

На правах рукописи

УДК 621.791.04:621.039.536.2

ГРНТИ 81.35

Тимофеев Михаил Николаевич



**«СОЗДАНИЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
ПОВЫШЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА СВАРНЫХ
ШВОВ КОРПУСОВ АТОМНЫХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ ИЗ
ХРОМОМОЛИБДЕНОВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ»**

Специальность: 05.02.10 - «Сварка, родственные процессы и технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2016

Работа выполнена в **Федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей»**

Научный руководитель

Кандидат технических наук

Галяткин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты:

**Потапов Николай
Николаевич**

Доктор технических наук, профессор, Акционерное общество НПО «ЦНИИТМАШ», ведущий эксперт

**Панченко Олег
Владиславович**

Кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого», старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

Защита диссертации состоится 16 ноября 2016 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=10>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д411.006.01

Заслуженный деятель науки РФ

Д. т. н., профессор



В. А. Малышевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время атомная энергетика сохраняет свои позиции как один из основных мировых источников электроэнергии. Основным направлением стратегии развития атомной отрасли России является повышение производства электроэнергии, в том числе, за счет строительства новых энергоблоков, причем преобладающими будут водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) новых проектов, таких как ВВЭР-ТОИ мощностью 1300 МВт.

Повышение проектного срока службы, а также ужесточение требований к безопасности работы перспективных ВВЭР обуславливает необходимость создания нового поколения сварочных материалов, обеспечивающих повышенные служебные свойства металла сварных швов, в особенности это касается их критической температуры хрупкости T_{K0} . Созданные модификации стали марки 15X2МФА-А категории прочности 45 обеспечивают значения T_{K0} не выше - 35 °С. Однако применяемые в настоящее время для автоматической сварки этих сталей материалы, а именно сварочная проволока марки Св-10ХМФТУ-А и сварочный флюс марки АН-42М, не позволяют обеспечить значения T_{K0} , а также прочностные свойства металла шва на уровне требований к основному металлу, что, в свою очередь, лимитирует ресурс корпуса реактора.

В нефтеперерабатывающей промышленности сохраняется тенденция к повышению параметров эксплуатации (рабочей температуры и давления) оборудования гидрокрекинга нефти с целью повышения эффективности переработки и роста экономических показателей, что в свою очередь потребовало увеличения прочностных характеристик металла корпусов реакторов гидрокрекинга нефти (РГКН). По этой причине для изготовления корпусов РГКН и другого оборудования во всем мире применяют стали типа $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$. Производство заготовок из данных сталей успешно налажено отечественными металлургическими предприятиями. Однако для сварки заготовок из этих сталей применяют сварочные материалы нескольких зарубежных фирм-изготовителей. Отсутствие отечественных сварочных материалов, обеспечивающих предъявляемый комплекс требований к металлу

сварных швов РГКН, ставит машиностроительные заводы в зависимость от иностранных изготовителей и поставщиков, а также от внешнеполитических факторов. Остро встает проблема импортозамещения.

Если информация, касающаяся исследований сталей типа $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ весьма доступна и широко изложена в научно-технической литературе и нормативно-технической документации, то исследования металла сварных соединений, выполняемые при создании сварочных материалов (в особенности, это касается агломерированных сварочных флюсов), в основном, защищены по принципу «ноу-хау». Отсутствуют сведения по влиянию компонентов флюса на сварочно-технологические свойства, легирующих и модифицирующих добавок на механические характеристики металла шва и т. д.

Актуальность настоящей диссертационной работы состоит в решении указанных выше проблем, сдерживающих развитие отечественного атомного энергетического и нефтехимического машиностроения.

Цель работы – создание материалов для автоматической сварки, обеспечивающих повышение служебных характеристик сварных швов корпусов ВВЭР из стали марки 15X2МФА-А мод. А и корпусов РГКН из сталей типа $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ до уровня основного металла.

По причине близости химических составов указанных сталей, а также схожести технологии изготовления корпусов ВВЭР и РГКН, задачи по созданию для них сварочных материалов решались совместно в рамках настоящей диссертационной работы.

Для достижения поставленной цели решены следующие **научные задачи**:

1. Научно обоснован выбор химической композиции агломерированного флюса для сварки хромомолибденованадиевых сталей (Cr-Mo-V-сталей), обеспечивающей повышение служебных характеристик металла шва.

2. Исследованы сварочно-технологические характеристики агломерированного флюса в зависимости от его состава.

3. Исследовано влияния металлических добавок в составе агломерированного флюса на структуру и механические свойства металла шва.

4. Исследовано влияния легирующих элементов на структуру и механические свойства металла шва в условиях применения агломерированного флюса после проведения технологических отпусков в интервале значений температурно-временного параметра Ларсена-Миллера $LMP=19,87-21,08$.

5. Подтверждено соответствие разработанных сварочных материалов комплексу предъявляемых требований при проведении аттестационных испытаний.

Научная новизна:

1. Предложено и научно обосновано использование для сварки Cr-Mo-V теплоустойчивых сталей низкоактивных агломерированных флюсов на основе шлаковой системы $MgO-Al_2O_3-CaF_2-SiO_2-CaO$, с введением в её состав соединения CaO в виде синтетического компонента.

2. Определены закономерности влияния металлических компонентов в составе агломерированного флюса на содержание легирующих элементов Cr-Mo-V-металла шва. Показано, что оптимальным является введение в состав флюса 2,8 % комплексной лигатуры состава 71 % Mn, 16 % Fe, 7 % Ti, 6 % Si, что позволяет обеспечить минимальное выгорание основных легирующих элементов Cr-Mo-V-металла шва при сохранении химической нейтральности флюса.

3. Установлены зависимости механических свойств Cr-Mo-V- и Cr-Ni-Mo-металла шва от содержания металлических модифицирующих добавок в составе агломерированного флюса: ферротитана, ферробора и лигатуры РЗМ. Показано, что оптимальное сочетание механических характеристик Cr-Ni-Mo металла шва обеспечивается при введении в состав флюса 0,5 % ферротитана в составе комплексной лигатуры.

4. Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность выбора для сварки Cr-Mo-V-сталей различных систем легирования металла шва в зависимости от параметров отпуска и температуры эксплуатации. При значении $LMP=19,87-20,30$ и $T_{экс.}$ до $350^{\circ}C$ оптимальное сочетание механических свойств металла шва обеспечивает применение Cr-Ni-Mo-системы легирования, при $LMP=20,42-21,08$ и $T_{экс.}$ до $454^{\circ}C$ – применение Cr-Mo-V-системы легирования.

5. Установлены границы скоростей охлаждения в интервале температур 800-500 °С, в которых обеспечивается формирование благоприятной с точки зрения механических свойств бейнитной структуры металла шва различных систем легирования. Для Cr-Ni-Mo-системы легирования бейнитная структура образуется при скоростях охлаждения от 1 до 20 °С/с; для Cr-Mo-V-системы легирования – при скоростях охлаждения от 2 до 5 °С/с.

Научная новизна разработок защищена патентами РФ № 2530611 и № 2535160.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование выбора синтетического компонента на основе соединения СаО в составе агломерированного флюса применительно к сварке Cr-Mo-V-сталей.

2. Зависимости химического состава и механических свойств металла шва от металлических добавок в состав агломерированного флюса.

