

*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 16<sup>00</sup> 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](http://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).

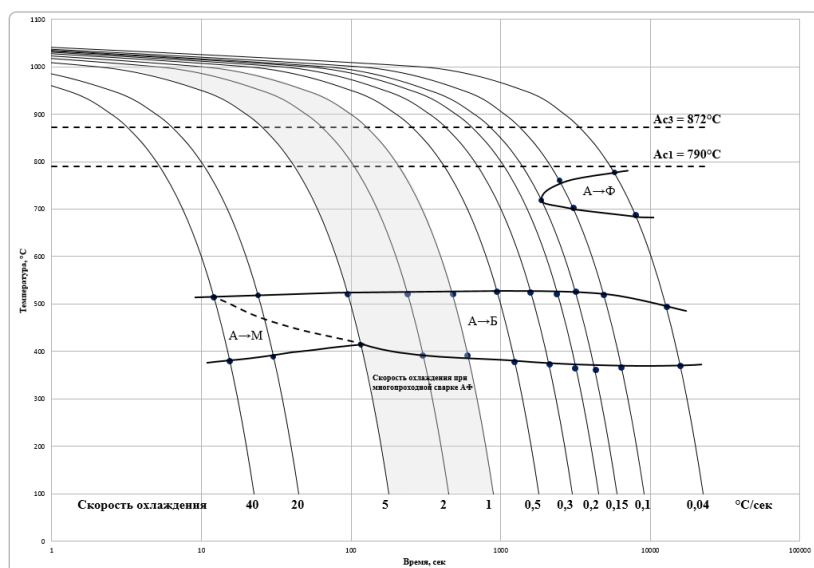


Рисунок 1 – Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита 2,25Cr-1Mo-V стали.



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).

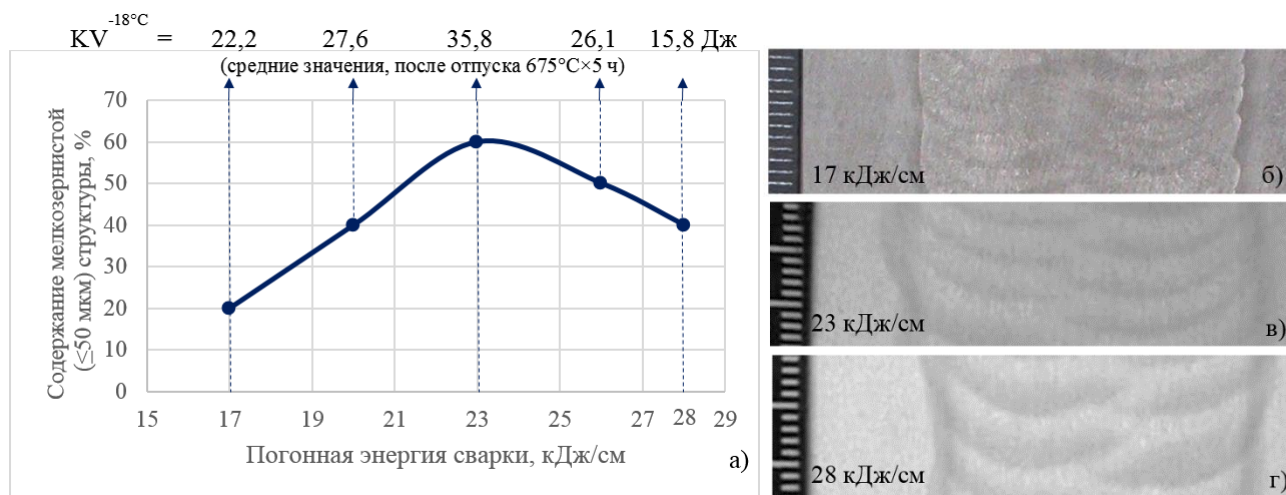


Рисунок 2 – Влияние погонной энергии сварки на объемное содержание распавшегося аустенита с размером зерна менее 50 мкм в структуре металла шва и на работу удара металла шва.

На рисунке 2 также показано, что увеличение доли мелкозернистой структуры способствует росту низкотемпературной работы удара металла шва, достигающей максимального уровня  $KV^{-18^\circ C} = 35,8$  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  $KV^{-18^\circ C}$ . 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  $KV^{-18^\circ C}$ . 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°С (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.

