя поверхность).

Для промышленного использования установлена продолжительность промежуточной выдержки 6 часов при температуре 400°C для выравнивания температурного поля крупногабаритных сварных частей корпусов НХР.

В пятой главе приведены результаты исследований по определению параметров послесварочного отпуска металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, уменьшающих склонность к образованию ТПН.

Присутствие в 2,25Cr-1Mo-V стали активных карбидообразующих элементов увеличивает склонность ее сварных соединений к ТПН, что подтверждается расчетом ряда известных параметров ΔG , ΔG_1 , PSR. Для предотвращения образования ТПН необходимо подобрать температуру отпуска, при которой не происходит интенсивного дисперсионного твердения с упрочнением тела зерна, что выражается в снижении характеристик пластичности.

В данной работе предложена и опробована методика определения склонности к образованию ТПН по «провалу» пластичности при температурах высокого отпуска. Методика включает исследование зависимости относительного сужения от температуры выдержки в диапазоне температур отпуска 600÷680°C с растяжением образца для имитации напряжений и деформаций. Опробование методики выполнено на металле шва 2,25Cr-1Mo-V типа легирования с химическим составом, обуславливающим высокую склонность к трещинам повторного нагрева (К-фактор = $Pb+Bi+0,03 \times Sb = 1,9 \text{ ppm}$). В результате этого моделирования установлено, что выдержка в области температур 640-660°C приводит к

наибольшему снижению – «провалу» пластичности металла шва, что увеличивает его склонность к образованию ТПН (рис. 10). Снижение пластичности следует связать с дисперсионным твердением из-за выделения из твердого раствора карбидов типа M_3C и M_2C , что было показано ранее в главе 3. В процессе выдержки при температурах от 600 до 630°C и выше 660°C металл шва 2,25Cr-1Mo-V обладает более высоким уровнем пластических свойств и, как следствие, меньшей склонностью к образованию ТПН.

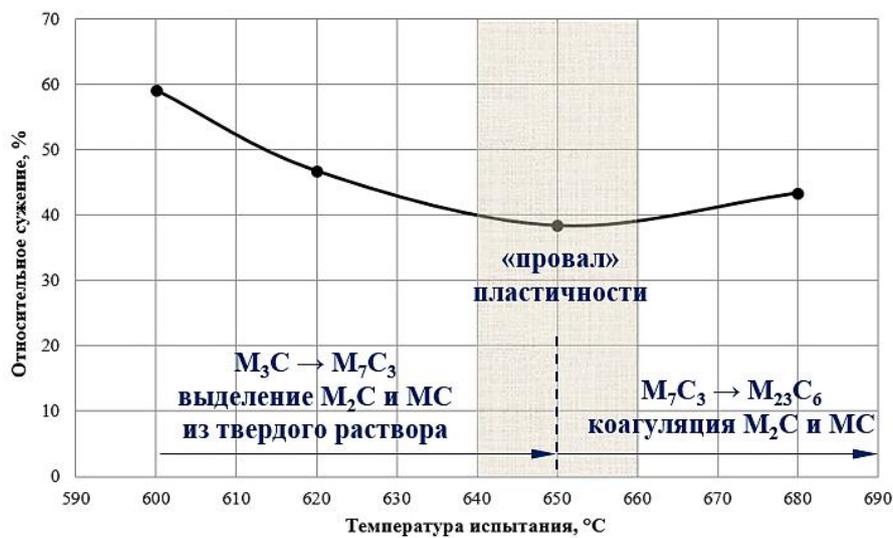


Рисунок 10 – Зависимость пластичности металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали от температуры выдержки при высоком отпуске.

Это было подтверждено при натуральных испытаниях крупногабаритного сварного соединения с металлом шва, склонным к образованию ТПН (величина К-фактора = 1,9 ррт). Для выявления ТПН металл шва подвергали статическому изгибу. Так, после отпусков при 650°C и 660°C в металле шва обнаружены трещины, что, очевидно, связано со снижением пластичности шва 2,25Cr-1Mo-V в области температур 640-660°C (рис.11 а, б).