3. Зависимости структуры и механических свойств металла шва Cr-Ni-Mo- и Cr-Mo-V-системы легирования от содержания легирующих элементов в его составе при сварке в сочетании с агломерированным флюсом.

4. Результаты исследований влияния технологических режимов сварки на структуру и механические характеристики металла сварных швов с учетом термической обработки.

Практическая значимость работы:

1. Разработан состав агломерированного флюса и выбран состав сварочной проволоки для автоматической сварки корпусов ВВЭР из стали 15Х2МФА-А мод. А. Данное сочетание материалов обеспечивает повышение служебных характеристик металла шва до уровня требований к основному металлу.

2. Разработан состав агломерированного флюса и состав сварочной проволоки для автоматической сварки корпусов РГКН из сталей типа $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$. Эти материалы в полном объеме обеспечивают комплекс заданных требований к служебным характеристикам металла шва.

3. Выполнено производственное освоение и промышленное опробование разработанных сварочных материалов ведущими отечественными машиностроительными предприятиями.

4. Разработана и выпущена нормативная документация на изготовление, поставку разработанных сварочных материалов, технологические инструкции на сварку и термическую обработку, проведен комплекс аттестационных испытаний, получены разрешения на их применение.

Личный вклад автора заключается в научном обосновании выбора шлаковой основы агломерированного флюса, выборе (разработке) компонентного состава, номенклатуры и количества вводимых металлических добавок, определении взаимосвязи компонентного состава со структурой, химическим составом и механическими характеристиками металла шва; выборе легирующих композиций сварочной проволоки, исследовании влияния содержания легирующих элементов в составе проволоки на структуру и механические свойства металла шва; разработке технологии сварки с применением новых материалов; подготовке технической документации на разработанные материалы, сварку и термическую обработку; участии в изготовлении промышленных партий материалов и проведении аттестационных испытаний.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждена большим объемом экспериментальных данных, полученных как в лабораторных, так и в производственных условиях, а также положительным опытом применения результатов работы при изготовлении натуральных контрольных сварных соединений в производственных условиях отечественных предприятий-изготовителей оборудования АЭС и нефтехимии.

Публикации:

Всего опубликовано 19 научных работ (4 статьи, 11 докладов, в том числе 5 на международных конференциях и 4 патента РФ). По теме диссертационной работы 14 публикаций, в том числе 2 патента РФ на изобретения и 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура диссертационной работы: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка используемой литературы. Объем составляет 187 страницы текста, включая 79 рисунков и 30 таблиц. Список литературы содержит 103 источника.

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.

Первая глава представляет собой обзор научно-технической литературы и нормативно-технической документации, посвященный анализу отечественного и мирового опыта изготовления с использованием автоматической сварки под флюсом крупногабаритного оборудования из низколегированных теплоустойчивых сталей. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при сварке таких изделий, которые необходимо учитывать при создании сварочных материалов, обеспечивающих повышение служебных характеристик сварных швов. Проведен анализ требований к металлу швов современных корпусов ВВЭР и РГКН. Различия в требованиях к механическим свойствам металла швов данного оборудования обусловлены различиями в параметрах технологических отпусков и условий эксплуатации. Сформулированы основные научные задачи, решение которых необходимо при создании новых материалов для автоматической сварки, обеспечивающих повышенные служебные характеристики металла сварных швов.

Вторая глава посвящена выбору или разработке методик исследований, использованных для решения поставленных научных задач. В частности, выбору оборудования и материалов для изготовления опытных и промышленных партий агломерированных флюсов, оборудования и методик сварки, термической обработки и неразрушающего контроля, определения механических свойств, химического состава, металлографических, дилатометрических и фрактографических исследований металла шва, его сопротивляемости тепловому охрупчиванию и образованию трещин «повторного нагрева».

Третья глава посвящена исследованиям по созданию агломерированного флюса для сварки Cr-Mo-V теплоустойчивых сталей.

Главной задачей при разработке состава агломерированного флюса являлось обеспечение сочетания его высоких сварочно-технологических характеристик и минимального значения коэффициента его активности.

Сварочно-технологические свойства являются одними из основных характеристик сварочного флюса, обуславливающих качество выполнения сварных соединений.

Известно, что существенно повысить ударную вязкость металла шва возможно за счет снижения содержания кислорода, присутствующего в составе неметаллических включений. При автоматической сварке под флюсом содержание кислорода в металле шва находится в прямой зависимости от коэффициента активности флюса A_{Φ} :

$$A_{\Phi} = \frac{SiO_2 + 0.5(TiO_2) + 0.4(Al_2O_3 + Zr_2O_3) + 0.24B^2(MnO)}{100B}, \text{ где}$$

$SiO_2, TiO_2 \dots$ - содержание химических соединений в составе флюса;

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + SrO + K_2O + Na_2O + CaF_2 + 0.5 \cdot (MnO + FeO)}{SiO_2 + 0.5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} - \text{коэффициент ос-}$$

новности флюса.

Поэтому путем прямого эксперимента были исследованы сварочно-технологические свойства 17-и опытных партий флюса, имеющих постоянное содержание 31 % MgO и переменное содержание (15-34) % Al_2O_3 ; (17-30) % CaF_2 ; (10-15) % SiO_2 ; (1-10) % CaO ; (0-12) % TiO_2 ; (0-3) % Zr_2O_3 , при этом A_{Φ} изменялся в пределах 0,055-0,145; коэффициент основности B изменялся в пределах 1,8-3,3. Установлено, что оптимальные сварочно-технологические свойства и минимальное значение A_{Φ} обеспечивает следующая химическая композиция флюса: 31 % MgO –25 % Al_2O_3 –24 % CaF_2 –12 % SiO_2 –7 % CaO ; $A_{\Phi}=0,085$; $B=2,6$.

Установлена зависимость содержания кислорода в металле шва от коэффициента активности флюса, учитывающая содержание кислорода в составе сварочной проволоки при многопроходной сварке (рис. 1).

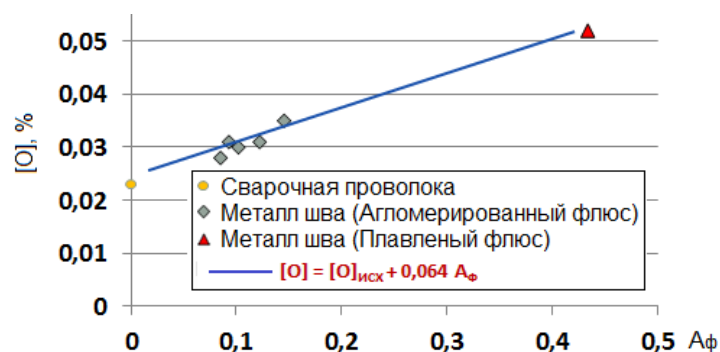


Рис. 1. Зависимость содержания кислорода в металле шва от коэффициента активности флюса

В процессе испытаний опытных партий агломерированного флюса выявлены проблемы при введении в его состав оксида кальция через традиционно применяемые компоненты: волластонит (CaSiO_3) и сфеновый концентрат (CaSiTiO_5). Волластонит имеет высокую склонность к гидратации, что приводит к чрезмерному повышению уровня диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле (рис. 2 а). Сфеновый концентрат имеет высокое содержание примесных элементов, в особенности фосфора, что также отражается на чистоте металла шва (рис. 2 б).

