

УДК 621.791.04:039.536.2
ГРНТИ 81.35

На правах рукописи



Шубин Олег Владимирович

**«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КОРПУСОВ ВВЭР ИЗ
СТАЛИ 15Х2НМФА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОВЫШЕНИЕ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛА
СВАРНЫХ ШВОВ»**

Специальность: 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и Филиале Акционерного общества «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск

Научный руководитель Кандидат технических наук
Тимофеев Михаил Николаевич

Официальные оппоненты:

**Коберник
Николай
Владимирович** Доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ имени Н.Э. Баумана» (ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»), директор

**Зернин
Евгений
Александрович** Кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), заведующий кафедрой сварки судовых конструкций

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится **25 марта 2026 года** на заседании диссертационного совета 75.1.018.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.crism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=51>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 75.1.018.01
доктор технических наук, профессор



Е.И. Хлусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Корпус водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) является несменяемым элементом ядерной установки, во многом определяющим срок эксплуатации АЭС. Общепринятым условием обеспечения безопасной эксплуатации корпуса реактора (далее – КР) является обеспечение целостности по критерию сопротивления хрупкому разрушению (СХР) всех его элементов при всех режимах эксплуатации, в том числе, при аварийном расхолаживании.

Объективно, по характеристикам СХР, сварные швы КР существенно уступают заготовкам основного металла из стали типа 15Х2НМФА. Так, требование к значению исходной критической температуры хрупкости (T_{K0}) металла обечайки активной зоны – не выше минус 45 °С, патрубковых обечаек – не выше минус 35 °С, днища и фланца – не выше минус 20 °С, тогда как требование к T_{K0} сварного шва – не выше минус 15 °С. При этом, обеспечение данного требования для сварного шва, выполняемого методом автоматической сварки под флюсом (АСФ) с применением сварочной проволоки марки Св-09ХГНМТАА-ВИ и сварочного флюса марки ФЦ-16А, является сложной задачей при изготовлении оборудования КР Филиалом АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск.

Отсутствие стабильности в обеспечении T_{K0} металла шва приводит к необходимости селективного отбора сочетаний сварочная проволока – сварочный флюс по результатам входного контроля материалов. Неполучение требуемого значения T_{K0} при испытании производственных контрольных сварных соединений требует проведения повторных испытаний. Все вместе приводит к увеличению срока изготовления КР, а также к существенному повышению издержек машиностроительного предприятия.

Проблема снижения СХР материалов КР, в том числе сварных швов, в процессе воздействия эксплуатационных факторов широко освещена исследованиями НИЦ «Курчатовский институт», ЦНИИ КМ «Прометей», НПО «ЦНИИТМАШ», НИАР. Выработанные мероприятия, в основном, заключающиеся в ограничении содержания примесных элементов (фосфора, меди, олова и ряда других), а также легирующего элемента никеля в металле, позволили снизить степень деградации механических свойств в процессе воздействия нейтронного облучения. Однако исходные показатели СХР металла сварного шва в сравнении с заготовками основного металла остаются низкими.

Существующая тенденция к увеличению ресурса ВВЭР ставит задачу повышения СХР металла сварных швов КР из стали 15Х2НМФА за счет разработки технологических мероприятий при сварке.

Цель работы – повышение характеристик СХР металла шва стали 15Х2НМФА путем разработки технологии автоматической сварки под флюсом с применением сварочной проволоки Св-09ХГНМТАА-ВИ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Установить технологические факторы сварки и термической обработки, приводящие к снижению СХР металла шва.
2. Обосновать метод повышения СХР металла шва за счет технологических параметров сварки.
3. Обосновать метод повышения СХР за счет применения низкоактивного сварочного флюса.
4. Разработать технологию автоматической сварки с применением разработанных технологических мероприятий и сочетания сварочных материалов.
5. Провести испытания металла шва и сварного соединения для подтверждения правильности разработанной технологии.

Диссертация выполнена в соответствии с планом основных научных работ «НИЦ Курчатовский институт- ЦНИИ КМ «Прометей» и производственными планами Филиала АО «АЭМ- технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск.

Объектом исследования является металл сварных швов КР из стали типа 15Х2НМФА, выполненных автоматической сваркой под флюсом с применением проволоки марки Св-09ХГНМТАА-ВИ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что снижение скорости охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С менее 2 °С/с является причиной структурной неоднородности металла шва – образования участков структурно-свободного феррита в бейнитной матрице, что приводит к снижению ударной вязкости металла шва ниже критериального значения 59 Дж/см² при температуре минус 15 °С.
2. Выявлено снижение ударной вязкости металла шва состава 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo после промежуточного отпуска при температуре 620 °С продолжительностью свыше 10 ч, что связано с процессом ослабления когезивной прочности границ зерен из-за образования на них специальных легированных карбидов типа Cr₂₃C₆, Cr₇C₃ и MoC.
3. Выявлена закономерность снижения сопротивления хрупкому разрушению за счет повышения содержания в металле шва кислорода свыше 0,04 %, входящего в состав неметаллических включений, при протекании кремний-восстановительного процесса на стадии взаимодействия жидкой шлаковой и металлической фаз.
4. Установлено, что сварка под флюсом модулированным переменным током, в сравнении с постоянным током обратной полярности, позволяет снизить критическую температуру хрупкости металла шва до минус 25 °С за счет снижения содержания в нем кислорода с 0,04 % до 0,02 %.
5. Предложен и научно обоснован метод снижения критической температуры хрупкости металла шва стали 15Х2НМФА до гарантированного значения минус 35 °С за счет применения низкоактивного агломерированного сварочного флюса.

6. Установлена корреляционная зависимость между референсной температурой T_{100} (T_0) и критической температурой хрупкости T_{K0} для 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo металла шва, выполненного по предлагаемой технологии: $T_{100} (T_0) = T_{K0} - 29,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Практическая значимость работы:

1. Научно обоснованные технологические параметры автоматической сварки под флюсом корпуса реактора из стали 15X2НМФА, обеспечивающие соответствие сопротивления хрупкому разрушению металла шва требованиям конструкторской документации, внесены в производственно-технологическую документацию завода «Атоммаш» при изготовлении оборудования экспортных блоков АЭУ (акт внедрения диссертационной работы от Филиала «Атоммаш» АО «АЭМ-технологии»).

2. Проведены аттестационные испытания нового сочетания сварочных материалов – сварочной проволоки марки Св-09ХГНМТАА-ВИ и низкоактивного агломерированного флюса марки 48АФ-71, обеспечивающего повышение СХР металла сварных швов до уровня требований к заготовкам основного металла – стали 15X2НМФА (акт внедрения диссертационной работы от АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»).

Личный вклад автора заключается в научном обосновании выбора технологических параметров автоматической сварки под флюсом, определении взаимосвязи технологических параметров сварки с химическим и фазовым составом металла шва, механическими свойствами металла шва и сварного соединения; разработке сочетания сварочных материалов, программ их аттестации и производственном внедрении; разработке технологии сварки с применением нового сочетания сварочных материалов; в изготовлении контрольных сварных соединений, изготовлении и испытании образцов, публикации результатов научных исследований по теме диссертации и подготовке докладов к научно-практическим конференциям.

Степень достоверности научных результатов подтверждена большим объемом экспериментальных данных, полученных в производственных условиях завода «Атоммаш», а также положительным опытом применения результатов работы при изготовлении натурных контрольных сварных соединений в производственных условиях завода.

Положения, выносимые на защиту

1. Факторы снижения сопротивления хрупкому разрушению 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo металла шва корпуса реактора из стали 15X2НМФА в процессе его изготовления.

2. Закономерности формирования структуры 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo металла шва при различных термокинетических условиях охлаждения при многопроходной сварке.

3. Метод повышения сопротивления хрупкому разрушению металла шва при использовании источников питания сварочной дуги модулированным переменным током.

4. Метод повышения характеристик сопротивления хрупкому разрушению металла шва при использовании низкоактивного агломерированного сварочного флюса.

Апробация работы: основные результаты работы были представлены на международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах: XVIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», 19-20 мая 2022 г., Волгодонск; XX Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», 19 сентября 2024 г., Волгодонск; XIII Национальной научно-технической конференции, 9-10 ноября 2023 г., Москва; XIV Национальной научно-технической конференции, 7-8 ноября 2024 г., Москва; V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения», 23-25 мая 2023 г., АО «ЦНИИТМАШ», г. Москва.

Публикации: основные результаты диссертационной работы нашли отражение в 11 печатных трудах, в том числе в 2 статьях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 7 статьях в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 4 – в других научных изданиях и материалах конференций.

Структура и объем диссертационной работы: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка используемой литературы. Объем составляет 206 страниц текста, включая 99 рисунков и 26 таблиц. Список литературы содержит 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** приведены описание устройства корпуса ВВЭР, изложена последовательность основных технологических операций при изготовлении КР, приведены требования к основному материалу корпуса, описан эволюционный путь развития материалов, применяемых для автоматической сварки под флюсом, описано воздействие эксплуатационных факторов на свойства материалов КР. Приведенный статистический анализ свойств металла шва и сварных соединений при изготовлении оборудования КР современных проектов, начиная с ВВЭР-1200, на заводе «Атоммаш» показал, что применяемые сварочные материалы и технология сварки делают задачу обеспечения требуемого значения критической температуры хрупкости – не выше минус 15 °С для металла шва – трудно достижимой.