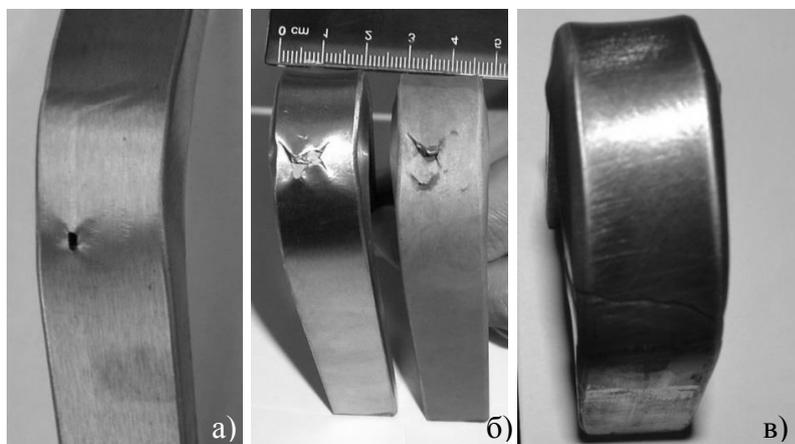


Рисунок 11 - Образцы после испытания на статический боковой изгиб сварного соединения в состоянии после 650°C – 2,5 ч, угол загиба 50° (а), 660°C – 2,5 ч, угол загиба 180° (б), 705°C – 8,0 ч, угол загиба 180° (в).

При металлографических и фрактографических исследованиях установлено, что зародыши трещин, обнаруженных на поверхностях образцов после статического изгиба, обладают признаками ТПН, а именно: имеют межкристаллитное разрушение с мелкочапчатым рельефом и участками «испаренного» рельефа (рис.12).

По результатам натурных испытаний металла шва после НДТО при 350°C и после отпуска при 705°C на поверхностях образцов трещин не обнаружено даже при угле загиба 180°, что свидетельствует о низкой склонности металла шва 2,25Cr-1Mo-V к ТПН. Полученные результаты подтвердили эффективность разработанной методики для исследования склонности металла к ТПН, которая позволяет определить температуру «провала» пластичности и, следовательно, температуру отпуска, при которой возможно образование ТПН в металле шва.

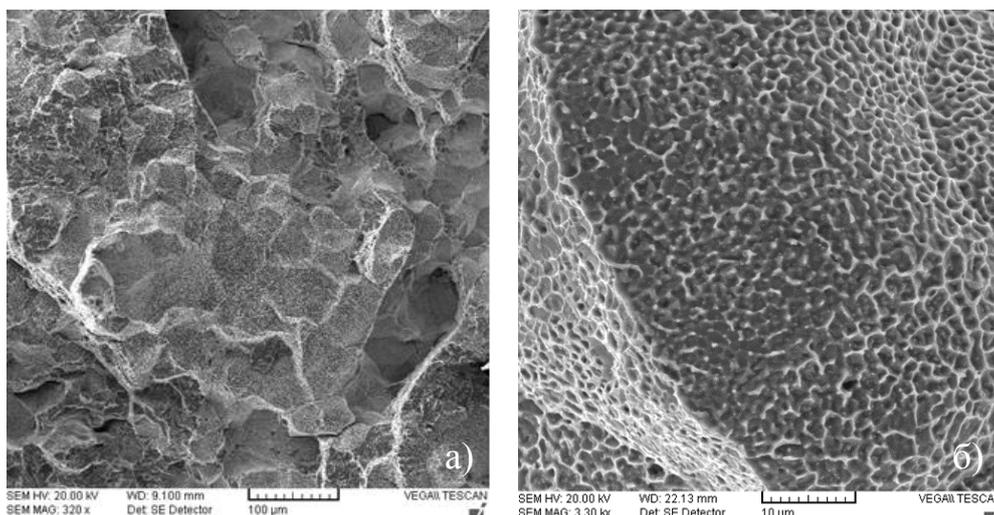


Рисунок 12 - Фрактограммы излома образца по трещинам (рис.11 б):

а – межкристаллитное разрушение с мелкочапчатым рельефом;

б – отдельные межкристаллитные несплошности с испаренным рельефом.

В результате исследований установлено, что температура промежуточного послесварочного отпуска металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали должна соответствовать диапазону 600-630°C или быть выше 670°C (с целью повышения технологичности следует выполнять отпуск при температуре 680°C). Также возможно использовать низкотемпературную термическую обработку при 350°C. Выполнение послесварочного отпуска при температуре 640-660°C следует исключить для уменьшения вероятности образования ТПН.