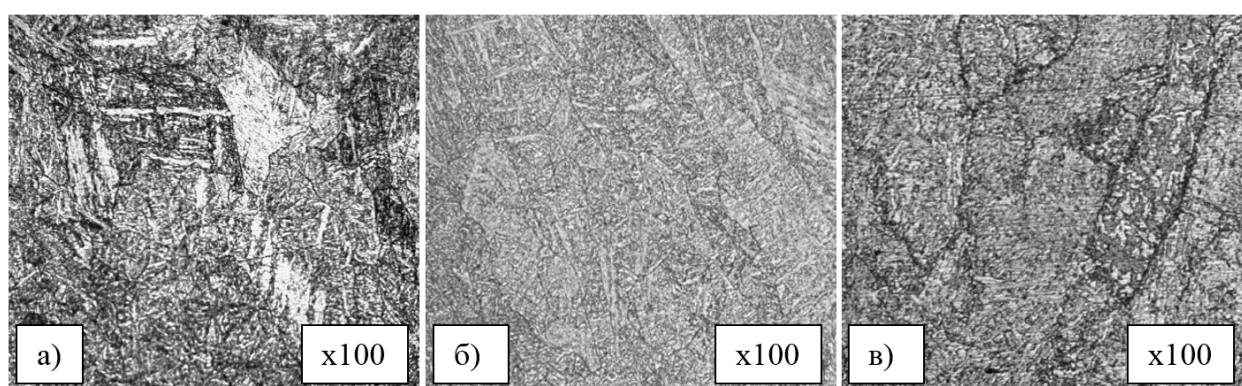


Рисунок 3 – Микроструктура металла шва, выполненного без подогрева (а), с подогревом 200°C (б) и 300°C (в).

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  $660^{\circ}\text{C}$  ( $19,3 R_{LM}$ ) 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  $730^{\circ}\text{C}$  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).