Вторая глава посвящена выбору методик исследований, использованных для решения поставленных научных задач. В частности, выбору оборудования и технологии сварки, термической обработки и неразрушающего контроля, определения химического состава, механических свойств, характеристик СХР, твердости, металлографических, дилатометрических и фрактографических исследований металла шва и сварного соединения.

Третья глава посвящена исследованию причин снижения исходной критической температуры металла шва КР из стали 15Х2НМФА. По результатам анализа испытаний 35-и вариантов сварных швов состава 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo установлено, что во всех случаях при содержании кремния в составе металла шва 0,41 % и выше, рисунок 1, критическая температура хрупкости имеет повышенные значения.



Рисунок 1 – Значения T_{K0} при различном содержании кремния

При этом, содержание кремния в металле шва больше, чем в сварочной проволоке и основном металле, что объясняется протеканием кремний-восстановительного процесса по реакции (1):



в высокотемпературной зоне, охватывающей капли металла, проходящие дуговой промежутком и головную часть сварочной ванны. При остывании (хвостовая часть сварочной ванны) направление реакции (1) меняется, восстановленный кремний начинает раскислять металл, причем доля частиц SiO_2 не успевают покинуть кристаллизирующийся металл и остаются в нем в виде эндогенных неметаллических включений.

Проведенный металлографический анализ металла шва в зоне надреза образца Шарпи, имеющего удовлетворительные, рисунок 2 а, и неудовлетворительные, рисунок 2 б, значения ударной вязкости, показал наличие во втором случае обширных участков структурно-свободного феррита в бейнитной матрице.

Результаты исследования отклонений технологических параметров сварки от рекомендованных: превышение температуры подогрева, рисунок 3а, превышение сварочного тока, рисунок 3б, и скорости сварки, рисунок 3в, – показали, что во всех рассмотренных случаях наблюдается снижение ударной вязкости.

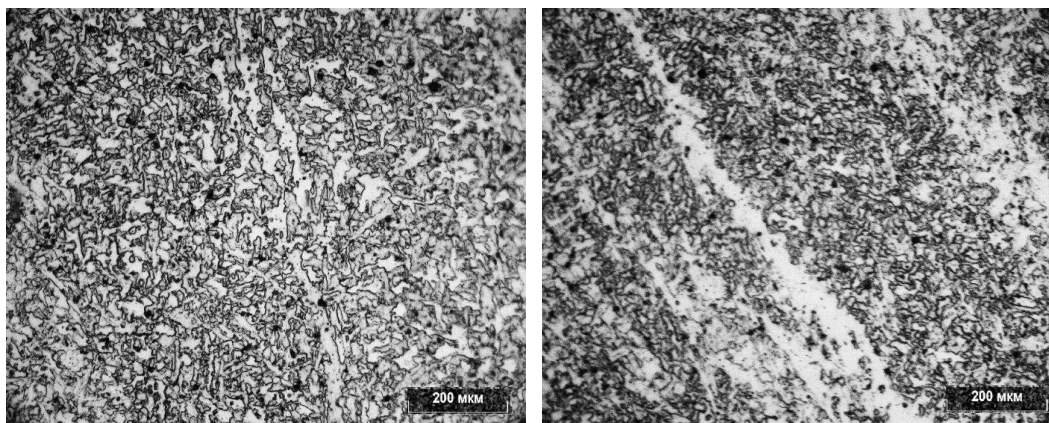


Рисунок 2 – Структура металла шва в зоне разрушения образца Шарпи при температуре минус 15 °С: а – с удовлетворительным значением ударной вязкости; б – с неудовлетворительным значением ударной вязкости

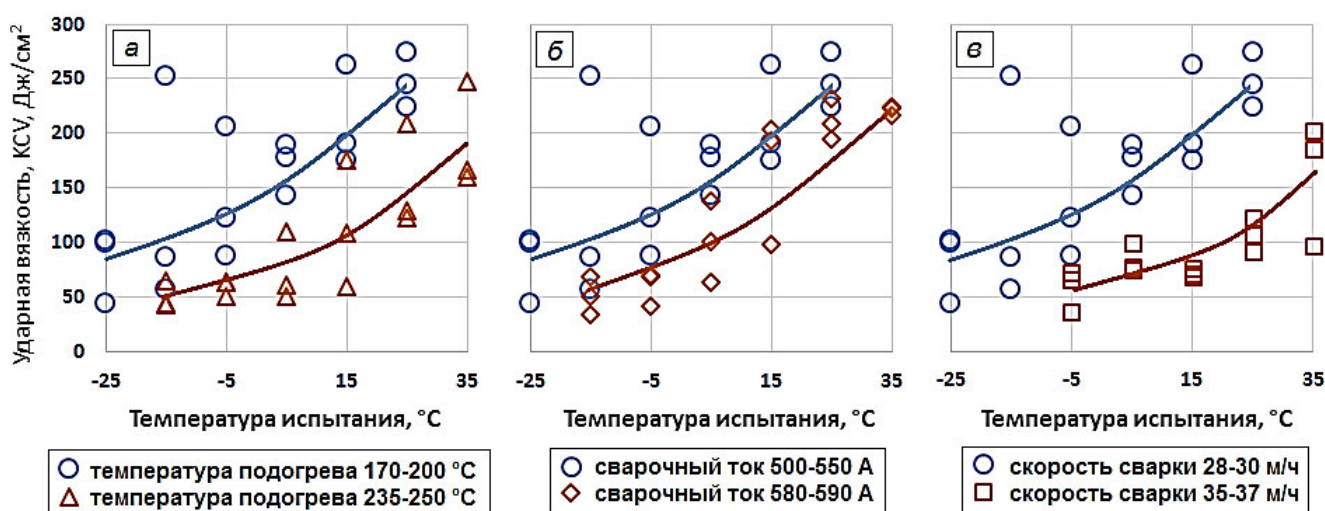


Рисунок 3 – Результаты испытаний на ударный изгиб металла шва при различных технологических параметрах: температуре сопутствующего подогрева (а), величине сварочного тока (б), скорости сварки (в)

Высокий разброс значений ударной вязкости объясняется попаданием надреза образца Шарпи в различные участки кристаллической структуры металла шва. В случае повышения температуры предварительного подогрева и величины сварочного тока выявлена структурная неоднородность, как показано на рисунке 2 б. Повышение скорости сварки привело к изменению формы и количества неметаллических включений. При использовании рекомендуемых параметров, они представлены оксидами точечными балл 1 по ГОСТ 1778-2022, рисунок 4 а, при повышенной скорости сварки – оксидами и силикатами балл 1, рисунок 4 б, что объясняет снижение ударной вязкости.

Расчетным путем, используя модель быстро движущегося источника на поверхности полубесконечного тела, была рассчитана средняя скорость охлаждения металла шва в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800 – 500 °С ($\omega_{8/5}$) при изменении температуры предварительного и сопутствующего подогрева, рисунок 5 а, и величины сварочного тока, рисунок 5 б.

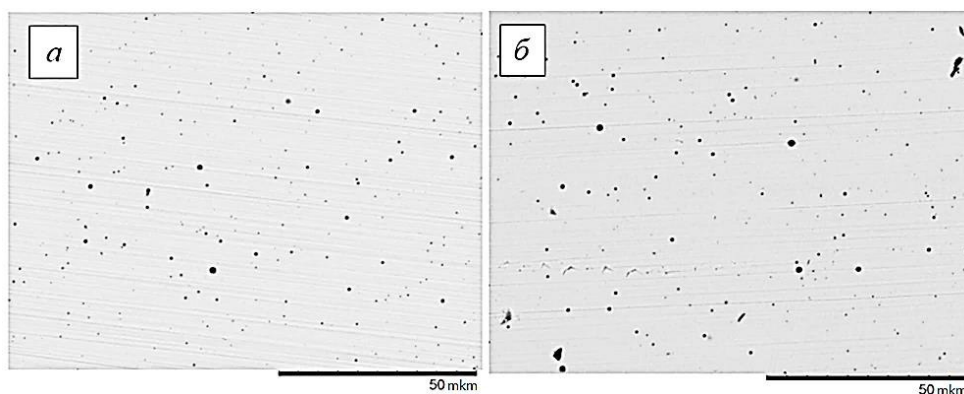


Рисунок 4 – Неметаллические включения в металле шва, выполненном с использованием применяемых технологических параметров сварки (а) и повышенной скорости сварки (б)

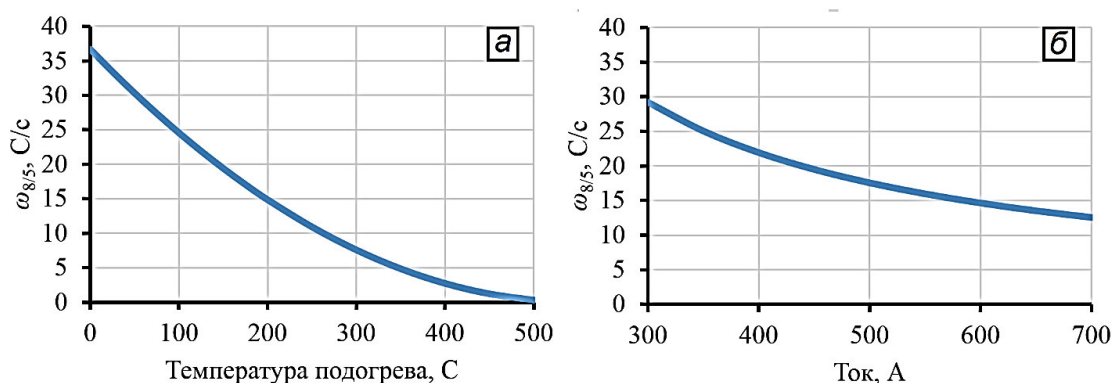


Рисунок 5 – Зависимость скорости охлаждения $\omega_{8/5}$ от температуры предварительного подогрева (а) и от величины сварочного тока (б)

Установлено, что скорость $\omega_{8/5}$ в зависимости от технологических параметров сварки, в особенности от температуры предварительного подогрева, может изменяться в широком диапазоне – от 0,2 до 40 °C/c. Изменение величины сварочного тока в широком диапазоне – от 300 до 700 А не столь значительно сказывается на изменении скорости охлаждения $\omega_{8/5}$.