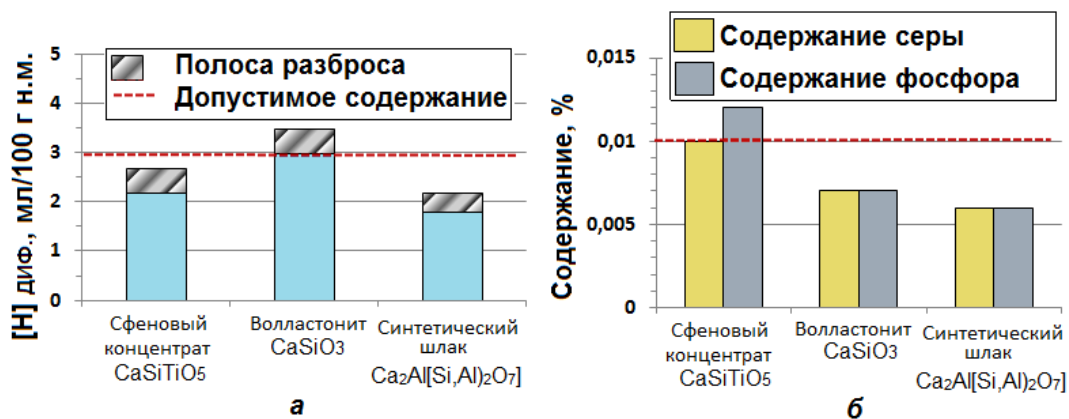


Рис. 2. Содержание диффузионного водорода, определенного по спиртовой методике (а) и примесных элементов (б) в наплавленном металле в зависимости от компонента флюса

На основе анализа тройных диаграмм неметаллических систем разработан состав синтетического компонента, соответствующий тройной эвтектике $\text{Ca}_2\text{Al}[(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_7]$ (минерал геленит) трехкомпонентной диаграммы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3).

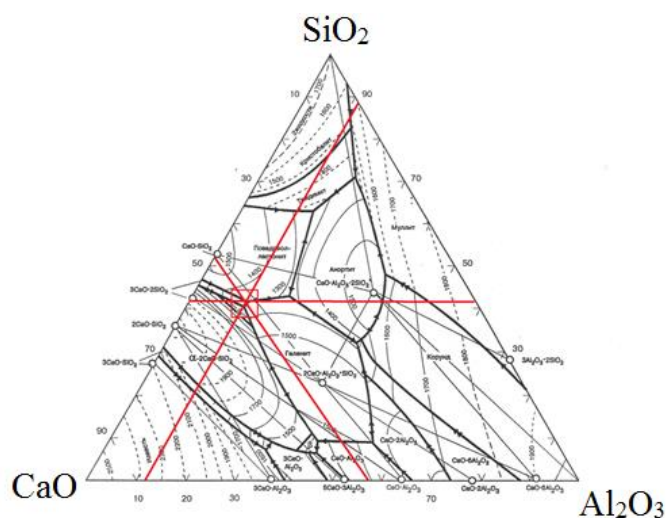


Рис. 3. Тройная диаграмма системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Данный синтетический компонент имеет низкую склонность к гидратации в сравнении с волластонитом, что привело к снижению уровня диффузионно-

подвижного водорода (рис. 2 а). Также он обладает большей чистотой по примесным элементам в сравнении с сфеновым концентратом, что отражается на чистоте металла шва (рис. 2 б).

Исследована зависимость степени окисления легирующих элементов металла шва, выполненного Cr-Mo-V-сварочной проволокой Св-10ХМФТУ-А, от содержания добавки металлического марганца в состав флюса (рис. 4).

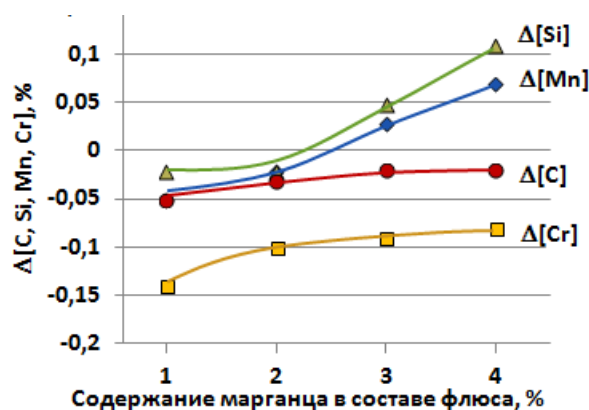


Рис. 4. Зависимость изменения содержания легирующих элементов Cr-Mo-V металла шва от содержания металлического марганца в составе флюса

Повышение содержания марганца до 2 % обеспечивает существенное снижение окисления легирующих элементов, в том числе хрома и углерода. При дальнейшем повышении содержания марганца в составе флюса отмечается активизация кремнийвосстановительного процесса, что может отрицательно повлиять на стойкость металла шва к хрупким разрушениям, особенно в условиях теплового старения.

Исследована зависимость механических характеристик металла шва, выполненного этой же сварочной проволокой в сочетании с опытными партиями агломерированного флюса, имеющими в своем составе различное содержание добавок металлических компонентов: до 1 % ферротитана ФТи35С5, до 0,2 % ферробора ФБр17 и до 0,5 % лигатуры РЗМ АКЦеЖ (рис. 5).

Установлено, что оптимальное сочетание механических свойств металла шва после отпуска с $LMP=19,87$ обеспечивается при введении в состав флюса ферротитана в количестве 0,5 %. При введении ферротитана в количестве 1 %, а также добавок 0,2 ферробора и 0,5 % лигатуры РЗМ, отмечено снижение характеристик пластичности и ударной вязкости наряду с повышением прочности.



Рис. 5. Зависимость механических свойств металла шва от содержания модифицирующих металлических добавок в составе флюса (проволока Св-10ХМФТУ-А, отпуск с $LMP=19,87$)

Таким образом, на основании проведенных исследований, разработан состав низкоактивного агломерированного флюса, имеющий шлаковую основу $MgO - Al_2O_3 - CaF_2 - SiO_2 - CaO$, содержащего в своем составе 15 % синтетического шлака разработанного состава, а также металлические компоненты: 2 % металлического марганца и 0,5 % ферротитана. Данному флюсу присвоена марка 48АФ-71.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному обоснованию выбора составов проволоки для сварки корпусов ВВЭР и РГКН из Cr-Mo-V сталей. В исследованиях по разработке состава агломерированного флюса, приведенных в третьей главе, было установлено, что применение Cr-Mo-V сварочной проволоки в сочетании с низкоактивным агломерированным флюсом при заданном режиме послесварочной термообработки ($LMP=19,87-20,30$) приводит к чрезмерно высоким прочностным характеристикам металла шва наряду с недостаточной ударной вязкостью. Таким образом, установлена необходимость оптимизации химического состава сварочной проволоки в направлении снижения прочностных свойств металла шва и повышения его ударной вязкости.

Проведены сравнительные исследования механических свойств и структуры Cr-Mo-V и Cr-Ni-Mo металла шва, выполненного сварочной проволокой марок Св-10ХМФТУ-А и Св-09ХГНМГАА соответственно в сочетании с флюсом 48АФ-71. Установлено, что Cr-Ni-Mo металл шва при термической обработке с $LMP=19,87$ обеспечивает прочностные характеристики металла шва при температурах до 350 °С на уровне требований к основному металлу (рис. 6 а), а также име-

ет существенные преимущества перед Cr-Mo-V металлом шва по значениям ударной вязкости (рис. 6 б).