Шестая глава содержит результаты промышленного опробования и внедрения разработанных в настоящей работе температурного режима сварки и

ТВП послесварочной термической обработки металла сварных соединений корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали, а именно:

- Погонная энергия сварки $\sim 23,0$ кДж/см, температура подогрева $200\div 250^\circ\text{C}$;
- НДТО по режиму 350°C - 7 ч;
- Температурно-временные параметры послесварочных отпусков должны быть в пределах $R_{LM} 20,4 \div 21,1$;
- ПрТО при температуре 680°C не менее 2 ч;
- ОТО при температуре 705°C не менее 8 ч;
- Скорость нагрева до температур НДТО, ПрТО и ОТО не более $30^\circ\text{C}/\text{ч}$;
- При нагреве до температур ПрТО и ОТО непосредственно после сварки или после НДТО применение промежуточной выдержки при температуре 400°C для равномерного прогрева сварного соединения;
- Во время проведения различных технологических операций при изготовлении НХР обеспечение подогрева изделия:
 - после НДТО при температуре 350°C не ниже 80°C ;
 - после промежуточного отпуска при температуре 680°C - 2 ч не ниже 5°C .

К металлу сварных соединений корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали предъявляются жесткие требования по уровню механических свойств. Они должны обладать высоким уровнем прочности при нормальной и повышенной температуре эксплуатации, высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению при низких климатических температурах и тепловому охрупчиванию при достаточной длительной прочности. Эти требования должны обеспечиваться после основной термической обработки минимальной ($OTO_{\text{мин}}$), и максимальной продолжительности ($OTO_{\text{макс}}$), включающей два окончательных отпуска на случай ремонтов в процессе монтажа и эксплуатации НХР.

Согласно выводам, полученным в главах 3÷5, в качестве $OTO_{\text{мин}}$ следует использовать отпуск с R_{LM} не менее 20,4, что соответствует 705°C - 8,0 часов, а $OTO_{\text{макс}}$ не должен превышать $R_{LM} = 21,1$, что соответствует ПрТО 680°C - 10,0 ч + ОТО 705°C - 34,0 ч. Удовлетворительные результаты определения механических свойств промышленных сварных соединений в этих состояниях представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства промышленных сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали и требования лицензиаров НХР

Термообработка (P _{LM})	Предел прочности сварного соединения		Характеристики прочности и пластичности металла шва					Твердость			Статический боковой изгиб	Работа удара		Испытание на стойкость к тепловому охрупчиванию	Длительная прочность сварного соединения	
	Зона	20°C	454°C	20°C		454°C	20°C	OM	ЗТВ	МШ		Шов	ЗТВ			
Т°С испытания	20°C	454°C	20°C		454°C	20°C			20°C		минус 18°C		Шов	ЗТВ	Часов	
Параметр	R _m , МПа	R _m , МПа	R _m , МПа	R _{p0,2} , МПа	A, %	Z, %	R _m , МПа	HV ₁₀			Угол загиба	KV, Дж		Шов	ЗТВ	Часов
ОТО _{мин} 705°C - 8,0 ч (P _{LM} = 20,44)	630-640	470-484	716-730	602-612	18-20	59-63	575-585	180-190	181-213	201-213	180° Дефектов не обнаружено	116,8-146,3	201,0-282,9	-17°C	-104°C	--
ОТО _{макс} 680°C - 10,0 ч 705°C - 32,5 ч (P _{LM} = 21,07)	600-610	466-468	605-614	496-500	23-25	72-75	468-474	167-171	174-182	180-187	180° Дефектов не обнаружено	164,4-186,5	275,4-294,3	-24°C	-127°C	1021 (пов-ть), 1100 (1/2Т)
Требования	585-760	≥456	585-760	415-620	≥18	≥45	≥456	≤ 248			180°, Ø оправки 4т, отсутствие трещин	≥ 55		Tr55 исх+ 2,5ΔTr55 ≤ 10°C	≥ 1000 (538°C/207МПа) после ОТО _{макс}	

Таким образом, использование совокупности разработанных тепловых параметров сварки и ТВП послесварочной термической обработки позволило обеспечить необходимый высокий комплекс служебных свойств и отсутствие дефектов типа холодных трещин и ТПН в сварных соединениях 25 корпусов крупногабаритных НХР (на 2017 год) из 2,25Cr-1Mo-V стали марок SA-336M F22V, SA-182M F22V и SA-542M Type D cl.4a с толщиной свариваемой стенки от 108 до 290 мм и внутренним диаметром от 2400 до 5510 мм.