Для образцов металла шва стали 15Х2НМФА проведены дилатометрические исследования с нагревом до 1000 °C и охлаждением с различной скоростью $\omega_{8/5}$ в диапазоне от 0,2 до 40 °C/c. По итогам дилатометрических и металлографических исследований построена термокинетическая диаграмма превращения аустенита, приведенная на рисунке 6. Штриховкой обозначен диапазон скоростей охлаждения, возможный при многопроходной автоматической сварке соединений корпуса ВВЭР.

Изображение структуры, выявленной с помощью автоматического анализатора изображений приведено на рисунке 7.

Таким образом установлено, что повышение температуры сопутствующего подогрева является существенным фактором, приводящим к снижению ударной вязкости металла шва за счет структурной неоднородности.

Приведенный анализ статистических данных показал, что при повышении продолжительности выдержки при температуре промежуточного отпуска 620 °C наблюдается некоторое снижение ударной вязкости, рисунок 8 а, и увеличение прочности, рисунок 8 б.

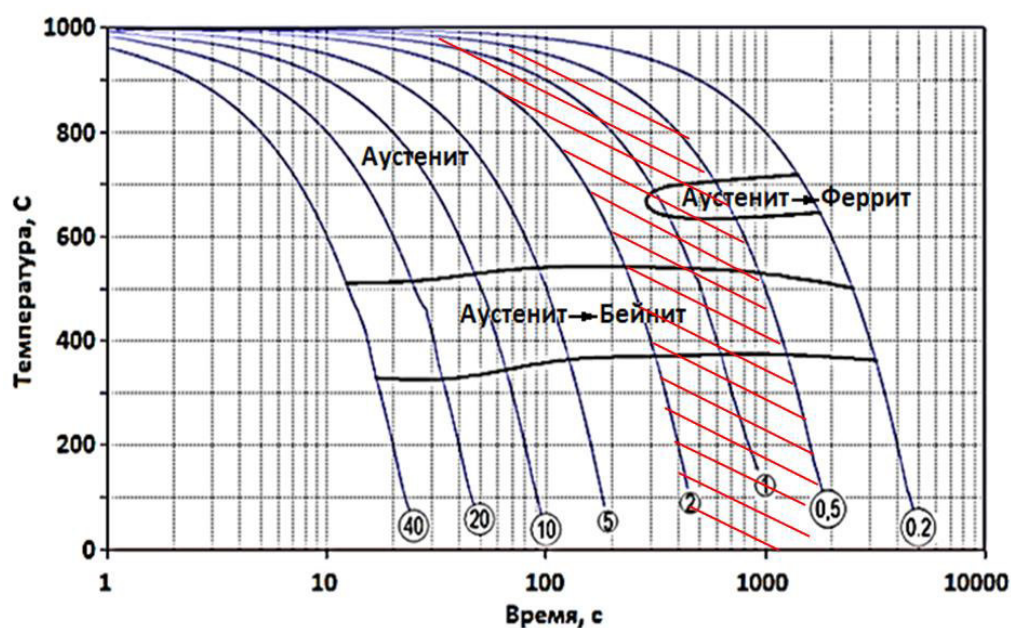


Рисунок 6 – Термокинетические диаграммы превращения аустенита

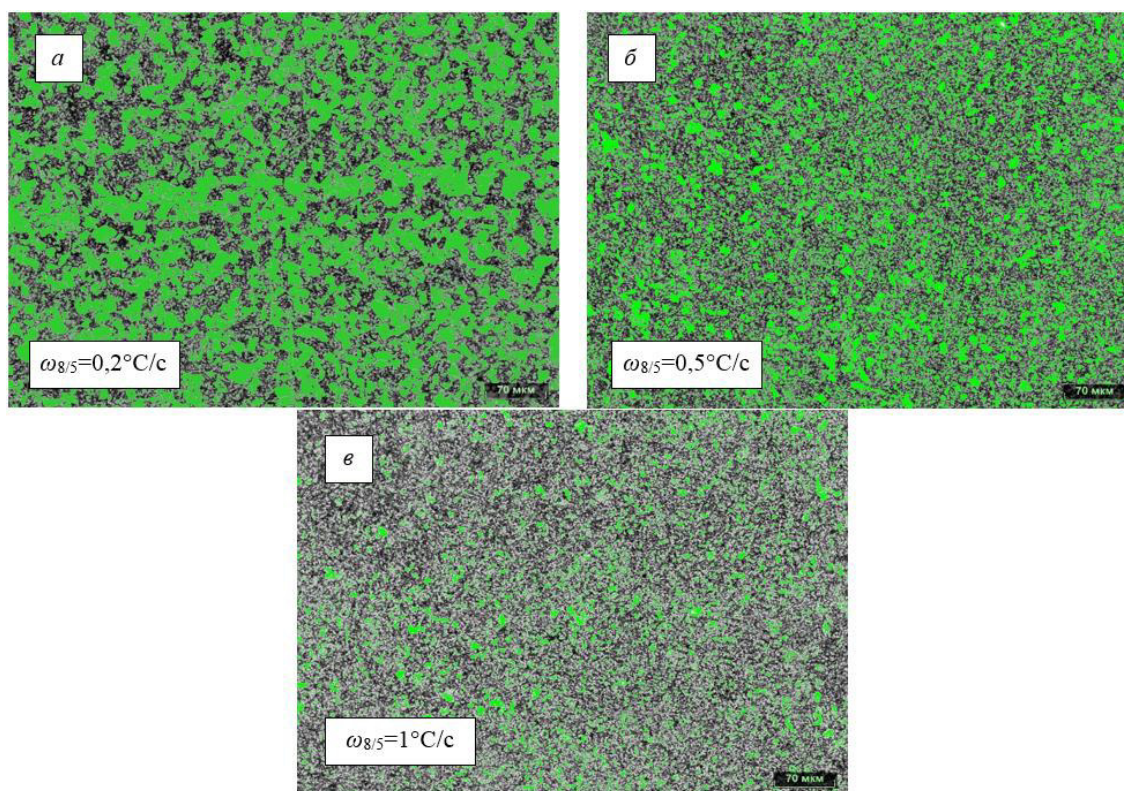


Рисунок 7 – Ферритная фаза (выделена зеленым цветом), выявленная с помощью автоматического анализатора изображений

Для исследования влияния продолжительности термической обработки при температуре промежуточного отпуска 620 °C на изменение механических свойств металла шва, а также влияния содержания в нем марганца и кремния, проведен эксперимент, заключающийся в определении механических свойств металла шва стали 15X2НМФА после выдержки при температуре промежуточного отпуска различной продолжительности.

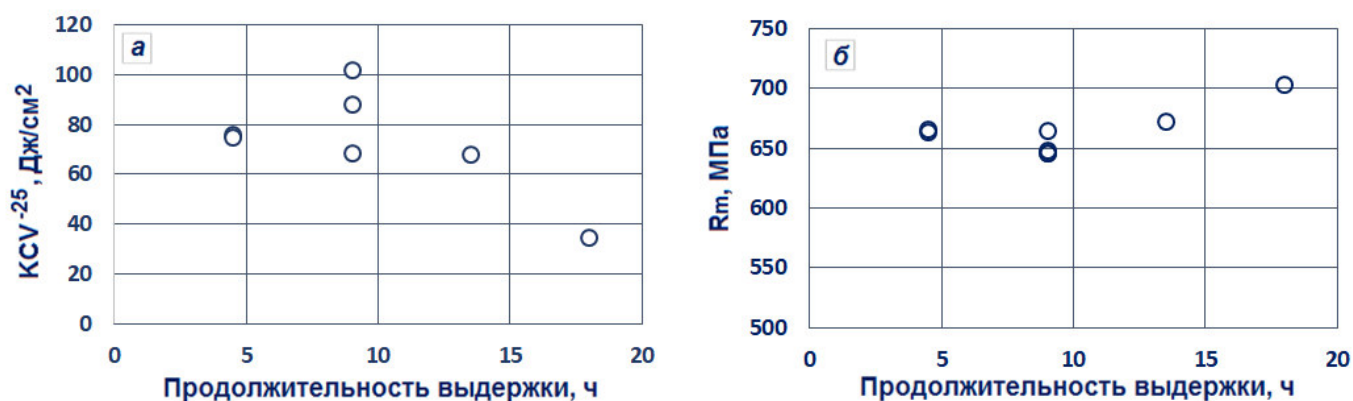


Рисунок 8 – Результаты испытания ударной вязкости (а) при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точками обозначены среднее значение по результатам испытаний трех образцов) и временного сопротивления сварного соединения при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б) (точками обозначены среднее значение по результатам испытаний двух образцов) при различной продолжительности выдержки при температуре отпуска $620\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исследовали два варианта сварных швов, различающихся, в основном, содержанием кремния: 0,40 и 0,17 %. Результаты определения временного сопротивления (R_m), предела текучести ($R_{p0,2}$) металла шва при различной продолжительности выдержки приведены на рисунке 9, результаты испытаний на ударный изгиб при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на рисунке 10.