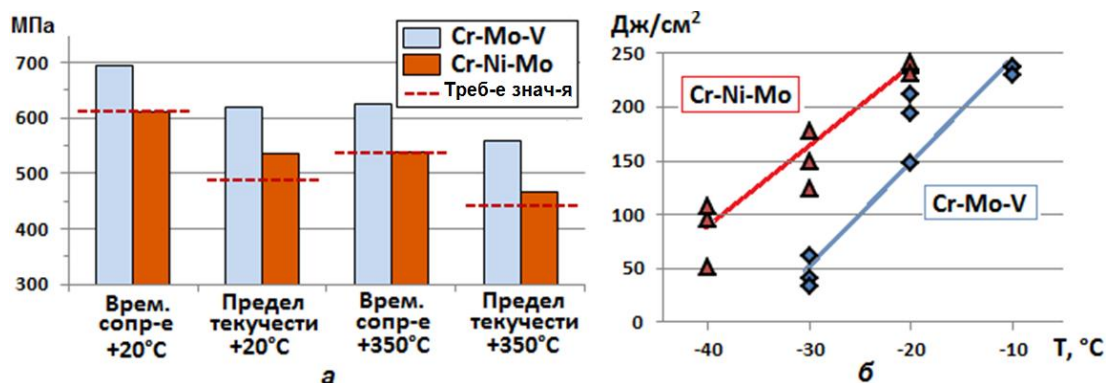


Рис. 6. Прочностные характеристики металла швов, выполненных Cr-Mo-V и Cr-Ni-Mo сварочной проволокой (а), и температурная зависимость их ударной вязкости (б)

При этом известно, что никель оказывает отрицательное влияние на стойкость к радиационному охрупчиванию металла шва. Поэтому проведено исследование влияния снижения содержания никеля в металле Cr-Ni-Mo шва с 1,2 % (при использовании проволоки марки Св-09ХГНМТАА) до 0,6 % (при использовании проволоки опытного состава марки Св-09ХГМТА) на его механические свойства.

Снижение содержания никеля в указанных пределах привело к небольшому снижению прочностных свойств при температуре испытания 350 °С (рис. 7а) и ударной вязкости (рис. 7б) при сохранении прочностных характеристик при температуре испытаний +20 °С и пластичности на том же уровне.

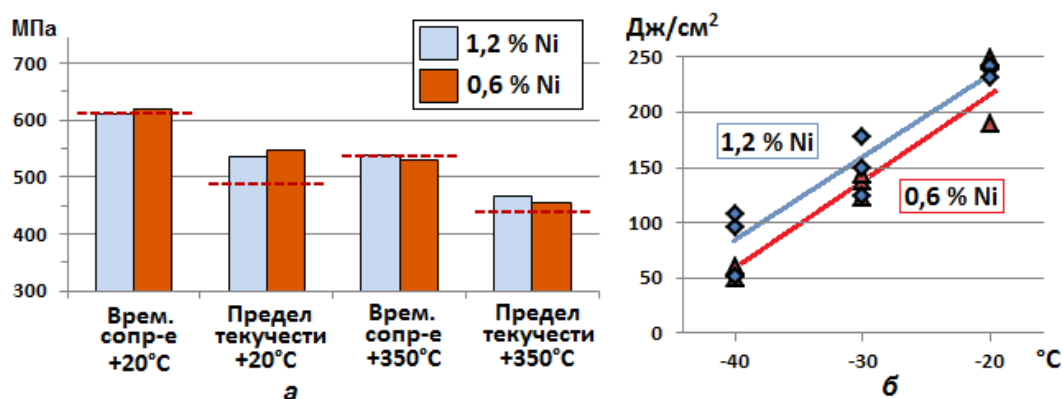


Рис. 7. Прочностные характеристики Cr-Ni-Mo металла шва (а) и температурная зависимость его ударной вязкости (б) при различном содержании никеля

Снижение прочностных свойств металла шва, вызванного уменьшением содержания в нем никеля с 1,2 % до 0,6 %, может быть компенсировано повышением содержания углерода. В связи с этим проведены исследования механических

свойств металла шва, выполненного проволокой марки Св-09ХГМТА, содержащей 0,09 % углерода, и проволокой марки Св-15ХГМТА, содержащей 0,15 % углерода (при содержании остальных легирующих элементов на одном уровне). В составе металла шва при этом содержание углерода повысилось с 0,06 % до 0,09 %. Установлено существенное повышение прочностных характеристик (рис. 8 а) и ударной вязкости (рис. 8 б) при повышении содержания углерода в указанных пределах, что подтвердило правильность выбранного пути решения проблемы.

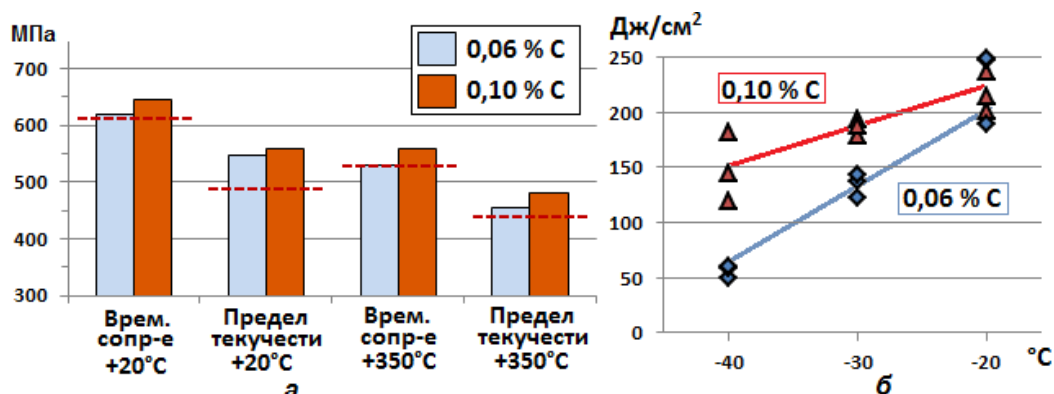


Рис. 8. Прочностные характеристики Cr-Ni-Mo металла шва (а) и температурная зависимость его ударной вязкости (б) при различном содержании углерода

На основании проведенных исследований, установлено, что предъявляемый комплекс требований к механическим характеристикам металла сварных швов корпусов ВВЭР обеспечивается при использовании разработанного агломерированного флюса 48АФ-71 и Cr-Ni-Mo сварочной проволоки марки Св-15ХГМТА.

С учетом условий работы корпусов РГКН металл их сварных швов должен иметь идентичное с основным металлом содержание легирующих элементов. Поэтому в рамках решения задачи создания материалов для сварки корпусов РГКН исследовано влияние содержания легирующих элементов на механические свойства металла шва, выполненных Cr-Mo-V сварочной проволокой марки Св-15Х3ГМФТА, имеющей наиболее близкий химический состав к сталям типа 2¼Cr-1Mo-¼V, в сочетании с флюсом 48АФ-71.

В результате исследования выявлено существенное влияние содержания титана на механические свойства металла шва. При повышении содержания титана с 0,016 % до 0,022 % в металле шва наблюдается увеличение его твердости и прочности (рис. 9 а, б), а также снижение его работы удара (рис. 9 в).