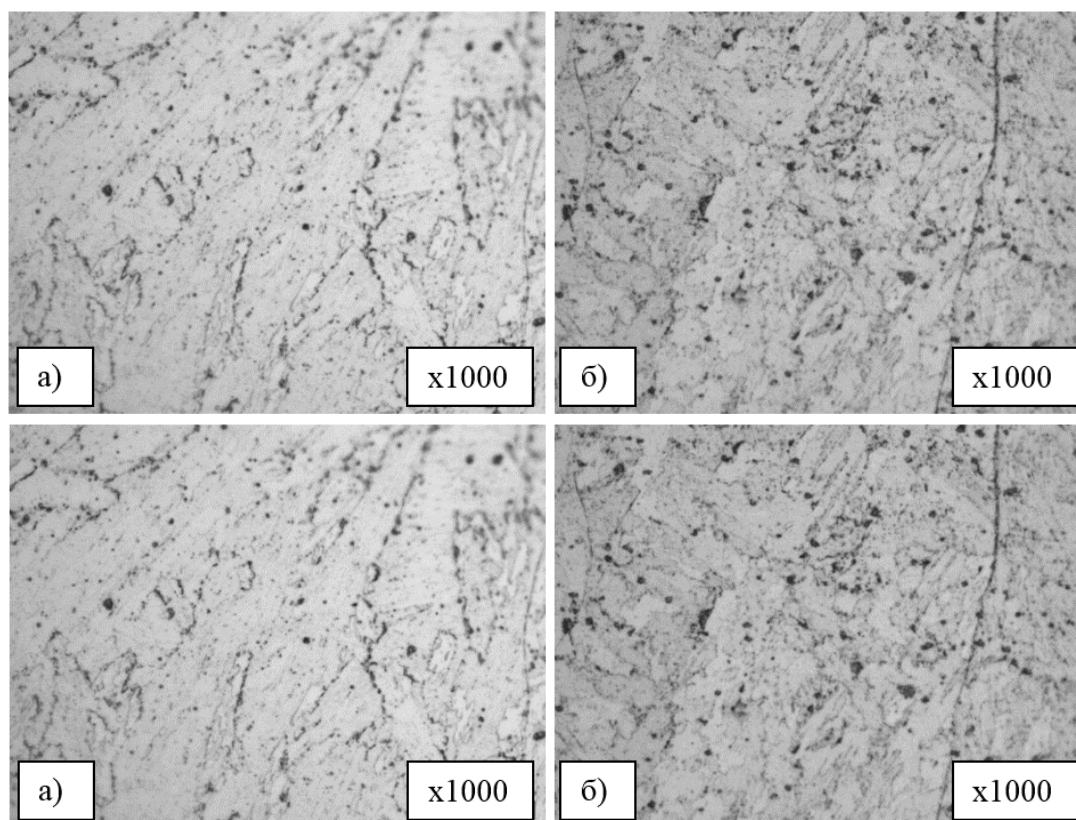


Рисунок 4 – Микроструктура металла шва после различных термических обработок: а)  $350^{\circ}\text{C}$  ( $13,0 R_{LM}$ ), б)  $660^{\circ}\text{C}$  ( $19,3 R_{LM}$ ), в)  $705^{\circ}\text{C}$  ( $20,5 R_{LM}$ ), г)  $760^{\circ}\text{C}$  ( $21,6 R_{LM}$ ).

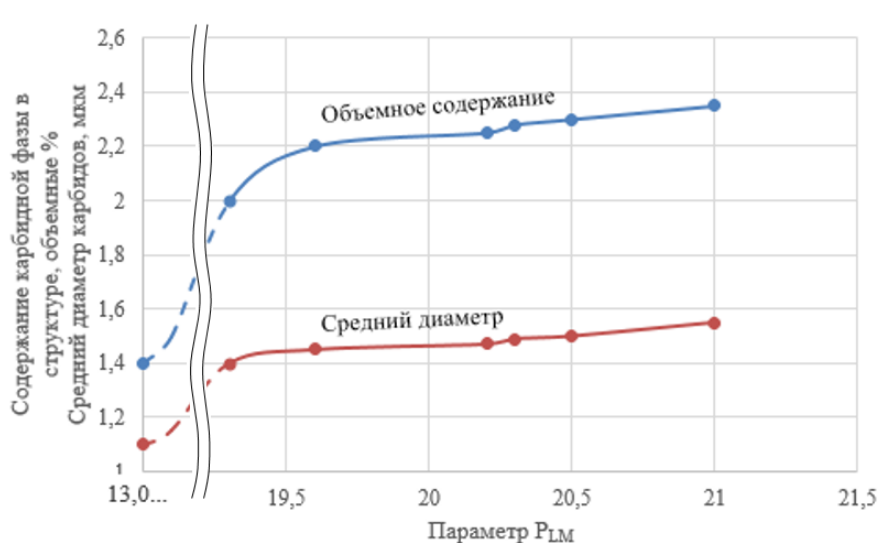


Рисунок 5 – Объемное содержание карбидной фазы в структуре металла шва и средний диаметр карбидов в зависимости от параметра отпуска  $R_{LM}$ .

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<sup>-18°C</sup> для металла шва в зависимости от параметра отпуска  $R_{LM}$  (рис.7).