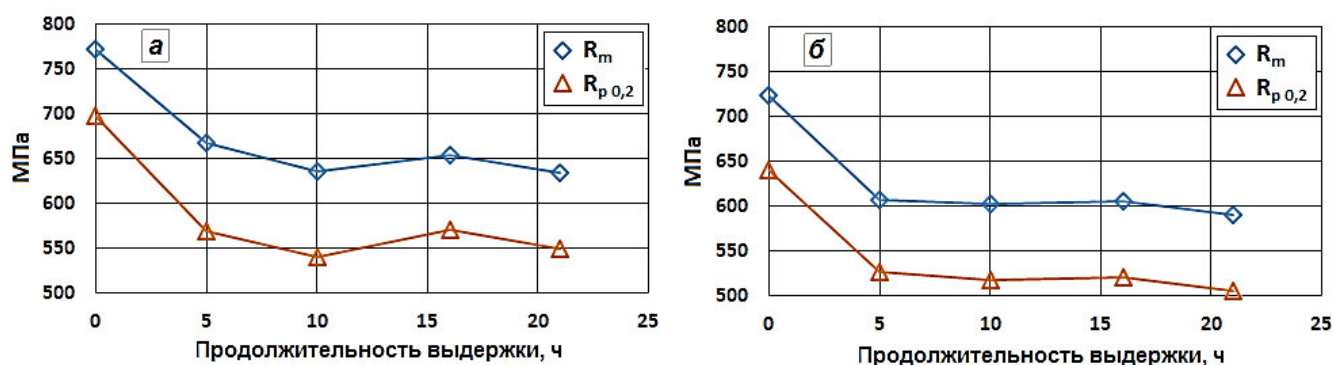


Рисунок 9 – Результаты испытания на статическое растяжение металла шва при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различной продолжительности промежуточного отпуска: а – металл шва с 0,40 % кремния; б – металл шва с 0,17 % кремния

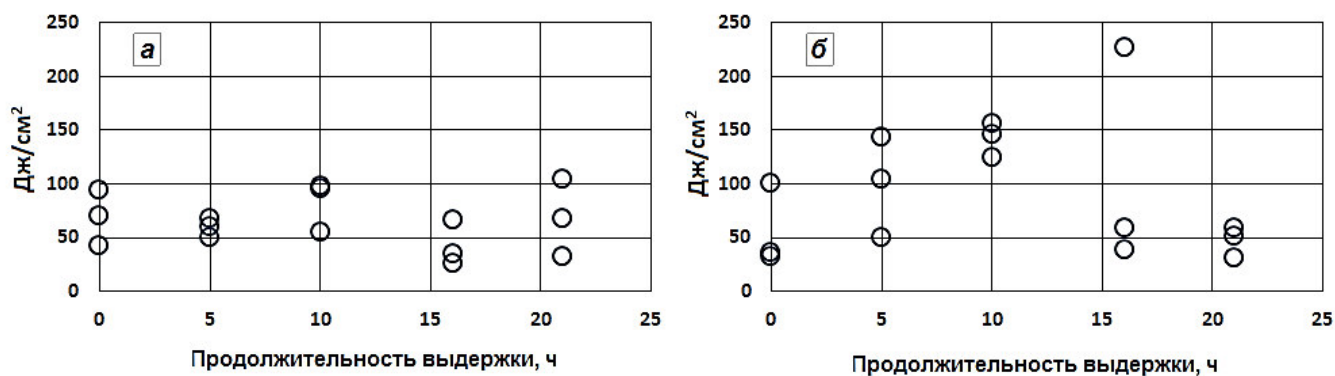


Рисунок 10 – Ударная вязкость металла шва при температуре испытания $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различной продолжительности промежуточного отпуска: а – металл шва с 0,40 % кремния, б – металл шва с 0,17 % кремния

Анализ поверхности излома показал, что разрушение происходит преимущественно по границам дендритов без каких-либо дефектов водородного происхождения, сегрегаций примесей и пр. Темные и светлые точки субмикронного диапазона размеров на поверхности междендритного разрушения, вероятно, соответствуют локализации карбидов, формирующихся при длительном отпуске, рисунок 11.

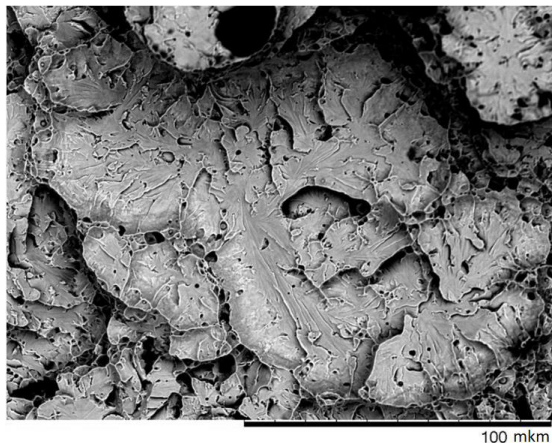


Рисунок 11 – Поверхность излома образца Шарпи, $KCV^0 = 33 \text{ Дж/см}^2$, металла шва с 0,40 % Si после высокого отпуска при температуре 620 °С продолжительностью 21 ч

Проведенный фазовый и элементный анализ карбидных осадков, отобранных от образцов материала с 0,40 % Si в исходном после сварки состоянии, после 5 и 21 ч выдержки позволил установить, что в исходном состоянии карбидная фаза представлена цементитом Fe_3C , после отпуска продолжительностью 5 и 21 ч - специальными карбидами Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 и MoC .

Методом сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения проведен анализ образцов после 5 и 21 ч выдержки. Изображение микроструктуры представлено на рисунке 12.

После 5 часов выдержки, рисунок 12 а, б, выявлены лишь отдельные частицы специальных карбидов размером не более 50 нм, располагающиеся преимущественно по границам бейнитных фрагментов. После 21 часа выдержки размеры карбидов существенно увеличились (более 100 нм для наиболее крупных), так же, как и их количество, выявляемое на шлифе. Располагаются они преимущественно на границах бейнитных блоков, рисунок 12 в, г.

Образование карбидов на границе зерен ослабляет когезивную прочность границ, в результате чего при динамической нагрузке происходит разрушение по границам и снижение ударной вязкости, без существенного изменения прочностных свойств металла.

Как показывают данные рисунка 8, последующий окончательный отпуск устраняет данный эффект не полностью. Для компенсации данного эффекта рекомендуется ограничить количество промежуточных отпусков сварных соединений – не более двух.

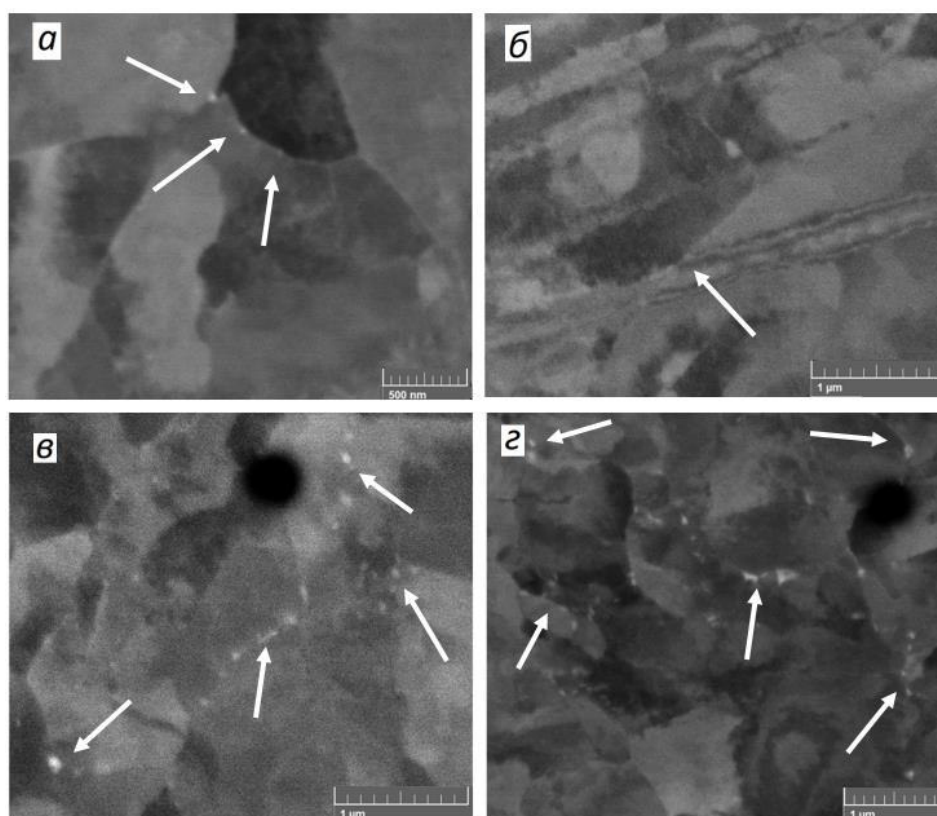


Рисунок 12 – Изображение микроструктуры образцов с 0,40 % Si после термической обработки при температуре 620 °C: *а, б* – 5 ч выдержки; *в, г* – 21 ч выдержки. Стрелками показана карбидная фаза

Четвертая глава посвящена исследованиям влияния технологических параметров сварочного тока на сварочно-технологические свойства, химический состав, структуру и механические свойства Cr-Ni-Mo металла шва при автоматической сварке под флюсом. Проведены экспериментальные исследования с применением постоянного тока прямой и обратной полярности и переменного тока с прямоугольной формой импульса и варьируемыми значениями величины сварочного тока в диапазоне от 500 до 600 А; напряжения дуги – от 29 до 35 В; частоты – от 10 до 100 Гц; баланса тока – от 25 % до 75 %, рисунок 11 *а*; смещение импульса напряжения – от -10 до +10 В, рисунок 13 *б*.