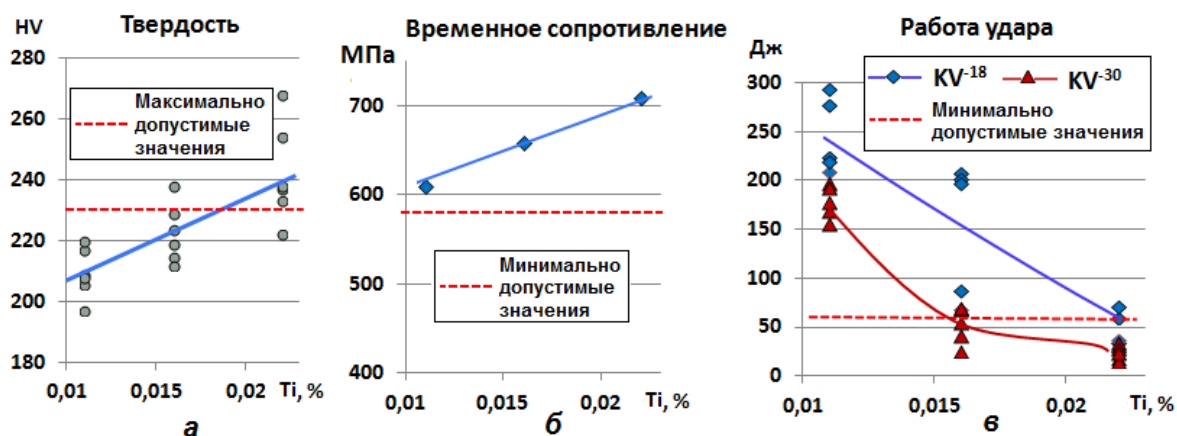


Рис. 9. Зависимость твердости (*а*), прочности (*б*) и работы удара (*в*) Cr-Mo-V металла шва после термообработки ($LMP=20,43$) от содержания в его составе титана

Для обеспечения такого содержания титана в металле шва необходимо снижение его содержания в составе сварочной проволоки Св-15ХЗГМФТА с 0,10 % до 0,06 %, а также исключение ферротитана из состава агломерированного флюса.

Исследовано влияние молибдена на длительную прочность металла шва. Установлено, что при повышении содержания молибдена с 0,6 % до 1,0 % время до разрушения образца (температура испытаний 540 °С, нагрузка 207 МПа) повышается с 415 ч до 1000 ч. При этом кратковременные механические свойства металла шва остаются приблизительно на том же уровне (рис. 10).

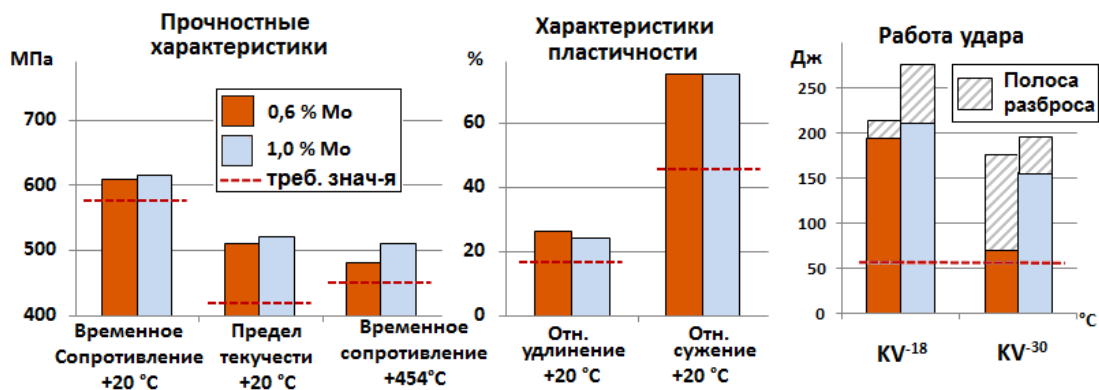


Рис. 10. Механические характеристики Cr-Mo-V металла шва при различном содержании молибдена

Сварочной проволоке со сниженным содержанием титана с 0,10 % до 0,06 % и повышенным содержанием молибдена с 0,6 % до 1,0 % присвоена марка Св-15ХЗГМ1ФТА; флюсу без добавки ферротитана присвоена марка 48АФ-70.

С целью определения оптимальных технологических параметров сварки с использованием разработанных сварочных материалов, для металла шва, выполнен-

ного проволокой Св-15ХГМТА в сочетании с флюсом 48АФ-71 (применительно к сварке корпусов ВВЭР) и металла шва, выполненного проволокой Св-15ХЗГМ1ФТА в сочетании с флюсом 48АФ-70 (применительно к сварке корпусов РГКН) построены термокинетические диаграммы распада аустенита (рис. 11).

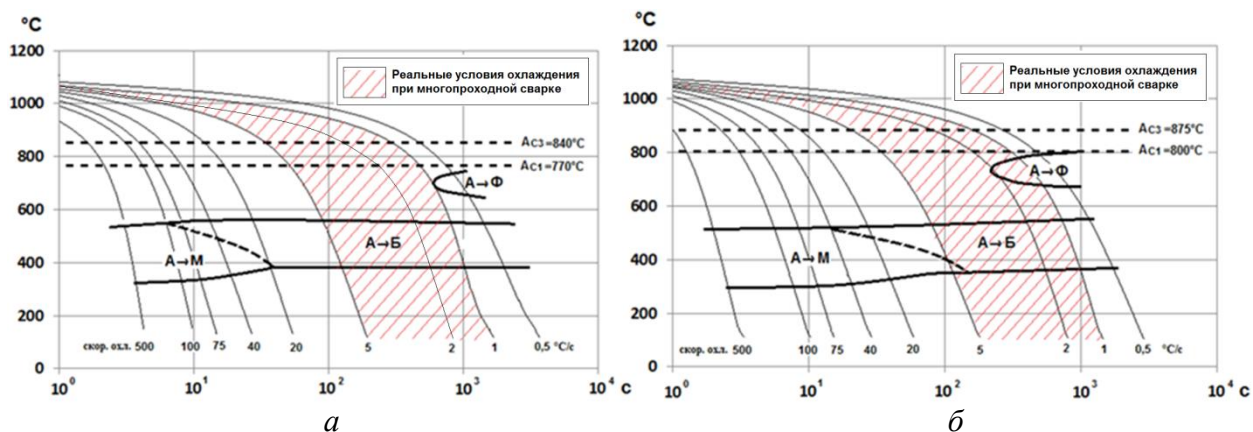


Рис. 11. Термокинетические диаграммы распада аустенита Cr-Ni-Mo (а) и Cr-Mo-V (б) металла шва

Расчетным путем установлено, что в реальных условиях охлаждения в интервале температур 800-500 °С при многопроходной автоматической сварке под флюсом, скорость охлаждения составляет 1-5 °С/с. В этом интервале скоростей охлаждения для Cr-Ni-Mo металла шва корпусов ВВЭР обеспечивается стабильно бейнитная структура (рис. 12 а-в).