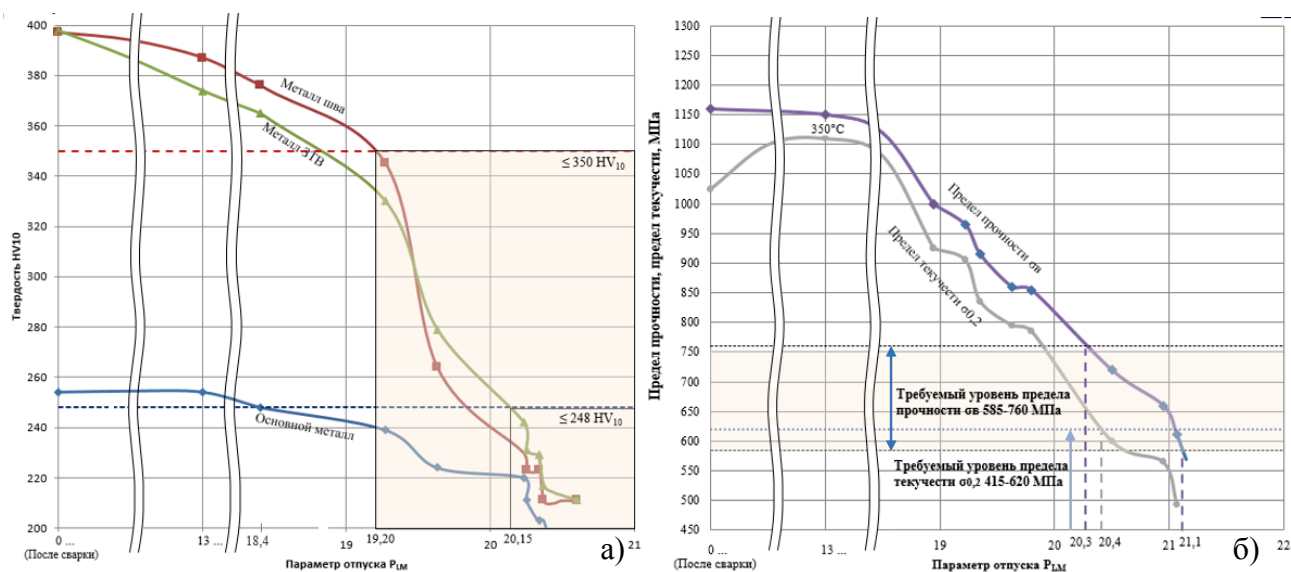


Рисунок 6 – Зависимости твердости сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали (а) и характеристик прочности металла шва (б) от параметра отпуска  $R_{LM}$ .

Установлено, что для снижения твердости ниже критического значения 350 HV<sub>10</sub> и подтверждения отсутствия хрупких структур в металле сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали, параметр P<sub>LM</sub> 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 HV<sub>10</sub>) и работы удара металла шва (KV<sup>-18°C</sup> не менее 55 Дж) параметры послесварочных отпусков должны находиться в диапазоне P<sub>LM</sub>=20,4÷21,1, что соответствует отпуску при 705°C - 8÷37 ч (рис.6, 7).

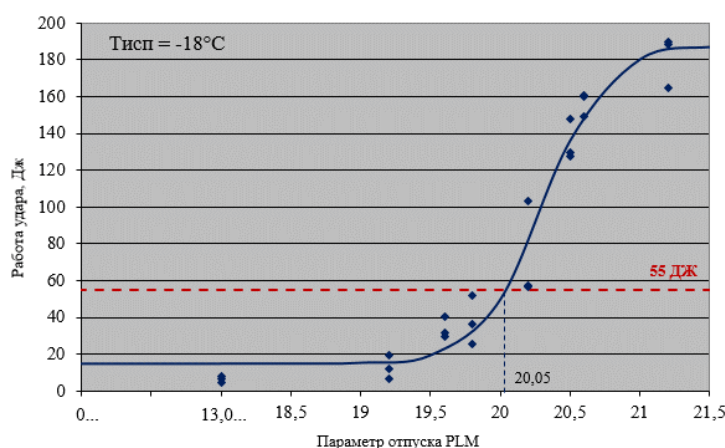


Рисунок 7 - Работа удара KV<sup>-18°C</sup> металла шва сварного соединения 2,25Cr-1Mo-V стали в зависимости от параметра отпуска P<sub>LM</sub>

**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 HV<sub>10</sub>, 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.