Основные результаты и выводы

1. На основе комплексного исследования структуры, фазового состава и механических свойств металла сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, а также экспериментального анализа влияния на них тепловых параметров сварки и температурно-временных параметров термической обработки разработана технология послесварочной термической обработки корпусов крупногабаритных НХР, обеспечивающая требуемый высокий уровень служебных свойств и исключая образование трещин.
2. Определена кинетика распада переохлажденного аустенита материалов системы легирования 2,25Cr-1Mo-V, построена термокинетическая диаграмма, определены критические точки $A_{c1} = 790^\circ\text{C}$, $A_{c3} = 872^\circ\text{C}$. Показано, что при многопроходной автоматической сварке под флюсом в металле шва и ЗТВ этой стали образуется полностью бейнитная структура.

3. Установлена зависимость содержания объемной доли мелкозернистой структуры (с размером зерна менее 50 мкм) в металле шва от погонной энергии сварки и определен уровень погонной энергии $q/V \approx 23$ кДж/см, позволяющий обеспечить максимальное количество мелкозернистой (перекристаллизованной) структуры в металле шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали.

4. Изучено влияние тепловых параметров сварки на структуру и твердость металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали. Установлено, что для формирования структуры бейнита с равномерным распределением карбидов необходима температура подогрева в диапазоне 200-250°C.

5. Определены основные фазовые превращения в металле шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали после отпуска в диапазоне $P_{LM} = 13,0 - 21,1$ и установлено следующее:

- отпуск при 650°C ведет к заметному увеличению содержания карбидов MC (преимущественно VC) и карбидов M_2C , что способствует дисперсионному твердению и обеспечивает отпускостойчивость, но повышает склонность к ТПН;
- карбиды MC (VC+NbC), M_2C ((Mo,V,Nb)₂C), M_7C_3 ((Cr,Fe,Mo)₇C₃) и $M_{23}C_6$ ((Cr,Fe,Mo)₂₃C₆), образующиеся при $P_{LM} = 19,3-20,5$, способствуют обеспечению высоких служебных свойств металла шва и повышению его отпускостойчивости;
- длительные выдержки при 705°C ведут к уменьшению содержания ряда карбидов MC, M_7C_3 и $M_{23}C_6$, что приводит к уменьшению характеристик прочности, поэтому параметр отпуска P_{LM} должен быть ограничен «сверху».

6. Разработана и опробована методика определения температурного интервала «провала» пластичности для оценки склонности металла к образованию трещин повторного нагрева (ТПН) в зависимости от температуры высокого отпуска.

7. Определен температурный интервал «провала» пластичности в диапазоне 640-660°C, при котором металл шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали приобретает наибольшую склонность к ТПН. Наименьшей склонностью к ТПН металл шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали обладает при нагреве до температур низкотемпературной дегидрогенизационной термической обработки (НДТО) 350°C или высокого отпуска в диапазоне 600 ÷ 630°C или 680 ÷ 705°C.

8. Исследована эффективность удаления диффузионно-подвижного водорода (ДПВ) из металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали при температурах

260-350°C. Установлено, что для удаления ДПВ эффективной является низкотемпературная термическая обработка по режиму 350°C – 7 ч.

9. Исследована температурная зависимость характеристик вязкости металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали и установлены минимальные температуры проведения технологических операций для предотвращения образования трещин при изготовлении сварных конструкций: не ниже 80°C после НДТО и не ниже 5°C после промежуточного отпуска минимальной продолжительности.

10. Исследовано влияние температурно-временных параметров отпуска на работу удара металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали. Установлено, что для обеспечения низкотемпературной работы удара KV^{-18°C} не менее 55 Дж параметр послесварочного отпуска R_{LM} должен быть не менее 20,05.

11. Изучены температурные поля крупногабаритных сварных заготовок при высоком отпуске. Для снижения перепадов температуры по объему заготовки на стадии нагрева и предотвращения образования холодных трещин установлено ограничение скорости нагрева до температуры выдержки не более 30°C/ч и введена промежуточная выдержка при 400°C - 6,0 ч.