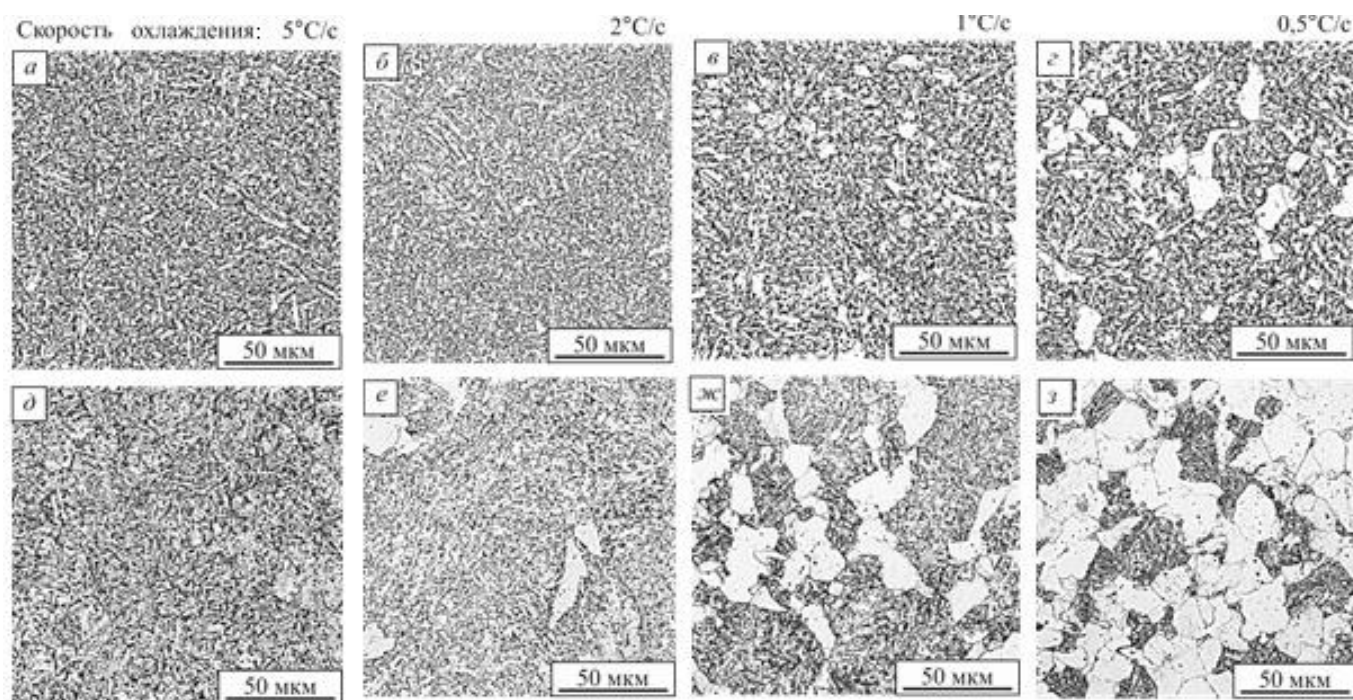


Рис. 12. Структура Cr-Ni-Mo (а) и Cr-Mo-V (б) металла шва при охлаждении с различной скоростью

Для Cr-Mo-V металла шва корпуса РГКН, ввиду различий в содержании легирующих элементов, интервал бейнитного превращения сужен до скоростей охлаждения 2-5 °С/с.

Таким образом, при сварке корпусов РГКН в металле шва возможно образование структурно-свободного феррита (рис. 12 *е-ж*), что может привести к снижению его механических свойств. Учитывая данное обстоятельство, рекомендовано ужесточить технологические параметры сварки, в том числе, температуру подогрева.

В **пятой главе** приведены результаты комплексных испытаний металла сварных швов, выполненных с применением промышленных партий разработанных сварочных материалов.

В рамках мероприятий по промышленному внедрению новых сварочных материалов, на ведущих отечественных машиностроительных предприятиях выполнены кольцевые сварные пробы в толщинах до 390 мм в узкую разделку. Результаты неразрушающего контроля и осмотра поперечных макрошлифов показали отсутствие каких-либо недопустимых дефектов металла шва.

Разрушение образцов на растяжение сварных соединений, выполненных разработанными для сварки корпусов ВВЭР и РГКН материалами, происходило по основному металлу либо по зоне термического влияния, что свидетельствует о равнопрочности металла шва.

Стабильность механических характеристик металл шва, выполненного разработанными материалами, после термообработки по различным циклам оценена по наиболее чувствительной характеристикам – критической температуре хрупкости и работе удара для швов корпусов ВВЭР и РГКН соответственно.

T_{K0} металла шва, выполненного 10-ю сочетаниями партий проволоки Св-15ХГМТА и флюса 48АФ-71, не превышает значений -40 °С (рис. 13 *а*).

Работа удара металла шва, выполненного 5-ю сочетаниями партий проволоки Св-15ХЗГМ1ФТА и флюса 48АФ-70 при температуре испытаний от -30 °С не ниже требуемых значений 55 Дж (рис. 13 *б*).

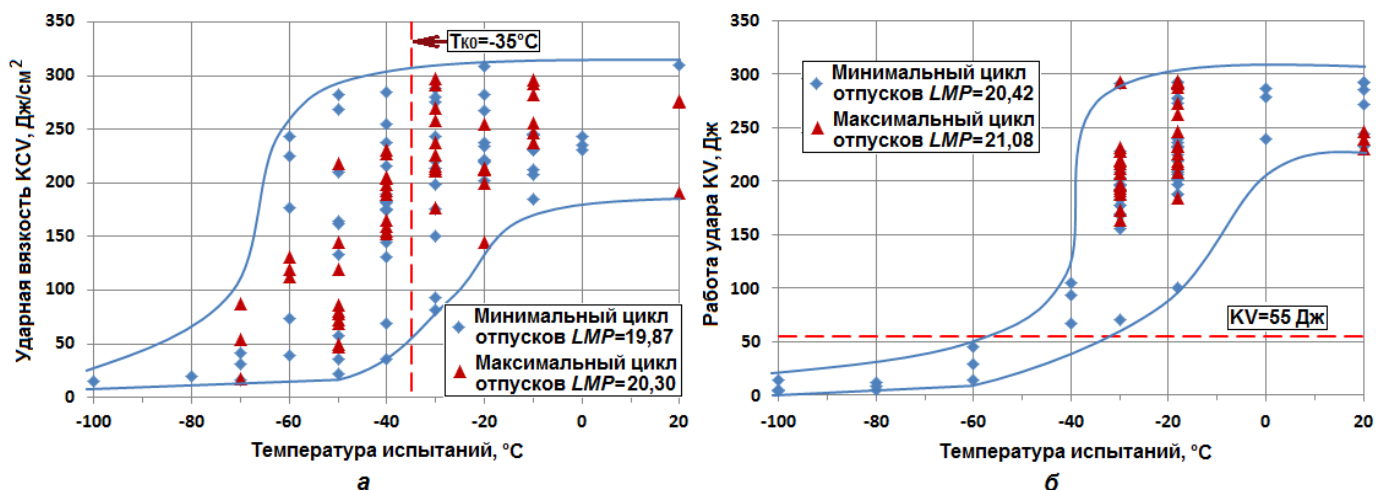


Рис. 13. Температурная зависимость ударной вязкости металла шва, выполненного материалами:
 а – проволока Св-15ХГМТА, флюс 48АФ-71; б – проволока Св-15Х3ГМ1ФТА, флюс 48АФ-70

Склонность к тепловому охрупчиванию металла шва исследована для сочетания Св-15Х3ГМ1ФТА и 48АФ-70 – по принятой в нефтехимическом машиностроении методике «Step Cooling» (рис. 14); для сочетания Св-15ХГМТА и 48АФ-71 – по принятой Нормами атомной энергетики методике «тепловых выдержек» при температуре 350 °С (рис. 15).