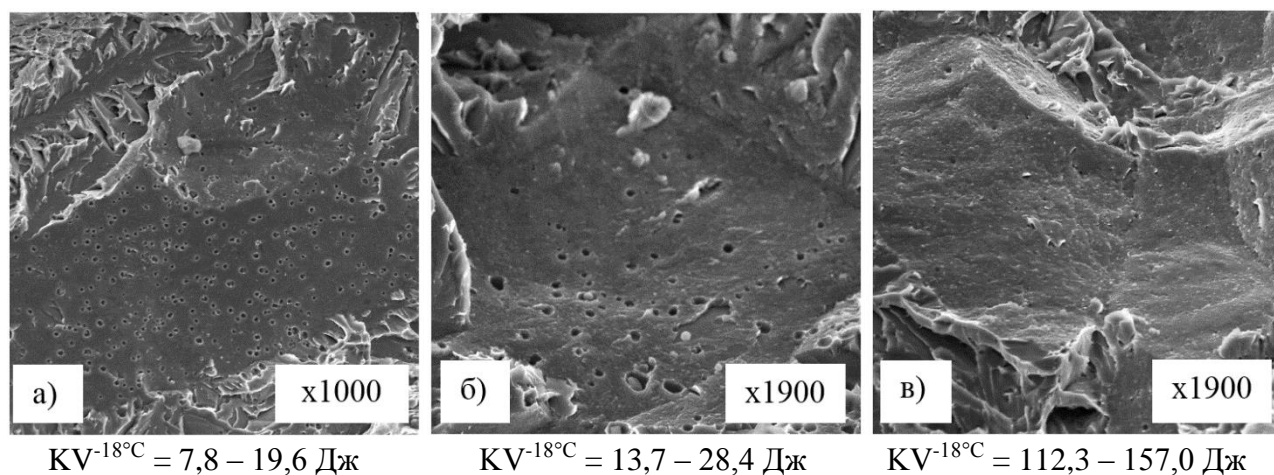


Рисунок 8 – Фрактограммы изломов ударных образцов и работа удара металла шва после различных термических обработок: а) 260°C – 7 ч, б) 300°C – 7 ч, в) 350°C – 7 ч (После охлаждения каждое сварное соединение термообработано по режиму 705°C – 8 ч).

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.

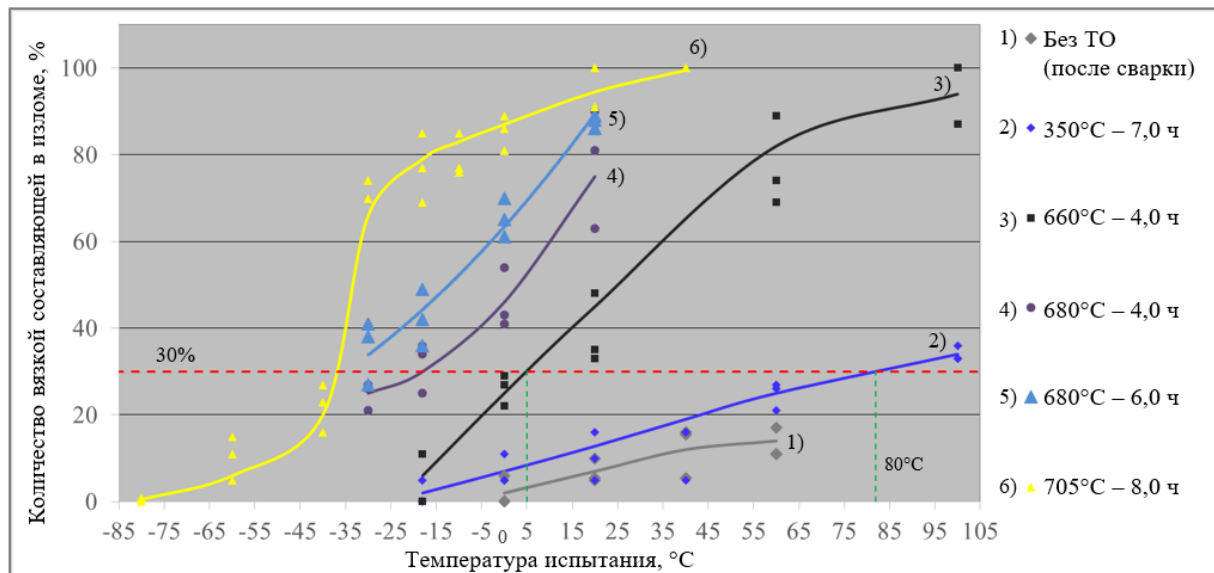


Рисунок 9 – Температурная зависимость ВИ металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали в состоянии после различных термических обработок.

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).