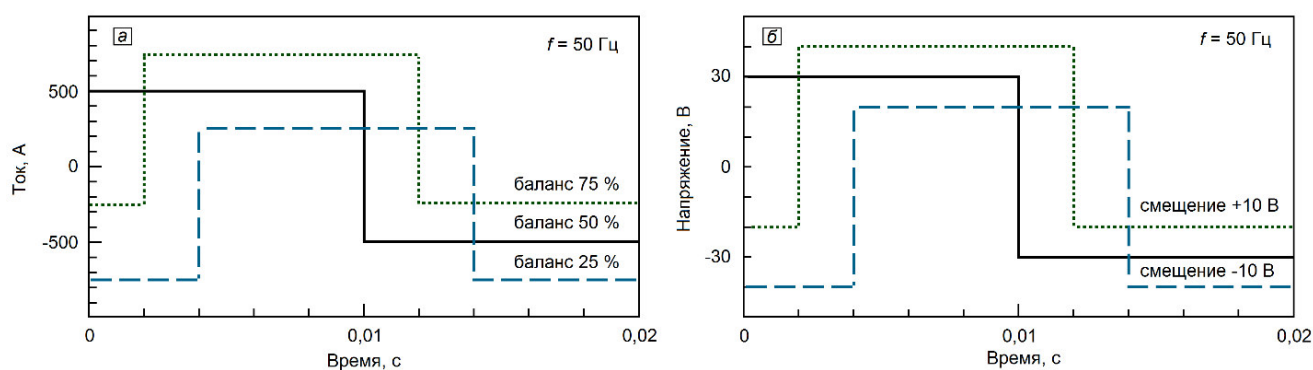


Рисунок 13 – Сварочные ток с измененным балансом (*а*) и смещенным импульсом напряжения (*б*)

Были испытаны сварочно-технологические свойства при наплавке одиночных валиков на поверхность стальной пластины с варьируемыми параметрами сварочного

тока, всего наплавлено 22 валика. При наплавке использовали низколегированную Cr-Mo-Ni сварочную проволоку одного состава и сварочный флюс различного типа.

Проведен анализ поперечных макрошлифов, рисунок 14, с фиксацией глубины проплавления, высоты и ширины валика, площади сечения переплавленного и наплавленного металла.

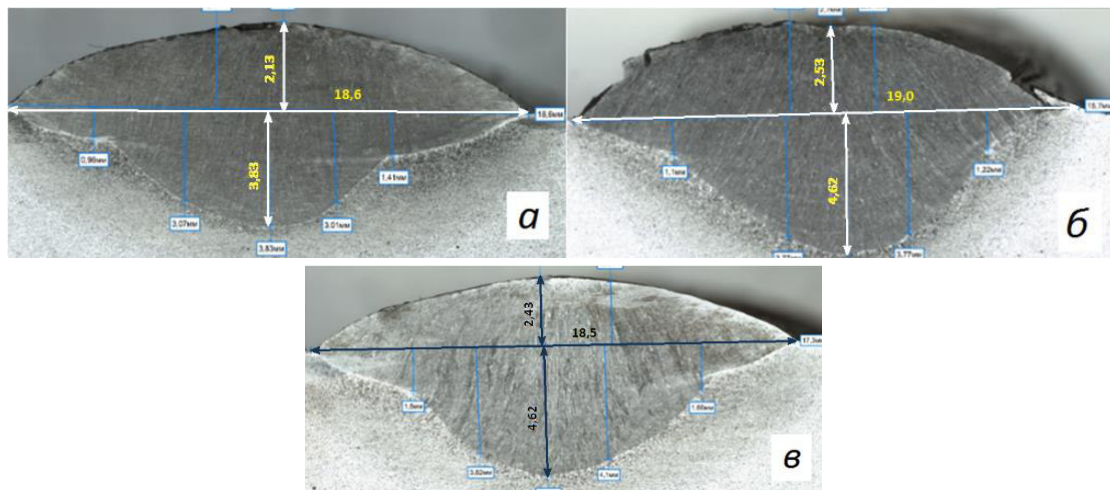


Рисунок 14 – Пример структуры наплавленных валиков: *а* – постоянный ток обратной полярности; *б* – постоянный ток прямой полярности; *в* – переменный сбалансированный ток

Установлено, что замена постоянного тока обратной полярности на переменный ток при сохранении равных характеристик величины тока, напряжения дуги и скорости сварки привела к небольшому повышению площади сечения валика (около 10 %), при этом уменьшения глубины проплавления зафиксировано не было. Наилучшие сварочно-технологические свойства обеспечивает постоянный ток обратной полярности и переменный ток без смещения импульса напряжения и баланса, частотой от 50 до 100 Гц.

Результаты испытаний наплавленного металла показали, что замена постоянного тока на переменный отразилась в снижении содержания кислорода в наплавленном металле. Так, при использовании низкоактивного агломерированного флюса содержание кислорода снизилось с 0,032 до 0,024 %, при использовании плавного активного флюса содержание кислорода снизилось с 0,041 до 0,026 %. Снижение содержания кислорода объясняется снижением интенсивности окислительно-восстановительных реакций при взаимодействии расплавленного шлака и металла. Снижение кислорода, в свою очередь, отразилось на повышении ударной вязкости: в первом случае KCV⁻⁴⁰ повысилась со средних значений 220 Дж/см² до 240 Дж/см² во втором – с 50 Дж/см² до 70 Дж/см². Проведенные исследования ударной вязкости металла шва, выполненного с использованием активного флюса ФЦ-16А, при определении критической температуры хрупкости, рисунок 15, после термической обработки по различным циклам показали возможность обеспечения хрупко-вязкого перехода при температурах от минус 35 до минус 25 °С в случае применения сбалансированного переменного тока.

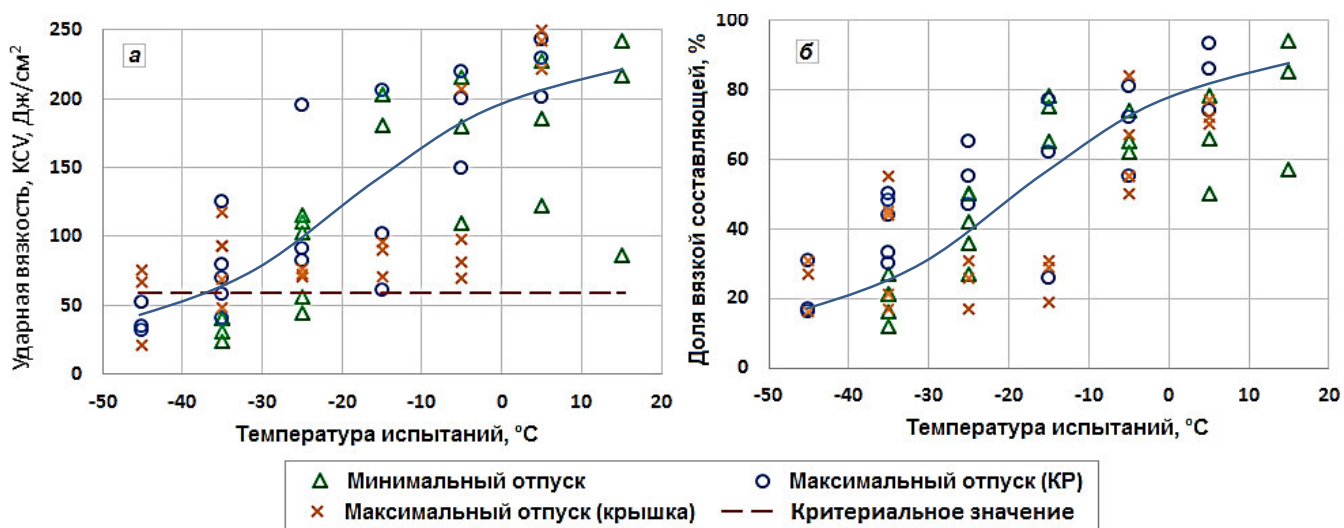


Рисунок 15 – Результаты определения ударной вязкости (а) и доли вязкой составляющей (б) в изломе образцов металла шва, выполненного с применением сбалансированного переменного тока

В пятой главе проведены исследования металла шва и сварных соединений, выполненных с применением низкоактивного агломерированного сварочного флюса взамен плавящего. Исследованиями предыдущих разделов работы установлено, что снижение СХР металла шва стали 15Х2НМФА во многом обусловлено высоким содержанием кислорода, присутствующего в виде неметаллических включений, являющихся очагами хрупкого разрушения. Известным является факт снижения содержания неметаллических включений металла шва, выполненного автоматической сваркой, за счет применения менее химически активного сварочного флюса. Химическая активность флюса характеризует его окислительную способность при взаимодействии с расплавленной металлической фазой. В атомном энергетическом машиностроении при изготовлении оборудования, в том числе, отнесенного к элементам первого класса безопасности, применяется агломерированный сварочный флюс марки 48АФ-71, имеющий в своем составе высокое содержание основных оксидов СаО, MgO – суммарно ~ 45 %.