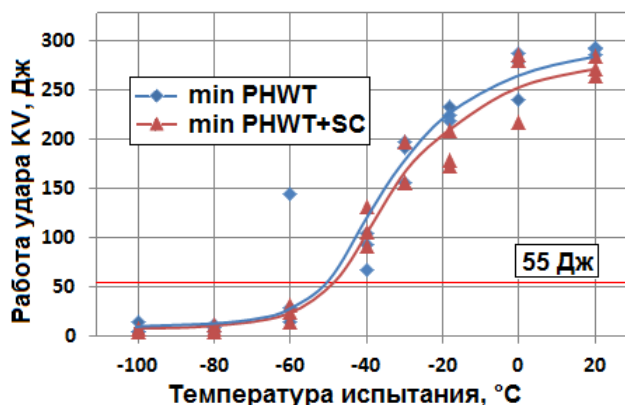


Рис. 14. Температурная зависимость работы удара металла шва, выполненного сварочной проволокой Св-15Х3ГМ1ФТА в сочетании с флюсом 48АФ-70 после отпуска и после теплового охрупчивания «Step Cooling» (по данным ООО «ТК ОМЗ-Ижора»)

Данные рис. 14 свидетельствуют о практически полном отсутствии склонности Cr-Mo-V металла шва корпусов РГКН к тепловому старению (рис. 14).

Для Cr-Ni-Mo металла шва корпусов ВВЭР наблюдается некоторое повышение значения T_T при 3000 ч выдержки, при дальнейшей выдержке, значения T_T возвращаются к исходным (рис. 15).

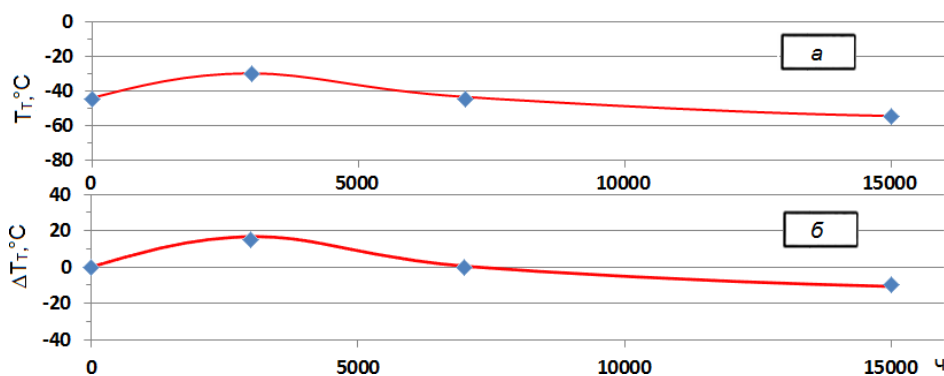


Рис. 15. Зависимость критической температуры хрупкости металла шва, выполненного проволокой Св-15ХГМТА в сочетании с флюсом 48АФ-71 (а), и ее сдвига (б) от продолжительности выдержки при 350 °С

Несмотря на положительный сдвиг $\Delta T_{к0} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ при 3000 ч выдержки, с учетом гарантированного значения $T_{к0} \leq -35 \text{ }^\circ\text{C}$, применение разработанных материалов исключает разрушение металла сварных швов корпуса ВВЭР по механизму хрупкого разрушения на всём протяжении его эксплуатации.

Внедрение результатов работы:

1. Разработана заказная спецификация на поставку синтетического шлака на основе соединения $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Выполнено промышленное освоение изготовления синтетического шлака в условиях флюсоплавильного производства ООО «Ижорские сварочные материалы».

2. Разработаны технические условия на поставку агломерированного флюса марок 48АФ-70 и 48АФ-71:

- ТУ 1479-072-07516250-2011 «Флюс агломерированный марки 48АФ-70. Технические условия»;

- ТУ 1479-083-07516250-2012 «Флюс агломерированный марки 48АФ-71. Технические условия».

Разработана инструкция на изготовление флюса:

- РД5УЕИА.3589-2012 «Флюс сварочный марок 48АФ-70 и 48АФ-71. Технологическая инструкция».

Технология изготовления флюса обеих марок освоена на опытно-промышленной линии ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Гатчина).

3. Разработаны технические условия на поставку сварочной проволоки марки Св-15ХЗГМ1ФТА: Изменение № 1 от 23.09.2014 к ТУ 14-131-1052-2008 «Про-

волока стальная сварочная марок Св-10Х3ГМФТА, Св-15Х3ГМФТА и Св-15Х3ГМ1ФТА. Технические условия».

Изготовление проволоки обеих марок освоено на производственном предприятии АО МЗ «Электросталь» (г. Электросталь, Московская обл.).

4. Разработана технологическая инструкция на применение сварочной проволоки марки Св-15ХГМТА и флюса марки 48АФ-71 при изготовлении оборудования АЭС из стали марки 15Х2МФА-А мод. А: Изменение 1 от 22.11.2013 к РД5.УЕИА.3579-2011 «Сварка, наплавка и термическая обработка сварных соединений при изготовлении оборудования атомных энергетических установок из стали марки 15Х2МФА-А мод. А».

Данные материалы прошли производственное опробование при изготовлении натурального кольцевого сварного соединения в условиях Волгодонского филиала «Атоммаш» АО «АЭМ-технологии».

5. Разработана технологическая инструкция на применение сварочной проволоки марки Св-15Х3ГМ1ФТА и флюса марки 48АФ-70 при изготовлении оборудования нефтехимии из $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ сталей: СТО-07516250-148-2012 «Сварка, термическая обработка, контроль качества и ремонт сварных соединений корпусов нефтехимических реакторов из сталей 2,25Cr-1Mo-0,25V композиции. Технологические указания».

Данные материалы прошли производственное опробование при изготовлении натурального кольцевого сварного соединения в условиях АО «Ижорские заводы».

6. Выполнен полный комплекс аттестационных испытаний сварочных материалов применительно к изготовлению оборудования АЭУ, подготовлен проект Технического решения на применения сварочной проволоки Св-15ХГМТА в сочетании с флюсом 48АФ-71 при изготовлении корпуса и крышки реактора проекта ВВЭР-ТОИ Курской АЭС-2.

7. Получены все необходимые свидетельства НАКС на применение сварочной проволоки марки Св-15Х3ГМ1ФТА и флюса марки 48АФ-70 при изготовлении оборудования нефтехимии из $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ сталей.

Работа проведена в период 2009-2015 годов в рамках федеральных программ развития атомной энергетики, а также в рамках хозрасчетных договоров.

Основные результаты и выводы:

1. Предложен метод повышения чистоты металла шва Cr-Mo-V сталей по примесным элементам серы и фосфора, а также снижения содержания диффузионного водорода при использовании агломерированного сварочного флюса. Данный метод основан на введении в состав флюса синтетического компонента на основе соединения $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{Si},\text{Al}]_2\text{O}_7$. Эффект заключается в снижении гидратации и повышении чистоты флюса по содержанию примесных элементов.