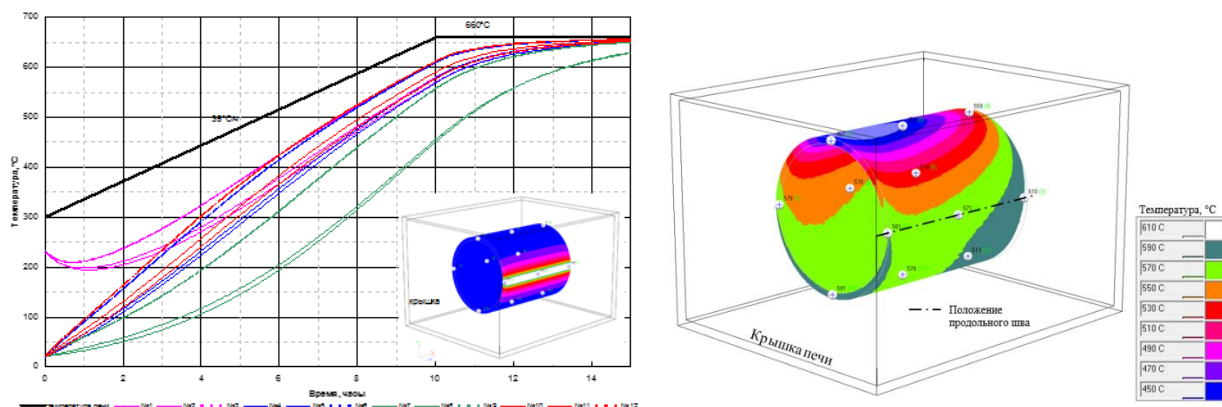


Рисунок 8 –Изменение температуры в контрольных точках сварной заготовки в процессе печного нагрева на температуру отпуска и температурное поле обечайки на момент выхода печи на температуру выдержки 660°C.

С целью уменьшения перепадов температур по всей заготовке во время термической обработки было предложено снижение скорости нагрева при послесварочной термической обработке - не более 30°C/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°C/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.

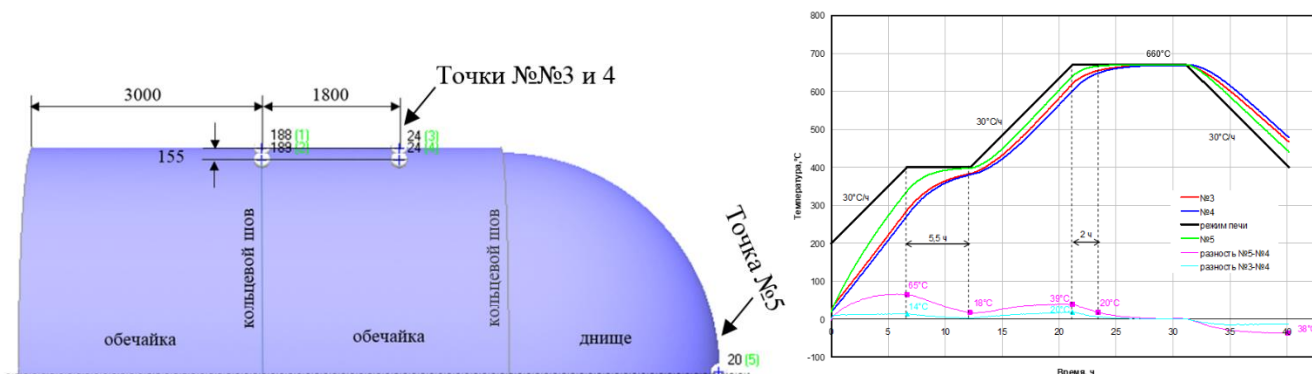


Рисунок 9 – Схема расположения контрольных точек (а) и изменение температуры в контрольных точках (б) при нагреве на отпуск полукопуса НХР. Расчёты выполнены для контрольных точек №3 и 5 (наружная поверхность), №4 (внутренняя поверхность).

Для промышленного использования установлена продолжительность промежуточной выдержки 6 часов при температуре 400°С 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  $\Delta G$ ,  $\Delta G_1$ , 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°С 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°С 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.