Проведены исследования химического состава, структуры, механических свойств металла шва и сварного соединения стали 15Х2НМФА, выполненного тремя сочетаниями сварочной проволоки Св-09ХГНМТАА-ВИ и агломерированного низкоактивного флюса. Показано, что снижение химической активности сварочного флюса отразилось на снижении содержания кремния в металле шва с 0,36-0,43 % до 0,16-0,17 % и кислорода с 0,041-0,060 % до 0,030-0,038 % за счет снижения интенсивности кремний-восстановительного процесса. Во всех случаях подтверждено соответствие химического состава, прочностных и пластических свойств металла шва и сварного соединения требованиям нормативной и конструкторской документации при всех используемых режимах термической обработки. Значения критической температуры хрупкости составили от минус 45 до минус 25 °С.

Результаты испытаний образцов металла шва, выполненного тремя сочетаниями партий сварочной проволоки и сварочного флюса на трещиностойкость и их обработка по методу Advanced Unified Curve, рисунок 14, позволили установить референсную температуру для исследуемого материала: среднее из трех полученных значений T_{100} = минус 64,1 °С.

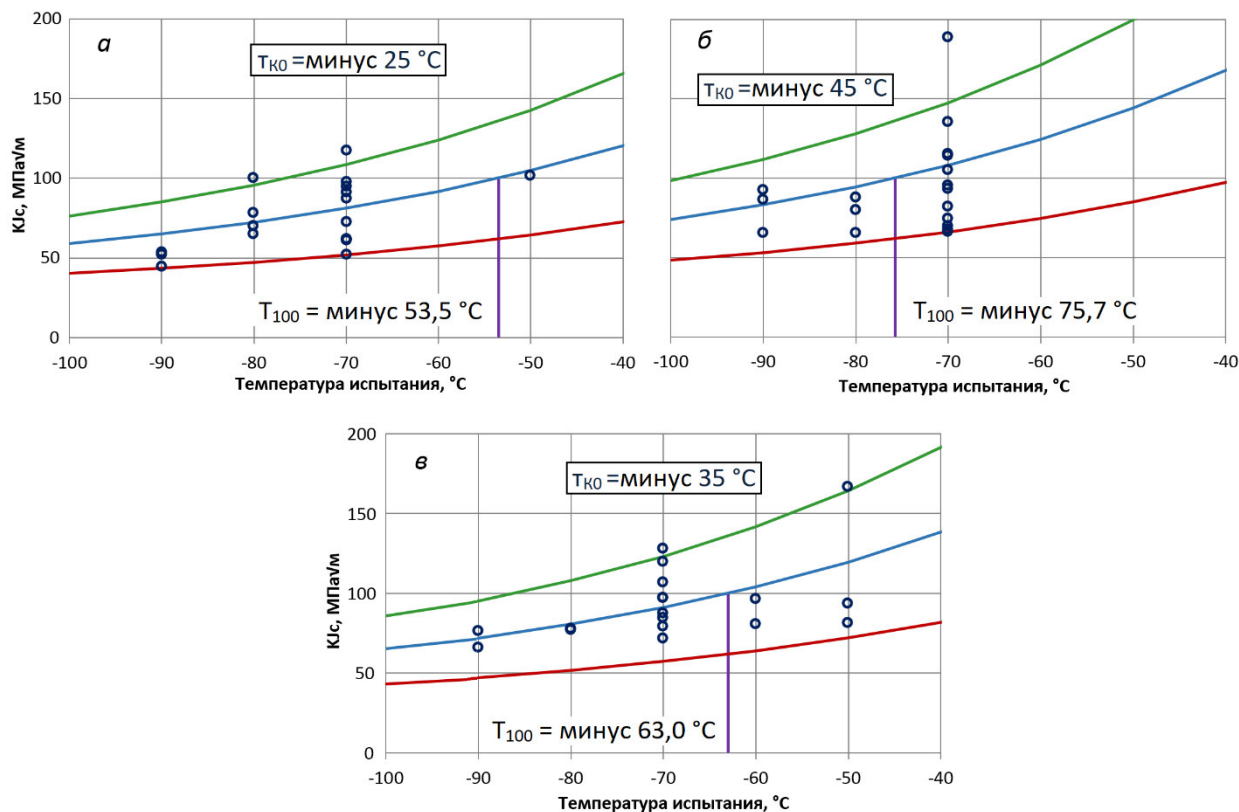


Рисунок 16 – Результаты испытаний образцов металла шва на трещиностойкость и их обработки по методу Advanced Unified Curve

Также была определена разность температур $\delta T_{cr-ch} = T_{K0} - T_{100} = 29,1$ °С, что близко к значениям, принятым в расчетных методиках для металла сварных швов, выполненных другими сочетаниями сварочных материалов.

С целью определения воздействия эксплуатационного фактора – высокой температуры, проведено экспериментальное исследование изменений свойств металла шва, выполненного разработанным сочетанием сварочных материалов, после термической выдержки при температуре 400 °С. Максимальная продолжительность выдержки, пересчитанная через параметр Ларсена-Миллера, соответствовала проектному сроку службы – шестидесяти годам при температуре теплоносителя на выходе: 328,6 °С. Результаты определения критической температуры хрупкости приведены на рисунке 17.

Таким образом, установлено, что металл шва имеет низкую склонность к термическому старению.

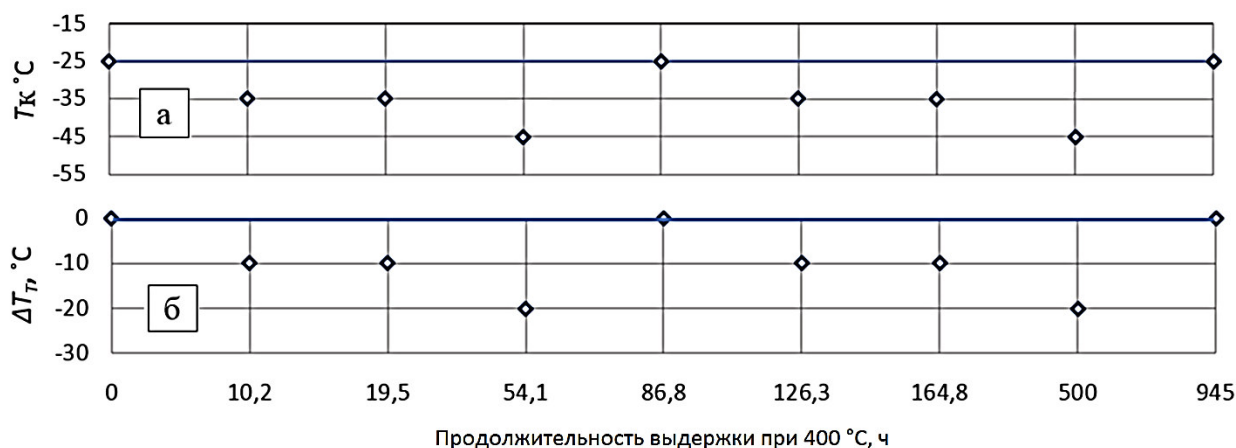


Рисунок 17 – Зависимость критической температуры хрупкости металла шва (а) и ее сдвига (б) от продолжительности термического старения

Отсутствие сдвига критической температуры хрупкости после длительных тепловых выдержек позволяет использовать данное сочетание сварочных материалов для изготовления корпуса реактора с исключением разрушения его сварных соединений по хрупкому механизму в процессе эксплуатации вследствие влияния длительного воздействия рабочей температуры на всем протяжении жизненного цикла оборудования.

На рисунке 18 приведены результаты испытаний образцов на ударный изгиб и определения T_{K0} металла шва, выполненного с использованием низкоактивного агломерированного сварочного флюса и источника питания сварочной дуги переменным током, а также зоны термического влияния при минимальном и максимальном цикле термической обработки.