12. На основе результатов выполненных исследований разработана и внедрена в промышленное производство технология послесварочной термической обработки сварных соединений крупногабаритных НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали повышенной прочности, сочетающей низкотемпературную дегидрогенизационную термическую обработку (НДТО) при температуре 350°C, промежуточный отпуск (ПрТО) при 680°C для снятия напряжений и окончательный отпуск (ОТО) при 705°C для обеспечения требуемых служебных свойств. Определен диапазон «суммарного» параметра послесварочного отпуска R_{LM} = 20,4 - 21,1, при котором одновременно обеспечивается отсутствие трещин и требуемый комплекс служебных свойств металла корпусов НХР из 2,25Cr-1Mo-V стали.

Перечень опубликованных работ по теме диссертации

1. Семернина И.Ф., Титова Т.И., Шульган Н.А., Беньямина Я.Ю., Боровской А.С. Опыт изготовления промышленной кованой заготовки из стали 2,25Cr-1,0Mo-0,25V для сосудов нефтехимии // Сборник докладов XV международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». - СПб.: СПбГУНиПТ. – 2009. - С.115-119.

2. **Боровской А.С. Распределение водорода по сечению сварного соединения толстостенного корпуса нефтехимического реактора из стали типа 2,25Cr – 1Mo // Научно-технические ведомости. Наука и образование. Том 2. - СПб.: Издательство Политехнического университета. - 2009. - С.173-176.**
3. Боровской А.С. Опыт использования дегидрогенизационной термообработки при изготовлении толстостенных сварных соединений из низколегированных CrMo и CrMoV сталей // Материалы одиннадцатой международной конференции "Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС", том 1. – 2010 - С.356-362.
4. Семернина И.Ф., Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С., Милякова Л.А. Влияние параметров отпуска на структуру и характеристики прочности хромомолибденованадиевой стали, микролегированной ниобием // Сборник докладов XVI международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». - СПб.: СПбГУНиПТ. - 2011. - С.128-131.
5. Боровской А.С., Титова Т.И., Шульган Н.А., Семернина И.Ф. Исследование влияния послесварочной термообработки на уровень твердости сварных соединений из 2,25Cr-1Mo-0,25V стали. Сборник докладов XVI международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций».- СПб.: СПбГУНиПТ. – 2011. - С.104-107.
6. Боровской А.С. Поведение водорода при сварке Cr-Mo(-V) сталей повышенной прочности // Сборник тезисов докладов Научно-практической конференции молодых специалистов «ИЖОРА - 2011». - СПб.: ОАО «Ижорские заводы». – 2011. - С.28.
7. **Титова Т.И., Семернина И.Ф. Шульган Н.А., Беньяминова Я.Ю. Боровской А.С. Опыт изготовления заготовок из стали 2,25Cr–1,0Mo–0,25V применительно к нефтехимическому оборудованию для глубокой переработки нефти // Тяжелое машиностроение. - 2012. - № 7. - С.35-39.**
8. Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С. Современные требования, предъявляемые к сварочным материалам для сварки нефтехимических сосудов давления, изготавливаемых из стали типа легирования 2,25Cr-1Mo-0,25V // Петраньевские чтения. Сварочные материалы - 2012: доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2012. - С.193-201.
9. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Жучков Д.В., Шульган Н.А., Боровской А.С. Корреляционно-регрессионный анализ зависимости длительной прочности сварных соединений стали 2,25Cr-1Mo-0,25V от химического состава // Сборник трудов Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата. - 2014. - № 1. - С.184-192.
10. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Жучков Д.В., Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С. Анализ зависимости длительной прочности сварных соединений хромомолибденованадиевой стали от химического состава // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: Материалы 17-й Международной научно-практической конференции. – 2015. - С. 77-84.

11. Титова Т.И., Шульган Н.А, Бочаров С.А., Боровской А.С., Егорова Е.А. Определение содержания диффузионно-подвижного водорода и исследование его влияния на свойства наплавленного металла стали типа 2,25Cr-1Mo-0,25V // Петраньевские чтения. «Сварочные материалы - 2015». Доклады III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции. - 2015. - С.149-154.
12. Боровской А.С., Титова Т.И., Шульган Н.А. Исследование влияния температуры послесварочного отпуска на склонность к образованию трещин повторного нагрева металла шва сварных соединений сталей типа 2,25Cr-1Mo-V // Тяжелое машиностроение. - 2017. - №11-12. - С. 24-28.
13. Боровской А.С., Титова Т.И., Шульган Н.А. Выбор режимов термообработки, снижающих склонность металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V сталей к образованию трещин повторного нагрева. // Тяжелое машиностроение. - 2018. - №7-8. - С. 2-7.