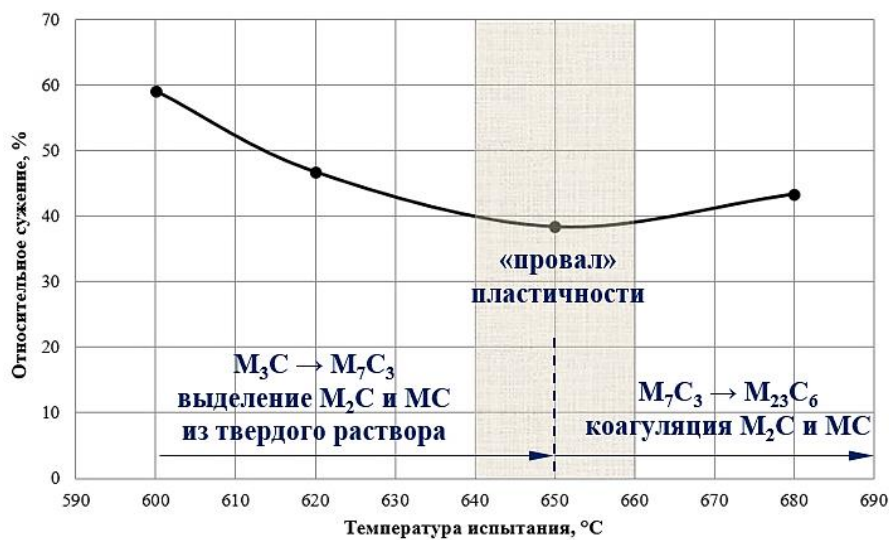


Рисунок 10 – Зависимость пластичности металла шва сварных соединений 2,25Cr-1Mo-V стали от температуры выдержки при высоком отпуске.

Это было подтверждено при натуральных испытаниях крупногабаритного сварного соединения с металлом шва, склонным к образованию ТПН (величина К-фактора = 1,9 ppm). 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).

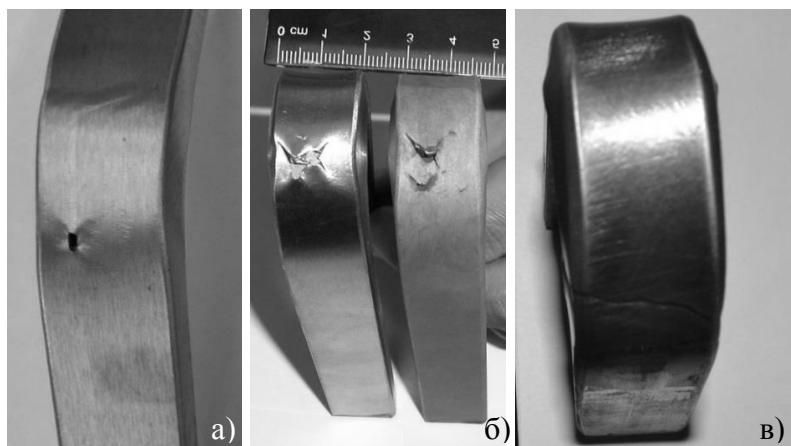


Рисунок 11 - Образцы после испытания на статический боковой изгиб сварного соединения в состоянии после 650°C – 2,5 ч, угол загиба 50° (а), 660°C – 2,5 ч, угол загиба 180° (б), 705°C – 8,0 ч, угол загиба 180° (в).

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 мелкоямочным 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.