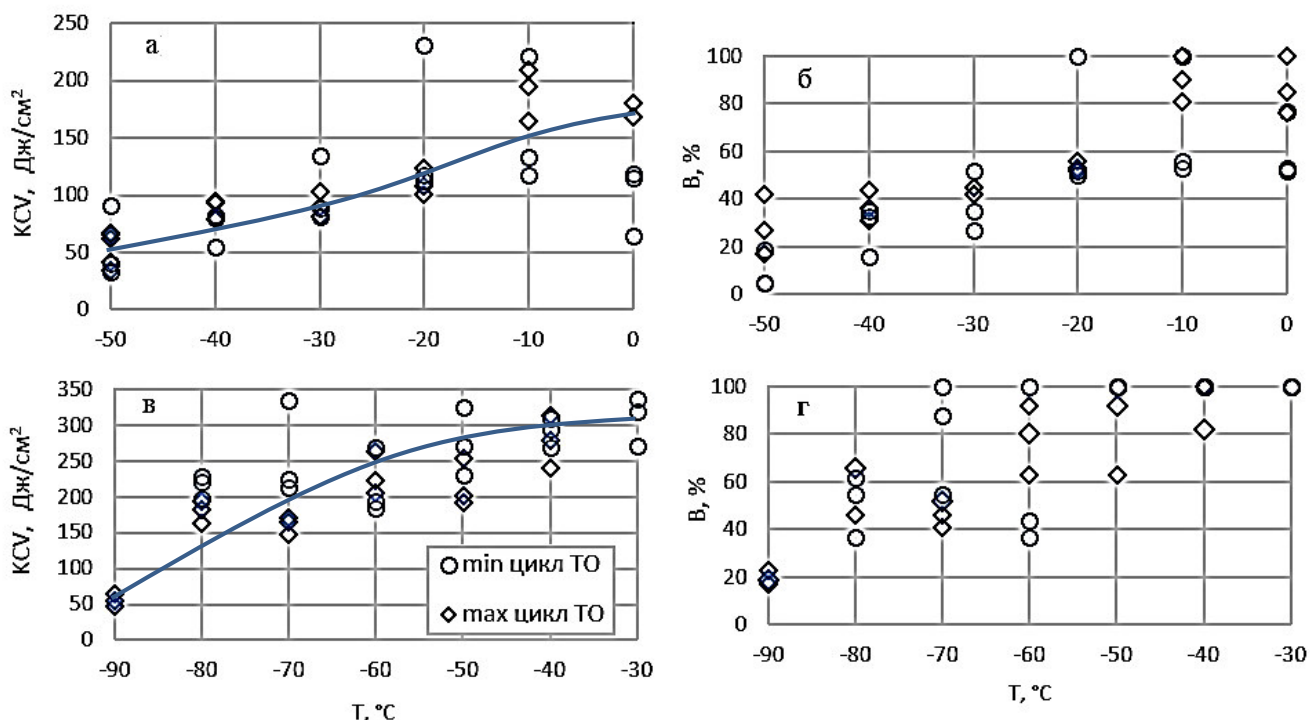


Рисунок 18 – Результаты определения ударной вязкости и доли вязкой составляющей в изломе для металла шва (а, б) и ЗТВ (в, г), выполненного на переменном токе с использованием низкоактивного сварочного флюса после термообработки по минимальному и максимальному циклам

На рисунке 19 и 20 приведены результаты испытаний образцов на растяжение металла шва и сварного соединения соответственно.

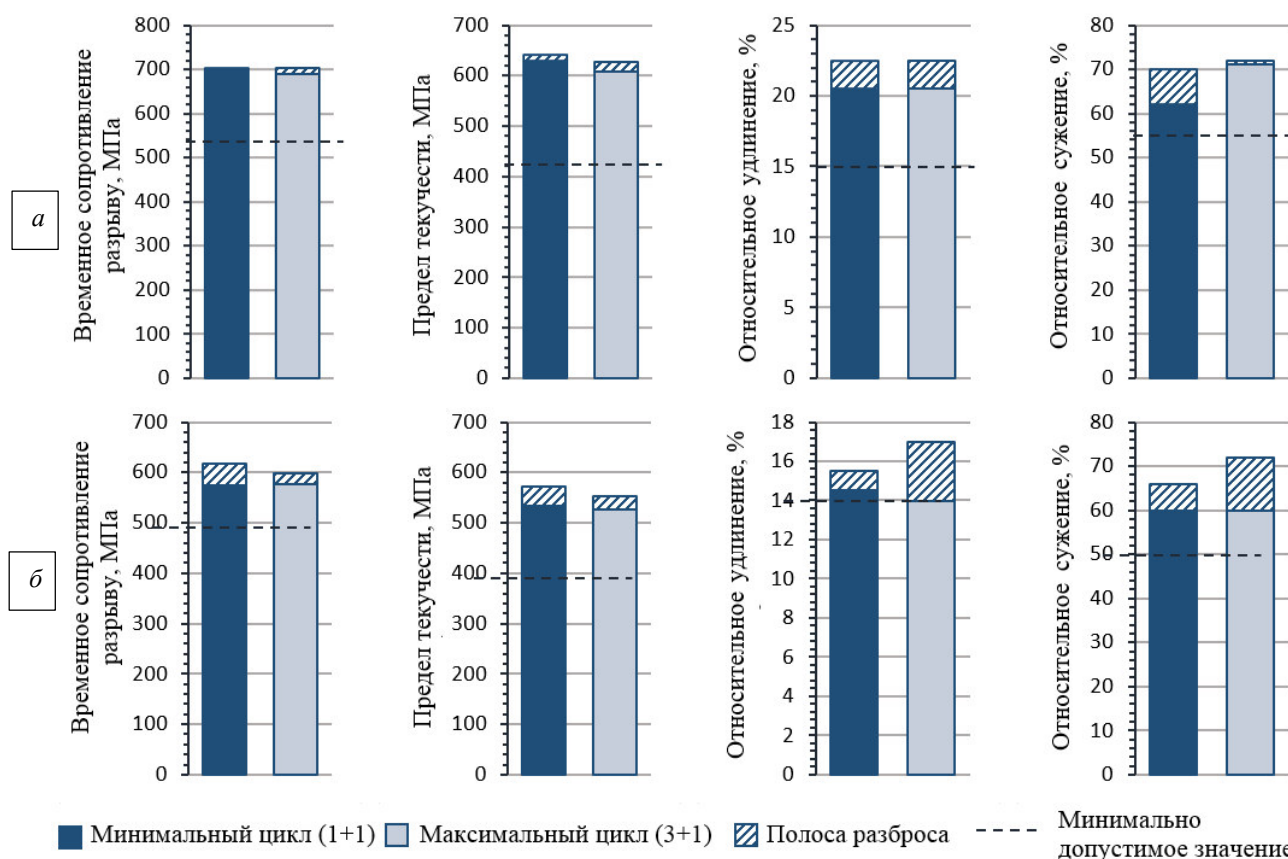


Рисунок 19 – Результаты испытания на растяжение металла шва при температуре 20 °С (а) и 350 °С (б), выполненного на переменном токе с использованием низкоактивного сварочного флюса после термообработки по минимальному и максимальному циклам

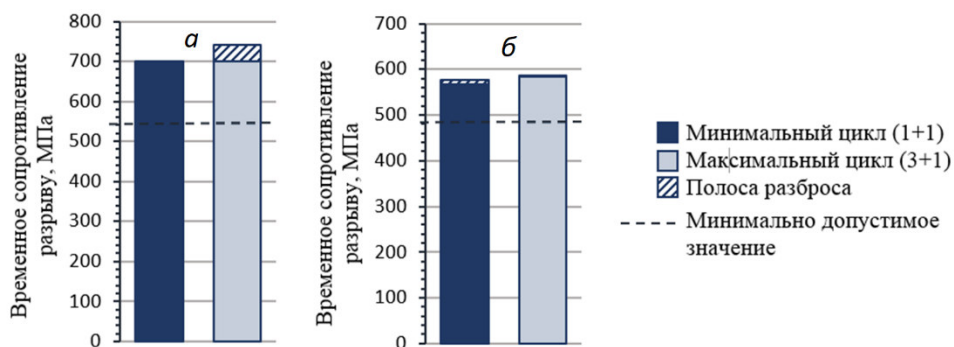


Рисунок 20 – Результаты испытания на растяжение сварного соединения при температуре 20 °С (а) и 350 °С (б), выполненного на переменном токе с использованием низкоактивного сварочного флюса после термообработки по минимальному и максимальному циклам

По результатам исследований установлено, что применение разработанной технологии автоматической сварки стали 15Х2НМФА при использовании переменного сварочного тока и низкоактивного сварочного флюса позволяет обеспечить T_{K0} на уровне минус 40 °С за счет обеспечения низкого содержания кислорода в металле шва. Прочие же механические свойства металла шва и сварного соединения полностью соответствуют предъявляемым требованиям.

На рисунке 21 приведены результаты испытаний ударной вязкости металла шва, содержащего различное количество кислорода, при температуре испытаний минус 25 °С (по итогам исследований глав 3, 4 и 5).

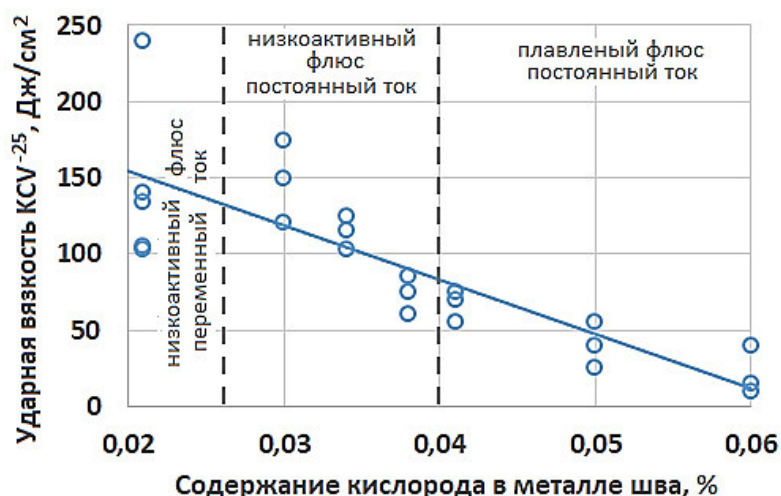


Рисунок 21 – Результаты определения ударной вязкости металла шва при -25 °С при различном содержании кислорода

Предложено уравнение прямолинейной регрессии (2) для расчета значений KCV⁻²⁵ металла шва в зависимости содержания в нем кислорода:

$$KCV^{-25} = -3566 \cdot [O] + 226, \text{ Дж/см}^2 \quad r = -0,83, \quad (2)$$

где [O] – содержание кислорода в металле шва, %.