2. Исследовано влияние металлических добавок марганца, титана, бора и РЗМ в составе агломерированного флюса композиции $31\%\text{MgO}-25\%\text{Al}_2\text{O}_3-24\%\text{CaF}_2-12\%\text{SiO}_2-7\%\text{CaO}$ на механические свойства металла шва. Установлено, что оптимальное сочетание механических свойств металла шва корпусов РГКН обеспечиваются при введении в состав флюса 2 % металлического марганца; металла шва корпусов ВВЭР – при введении в состав флюса 2 % металлического марганца и 0,5 % ферротитана марки ФТи35С5. Введение бора, РЗМ и титана сверх указанных пределов ведет к снижению пластичности и ударной вязкости металла шва.

3. Исследованы характеристики металла сварных швов, выполненных сварочной проволокой Cr-Mo-V и Cr-Ni-Mo системы легирования. Установлено, что для металла шва корпусов ВВЭР, ввиду более низких параметров технологического отпуска ($LMP=19,87-20,30$), преимущественна Cr-Ni-Mo система легирования. Для шва корпусов РГКН при $LMP=20,42-21,08$ заданные характеристики металла шва обеспечиваются при использовании Cr-Mo-V системы легирования.

4. Установлено что изменение содержания никеля в диапазоне 0,6-1,2 % не оказывает существенного влияния на механические свойства Cr-Ni-Mo металла шва, в то время как повышение содержания в нем углерода с 0,06 до 0,10 % приводит к существенному повышению как прочностных характеристик, так и его ударной вязкости.

5. Исследовано влияние титана на механические свойства Cr-Mo-V металла шва корпусов РГКН. Установлено, что для обеспечения характеристик пластичности и работы удара металла шва необходимо ограничение содержания в нем титана до 0,014 %.

6. Исследовано влияние молибдена на характеристики длительной прочности Cr-Mo-V металла шва корпусов РГКН. Установлено, что при температуре 540 °С и нагрузке 207 МПа, время до разрушения образца на длительную прочность увеличивается с 415 ч до 1000 ч при повышении содержания молибдена с 0,6 % до 1,0 %. При этом существенного изменения кратковременных механических характеристик металла шва не отмечено.

7. Исследована кинетика распада аустенита металла шва в условиях термических циклов сварки с использованием разработанных сварочных материалов. Установлено, что при одних и тех же скоростях охлаждения, структура Cr-Ni-Mo и Cr-Mo-V металла шва имеет существенные различия. В первом случае присутствие никеля смещает ферритную область на диаграмме термокинетического распада аустенита в сторону меньших скоростей охлаждения. Во втором случае, повышенное содержание таких элементов, как хром, молибден и ванадий, расширяет область бездиффузионного мартенситного превращения и смещает мартенситную область в сторону меньших скоростей охлаждения.

8. На основе выполненных исследований выбрано сочетание материалов для автоматической сварки корпусов ВВЭР из стали 15X2МФА-А мод. А, обеспечивающих прочностные свойства и критическую температуру хрупкости металла шва на уровне требований к основному металлу: сварочная проволока Св-15ХГМТА и агломерированный флюс 48АФ-71.

9. Разработаны новые материалы для сварки корпусов РГКН из сталей типа $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$, обеспечивающие комплекс требований к металлу шва: сварочная проволока Св-15ХЗГМ1ФТА и агломерированный флюс 48АФ-70.

10. Разработана и промышленно освоена технология сварки с использованием новых сварочных материалов. Выполнены полнотолщинные кольцевые сварные соединения в узкую разделку. Выпущена вся необходимая нормативно-техническая документация, проведены аттестационные испытания.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Исследование свойств металла шва, выполненного с использованием агломерированного флюса, приме-

нительно к сварке корпусов водо-водяных атомных реакторов // **Вопросы материаловедения.** – 2014. № 4 (80).– С. 148-155.

2. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н., Михалева Э. И. Влияние модифицирующих добавок в составе агломерированного флюса на структуру и свойства металла сварных швов Cr-Mo-V теплоустойчивой стали // **Сварочное производство.** – 2015. №7. – С. 16-20.

3. Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Тимофеев М. Н. и др. Новые материалы для автоматической сварки современных реакторов гидрокрекинга нефти из стали 2,25%Cr-1%Mo-0,25%V композиции // **Нефтепереработка и нефтехимия.** – 2015. № 12. – С. 32-36.

4. Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Михалева Э. И., Тимофеев М. Н. Исследование влияния термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения металла сварных швов хромомолибденованадиевых теплоустойчивых сталей // **Вопросы материаловедения.** – 2016. № 1 (85). – С. 108-115.

5. Патент № 2530611 Бюллетень изобретений №28 от 10.10.2014. Сварочная проволока для автоматической сварки теплоустойчивых сталей перлитного класса // Тимофеев М. Н., Гордиенков Ю. С., Воронов А. В. и др. Бюллетень изобретений №28 от 10.10.2014.

6. Патент № 2535160. Агломерированный флюс 48АФ-70 // Тимофеев М. Н., Гордиенков Ю. С., Воронов А. В. и др. Бюллетень изобретений №34 от 10.12.2014.

7. Создание высокотехнологического агломерированного флюса для сварки сталей аустенитного класса применительно к изготовлению атомных энергетических установок / Тимофеев М. Н. Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 20-22 июня 2012 г. – СПб.: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2013, С. 83-88.

8. Создание новых сварочных материалов, обеспечивающих равнопрочность сварных соединений основному металлу применительно к корпусам реакторов типа ВВЭР / Тимофеев М. Н. Тезисы докладов XII конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 17-19 июня 2013 г., Санкт-Петербург, С. 12.

9. Создание материалов для ручной и автоматической сварки корпусов современных реакторов гидрокрекинга нефти / Тимофеев М. Н. Тезисы докладов XIII конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 18-20 июня 2014 г., Санкт-Петербург, С. 44.

10. Новые материалы для автоматической сварки оборудования из стали 15X2МФА-А перспективных АЭУ типа ВВЭР, обеспечивающие свойства металла шва на уровне требований к основному металлу / Тимофеев М. Н. Сборник тезисов XIII международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», 02-06 июня 2014 г., Санкт-Петербург, С. 18.

11. Повышение эксплуатационных характеристик сварных соединений корпусов перспективных реакторов типа ВВЭР / Тимофеев М. Н. Сборник докладов конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (25-26 ноября 2015 г.) – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2015, С. 564-571.

12. Снижение критической температуры хрупкости металла сварных швов корпусов реакторов типа ВВЭР нового поколения / Тимофеев М. Н. Тезисы докладов Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», 05-07 апреля 2016 г., Дмитровград, С. 8.

13. Материалы для ручной и автоматической сварки современных реакторов гидрокрекинга нефти из стали 2,25%Cr-1%Mo-0,25%V композиции. Импортозамещение / Тимофеев М. Н. Сборник тезисов VIII Международного промышленного форума «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении», 11-15 апреля 2016 г., Челябинск, С. 53.

14. Результаты аттестационных испытаний новых материалов для автоматической сварки оборудования перспективных АЭУ из стали 15X2МФА-А мод. А / Тимофеев М. Н. Сборник тезисов XIV международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», 06-10 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Зеленогорск, С. 24.

Подписано в печать 31.08.2016 г.

Формат 60x48 1/16

Печать офсетная

Усл.п.л. 1,4 Уч.-изд.л. 1.05.

Тираж 90 экз. Заказ № 2/169

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49

Лицензия на издательскую деятельность

Лр №020644 от 13 октября 1997