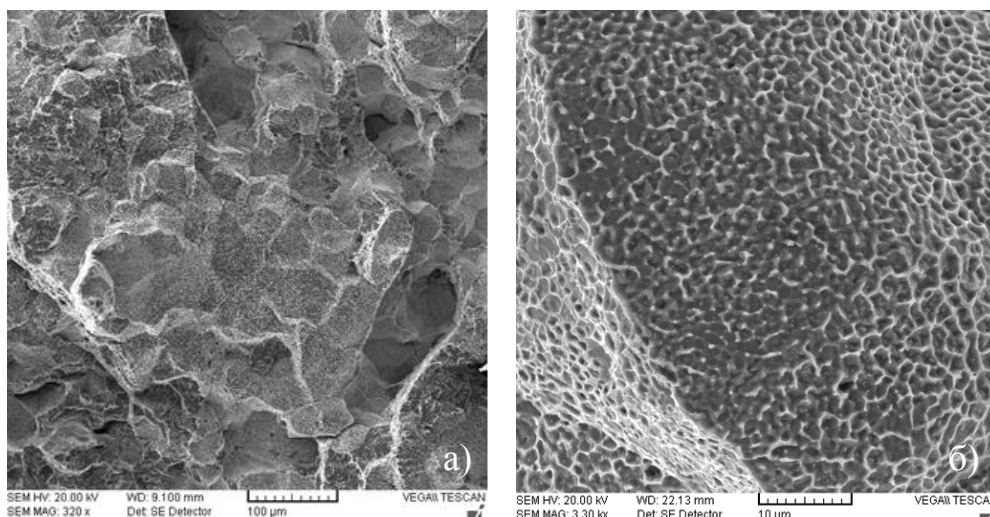


Рисунок 12 - Фрактограммы излома образца по трещинам (рис.11 б):

а – межкристаллитное разрушение с мелкоямочным 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  $350^\circ\text{C}$  - 7 ч;
- Температурно-временные параметры послесварочных отпусков должны быть в пределах  $R_{LM} 20,4 \div 21,1$ ;
- ПрТО при температуре  $680^\circ\text{C}$  не менее 2 ч;
- ОТО при температуре  $705^\circ\text{C}$  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  $400^\circ\text{C}$  для равномерного прогрева сварного соединения;
- Во время проведения различных технологических операций при изготовлении НХР обеспечение подогрева изделия:
  - после НДТО при температуре  $350^\circ\text{C}$  не ниже  $80^\circ\text{C}$ ;
  - после промежуточного отпуска при температуре  $680^\circ\text{C}$  - 2 ч не ниже  $5^\circ\text{C}$ .

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  $705^\circ\text{C}$  - 8,0 часов, а  $OTO_{\text{макс}}$  не должен превышать  $R_{LM} = 21,1$ , что соответствует ПрТО  $680^\circ\text{C}$  - 10,0 ч + ОТО  $705^\circ\text{C}$  - 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 <sub>LM</sub> )  | 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             |           |         | минус 18°C                                  |                           |              |                              |   |   |
| Т°С испытания  | R <sub>m</sub> , МПа                 | R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>m</sub> , МПа                                | R <sub>p0,2</sub> , МПа | A, %  | Z, %  | R <sub>m</sub> , МПа | HV <sub>10</sub> |           |         | Угол загиба                                 | KV, Дж                    |              | Шов                          | ЗТВ   | Часов   |
| ОТО <sub>мин</sub><br>705°C - 8,0 ч<br>(P <sub>LM</sub> = 20,44)                     | 630-640                              | 470-484              | 716-730   | 602-612                 | 18-20 | 59-63 | 575-585              | 180-190          | 181-213   | 201-213 | 180°<br>Дефектов не обнаружено              | 116,8-146,3               | 201,0-282,9  | -17°C                        | -104°C  | --  |
| ОТО <sub>макс</sub><br>680°C - 10,0 ч<br>705°C - 32,5 ч<br>(P <sub>LM</sub> = 21,07) | 600-610                              | 466-468              | 605-614   | 496-500                 | 23-25 | 72-75 | 468-474              | 167-171          | 174-182   | 180-187 | 180°<br>Дефектов не обнаружено              | 164,4-186,5               | 275,4-294,3  | -24°C                        | -127°C  | 1021 (пов-ть),<br>1100 (1/2Т)                         |
| Требования   | 585-760                              | ≥456                 | 585-760   | 415-620                 | ≥18   | ≥45   | ≥456                 | ≤ 248            |           |         | 180°,<br>Ø оправки 4т,<br>отсутствие трещин | ≥ 55                      |              | Tr55 исх+<br>2,5ΔTr55 ≤ 10°C |   | ≥ 1000<br>(538°C/207МПа)<br>после ОТО <sub>макс</sub> |

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)<sub>2</sub>C),  $M_7C_3$  ((Cr,Fe,Mo)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) и  $M_{23}C_6$  ((Cr,Fe,Mo)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>), 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<sup>-18°C</sup> не менее 55 Дж параметр послесварочного отпуска R<sub>LM</sub> 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<sub>LM</sub> = 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.