Таким образом, установлено, что разработанные технологические мероприятия – использование низкоактивного агломерированного сварочного флюса и источника питания сварочной дуги переменным током – позволяют обеспечить существенное повышение ударной вязкости при отрицательных температурах за счет минимизации содержания кислорода в металле сварного шва.

Внедрение результатов работы:

1. Разработано и утверждено техническое решение №080200-145-ТР-2022 о применении источников питания сварочной дуги переменным током при изготовлении корпуса и крышки ВВЭР из стали 15Х2НМФА.

2. Разработана производственно-технологическая документация завода «Атоммаш» на сварку оборудования ВВЭР из стали 15Х2НМФА, на автоматическую сварку кольцевых швов с использованием переменного тока.

3. Сочетание сварочных материалов – проволоки Св-09ХГНМТАА-ВИ и флюса 48АФ-71 – внесено в проекты извещений об изменении ОСТ5Р.9633-2015 «Сварка конструкций специальных судовых энергетических установок из стали аустенитного и перлитного классов и железоникелевых сплавов. Основные положения» и ОСТ5Р.9634-2015 «Соединения сварные конструкций специальных судовых

энергетических установок из стали аустенитного и перлитного классов и железоникелевых сплавов. Правила приемки и методы контроля» для изготовления оборудования из сталей 15ХЗНМФА, 15ХЗНМФА-А, 15Х2НМ1ФА и 15Х2НМ1ФА-А.

Работа проведена в период 2021-2025 годов в рамках программы работ НИОКР №054_002-412 по теме: «Научно-исследовательская работа по аттестационным испытаниям сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом на переменном токе» и программы работ №Св-48.001-753/2022 по теме: «Программа и методика аттестационных испытаний сварных соединений сталей 15Х2НМФА, выполненных методом автоматической сварки проволокой Св-09ХГНМТАА-ВИ в сочетании с флюсом 48АФ-71».

Оформлены акты внедрения АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск.

Основные выводы

Результаты исследований позволили сделать следующие основные выводы:

1. Экспериментально установлены основные технологические факторы, приводящие к снижению СХР металла шва корпусов ВВЭР в процессе изготовления: увеличение загрязненности неметаллическими включениями вследствие протекания кремний-восстановительного процесса при использовании активного сварочного флюса; структурная неоднородность вследствие повышения температуры сопутствующего подгрева; образование неметаллических включений неблагоприятной формы вследствие повышения скорости сварки; особенности преобразования карбидной фазы вследствие выдержки сварных соединений при температуре промежуточного отпуска 620 °С продолжительностью свыше 10 ч.

2. Разработаны технологические мероприятия, позволяющие повысить характеристики СХР металла шва: использование источника питания дуги переменным сварочным током, что позволяет снизить содержание кислорода в металле шва, присутствующего в виде неметаллических включений, за счет снижения интенсивности кремний-восстановительного процесса.

3. Разработана технология сварки с применением низкоактивного сварочного флюса 48АФ-71 взамен плавного флюса ФЦ-16А, позволяющая обеспечить снижение значения критической температуры хрупкости металла шва с минус 15 °С до значений до гарантированных значений не выше минус 25 °С.

4. Показано, что совместное использование разработанных технологических мероприятий – применение источника питания дуги модулируемым переменным током и применение низкоактивного агломерированного флюса – позволило существенно снизить значение критической температуры хрупкости – до обеспечения соответствия требованиям к заготовкам основного металла (не выше минус 35 °С). При

этом прочностные и пластические свойства металла шва, прочностные свойства сварного соединения также обеспечивают соответствие требованиям как к металлу сварного шва, так и к заготовкам основного металла – стали 15Х2НМФА категории прочности 440 МПа при температуре испытаний 350 °С.

5. Проведенные испытания продемонстрировали высокие значения характеристик СХР металла шва, выполненного по разработанной технологии, отсутствие склонности к деградации его механических свойств в процессе воздействия эксплуатационного фактора – высокой температуры, что позволяет рекомендовать разработанное сочетание материалов и технологию сварки к применению при изготовлении корпуса и крышки реактора из различных модификаций стали 15Х2НМФА современных проектов ВВЭР.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. **Шубин О.В.** Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 1: Технология сварки теплоустойчивых сталей углеродистыми сварочными материалами в условиях отсутствия термической обработки и опыт применения сварочных материалов / Тимофеев М.Н., Карзов Г.П., Галияткин С.Н., Михалева Э.И., Литвинов С.Г., Александрин А. Г., Башулин Д.Л., **Шубин О.В.** // **Вопросы материаловедения.** – 2017. № 4 (92). С. 131-139.

Shubin O.V. Improvement of the Service Properties of the Weld Joint Metal for Transport Nuclear Power Units Manufactured of Heat-Resistant Steel Grades: Part I. Technology of Welding Heat-Resistant Steel Grades Using Low-Carbon Welding Materials without Heat Treatment and Experience of Applying Welding Materials / Timofeev M.N., Karzov G.P., Galiatkin S.N., Mikhaleva E.I., Litvinov S.G., Aleksandrin A.G., Bashulin D.L., **Shubin O.V.** // **Inorganic Materials: Applied Research.** – 2018, Vol. 9, No. 6, pp. 1142–1147.

2. **Шубин О.В.** Повышение служебных характеристик металла монтажных сварных соединений транспортных атомных энергетических установок из теплоустойчивых сталей. Часть 2. Исследование механических свойств металла «силовых» малоуглеродистых наплавов в зависимости от технологических параметров сварки / Тимофеев М.Н., Галияткин С.Н., Михалева Э.И., **Шубин О.В.** // **Вопросы материаловедения.** – 2017. № 4 (92). С. 140-148

Shubin O.V. Improvement of the Service Properties of the Weld Joint Metal for Transport Nuclear Power Units Manufactured of Heat-Resistant Steel Grades: Part II. A Study of Mechanical Properties of Low-Carbon Weld Deposits Depending on the Welding Process Variables / Timofeev M.N., Galiatkin S.N., Mikhaleva E.I., **Shubin O.V.** // **Inorganic Materials: Applied Research.** – 2018, Vol. 9, No. 6, pp. 1148–1154.

3. **Шубин О.В.** Анализ опыта изготовления корпуса реактора и блока верхнего проекта ВВЭР-ТОИ из сталей 15Х2НМФА кл. 1 и 15Х2МФА-А мод. А /

Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н., Фоменко А.В., **Шубин О.В.** // **Тяжелое машиностроение.** – №9. 2021 г. С. 9-17.

4. **Шубин О.В.** Исследование свойств металла сварных швов оборудования АЭУ из сталей перлитного класса, выполненных автоматической сваркой под флюсом на переменном токе / **Шубин О.В.**, Филинков А.О., Жидков М.Е., Тимофеев М.Н. // **Тяжелое машиностроение.** – № 11-12. 2023 г. С 9-16.

5. **Шубин О.В.** Повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА кл. 1 Часть 1. Анализ причин снижения сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА кл. 1 / Тимофеев М.Н., **Шубин О.В.**, Галяткин С.Н., Жидков М.Е., Полякова Е.С. // **Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы.** – 2024. №3(124). – С. 15-28

6. **Шубин О.В.** Повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА кл. 1 Часть 2. Исследование сварных соединений стали 15Х2НМФА кл. 1, выполненных методом автоматической сварки проволокой Св-09ХГНМТАА-ВИ под низкоактивным агломерированным флюсом 48АФ-71 / Попова А.В., **Шубин О.В.**, Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н., Желецкий Д.И., Жидков М.Е. // **Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы.** – 2024. №3(124). – С. 47-60.

7. **Шубин О.В.** Повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА кл. 1 Часть 3. Исследование структурно-фазовых превращений в металле шва корпуса ВВЭР при многопроходной сварке / Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н., **Шубин О.В.**, Жидков М.Е., Королев С.А. // **Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы.** – 2024. №3(124). – С. 29-46.

8. **Шубин О.В.** Исследование металла швов из стали 15Х2НМФА, выполненных с применением агломерированного флюса, в целях повышения эксплуатационных характеристик кольцевых швов реакторов типа ВВЭР / **Шубин О.В.**, Попова А.В., Подрезов Н.Н. Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», 19-20 мая 2022 г., Волгодонск, С. 119-123.

9. **Шубин О.В.** Исследование свойств металла сварных швов оборудования АЭУ из сталей перлитного класса, выполненных автоматической сваркой под флюсом на переменном токе / **Шубин О.В.**, Филинков А.О., Тимофеев М.Н. Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения». М.: АО «НПО «ЦНИИТМАШ», 2023.С. 40.

10. **Шубин О.В.** Анализ причин снижения ударной вязкости сварных соединений из стали 15Х2НМФА, выполненных проволокой Св-09ХГНМТАА-ВИ в сочетании с флюсом ФЦ-16А / Желецкий Д.И., Попова А.В., **Шубин О.В.**, Котенко О.Н.,

Марченко А.А. / Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», 19 сентября 2024 г., Волгодонск, С. 149-151.

11. **Шубин О.В.** Повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА путем применения нового сочетания сварочных материалов / Попова А.В., Желецкий Д.И., **Шубин О.В.**, Котенко О.Н., Марченко А.А. / Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», 19 сентября 2024 г., Волгодонск, С. 162-165.