

УДК 621.791.011
ГРНТИ 81.35.13



СКУТИН Виталий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И
ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО МИНУС 50 °С**

Специальность: 05.02.10 - сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2015

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

Научный руководитель:

Галяткин Сергей Николаевич

Кандидат технических наук,
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт кон-
струкционных материалов «Прометей»;
начальник лаборатории «Сварка энергетического
оборудования»

Официальные оппоненты:

Зубченко

Александр Степанович

Доктор технических наук, профессор
Акционерное общество «Опытное Конструкторское бюро
«Гидропресс»;
заместитель генерального директора по научной работе

Мурзин

Виктор Васильевич

Кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образователь-
ное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный морской технический
университет»;
заведующий кафедры «Сварка судовых конструкций»

Ведущая организация:

Акционерное общество
«Конструкторское бюро специального машиностроения»

Защита диссертации состоится «2» марта 2016 г. в 11ч.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.crism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=8>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук,
профессор



Мальшевский В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время проблема переполнения отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) пристанционных хранилищ АЭС, утилизация транспортных атомных энергетических установок и ограниченные мощности перерабатывающего ОЯТ комплекса обусловили создание в Российской Федерации транспортных упаковочных комплектов металлобетонных контейнеров (ТУК МБК), позволяющих производить многократную транспортировку ОЯТ и обеспечивать экологическую безопасность при его длительном хранении (не менее 50 лет).

Основным условием обеспечения ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации ТУК МБК является сохранение его герметичности при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях, включающих падение с высоты 140 м на скальное основание при температуре минус 50 °С. В связи с этим предъявляется принципиально новое в атомной энергетике требование по обеспечению хладостойкости металла силовых элементов и сварных соединений ТУК МБК.

Так, металл шва, зоны термического влияния и основной металл из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А должен обеспечивать уровень ударной вязкости KCV не менее 29,4 Дж/см² при температурах до минус 50 °С в исходном состоянии после сварки и после проведения высокого отпуска сварных соединений.

Актуальность настоящей диссертационной работы обусловлена следующими обстоятельствами:

1. Разработанные в соответствии с действующими правилами и нормами в атомной энергетике технологии сварки не предназначены для изготовления металлоконструкций из низколегированных сталей, эксплуатируемых при температуре минус 50°С. При этом отсутствует научно-методический подход к выбору технологических параметров и режимов дуговой сварки кремнемарганцовистой стали, обеспечивающий формирование структурных состояний металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) с требуемой хладостойкостью.

2. Конструктивное исполнение ТУК МБК включает порядка 400 сварных соединений, при выполнении которых необходимо использовать сварочные материалы и технологии для различных способов сварки.

3. Наиболее близкие по химическому составу к основному металлу стали 09Г2СА-А сварочные материалы композиции С-Mn-Si допускаются к применению в ответственных сварных металлоконструкциях при температурах не ниже минус 20 °С (при наличии требований по обеспечению $KCV \geq 30$ Дж/см²).

4. В случае использования отличающихся по системе легирования и более дорогостоящих сварочных материалов с никелем (0,8÷1,5 %) и молибденом (0,3÷0,5 %), не обеспечивается требуемая хладостойкость металла шва при температуре минус 50 °С в состоянии после высокого отпуска, который необходим для большей части сварных элементов ТУК МБК.

5. При использовании существующих технологий сварки под воздействием термического цикла существенно снижается ударная вязкость при отрицательных температурах в ЗТВ сварных соединений из кремнемарганцовистых сталей.

Цель работы и основные задачи исследования

Целью работы является изучение основных факторов и экспериментальное подтверждение условий формирования хладостойкой структуры металла шва и ЗТВ, обеспечивающих ударную вязкость сварных соединений из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А в состоянии до и после высокого отпуска $KCV^{-50} \geq 29,4$ Дж/см² при разработке технологии сварки контейнеров для транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива.

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические задачи:

1. Научно обоснован выбор унифицированных химических композиций сварочных материалов для ручной, механизированной и автоматической дуговой сварки под флюсом стали марки 09Г2СА-А.

2. Научно обоснованы условия формирования хладостойкой структуры металла шва, обеспечивающей ударную вязкость $KCV^{-50} \geq 29,4$ Дж/см², как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска.

2.1 Исследовано влияние технологических параметров сварки на характеристики термического цикла и микроструктуру металла шва.

2.2 Исследовано влияние параметров режима сварки на геометрические размеры и форму сварочных валиков.

2.3 Исследовано влияние раскладки и формы валиков на процентное соотношение перекристаллизованной и литой структуры в металле шва.

2.4 Исследовано влияния микро- и макро- структуры на хладостойкость металла шва в состоянии до и после высокого отпуска.

2.5 Выбраны оптимальные технологические параметры сварки и диапазоны погонной энергии для ручной, механизированной и автоматической дуговой сварки под флюсом.

3. Научно обоснованы условия формирования хладостойкой структуры металла ЗТВ сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А, обеспечивающей ударную вязкость $KCV^{-50} \geq 29,4$ Дж/см².

3.1 Исследовано влияние технологических параметров сварки на характеристики термического цикла, структуру и хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений.

3.2 Исследовано влияние структурной неоднородности и размера зерна полупластиков основного металла на хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений.

4. Разработана и освоена в отечественной промышленности технология сварки металлоконструкций из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А контейнеров для транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива, обеспечивающая высокую хладостойкость металла шва и зоны термического влияния сварных

соединений при температуре минус 50°C, как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Выявленные закономерности и условия формирования хладостойкой при температуре минус 50 °С структуры металла шва, выполненного композициями сварочных материалов типа С-Mn-Si и С-Mn-Ni ручной, механизированной и автоматической дуговой сваркой под флюсом.

2. Экспериментальные зависимости влияния на ударную вязкость металла шва при температуре минус 50 °С погонной энергии, режимов сварки, межваликовой температуры и раскладки валиков, а также содержания вредных примесей, как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения термической обработки.

3. Результаты исследования причин повышения и снижения ударной вязкости металла шва при температуре минус 50 °С в зависимости от структурно-фазовых превращений в процессе проведения высокого послесварочного отпуска.

4. Результаты исследований взаимосвязи технологических параметров сварки, структуры и хладостойкости металла ЗТВ сварных соединений стали марки 09Г2СА-А при температуре минус 50 °С с учетом оценки структурной неоднородности и размера зерна полуфабрикатов основного металла.

Научная новизна

На основании результатов выполненных исследований и полученных закономерностей установлены условия формирования хладостойкой структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А:

1. Установлено, что в результате высокого отпуска, необходимого для повышения хладостойкости металла ЗТВ и снижения остаточных сварочных напряжений металлоконструкций контейнеров для ОЯТ, происходит распад промежуточных структур феррито-бейнитного типа, что может приводить к рекристаллизации структурно свободного феррита и резкому снижению ударной вязкости металла шва композиции С-Mn-Ni и С-Mn-Si при температуре минус 50 °С.

2. Установлено, что формирование структурных состояний металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni, помимо скорости охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С, также зависит от скорости охлаждения в высокотемпературном интервале 1200-800 °С.

Условия формирования хладостойкой структуры игольчатого феррита, характеризующегося высокой устойчивостью к распаду при отпуске, включают охлаждение металла шва со скоростями $V_{1200-800} = 40-60$ °С/с и $V_{800-500} = 20-30$ °С/с.

Увеличение скорости охлаждения металла шва $V_{1200-800}$ до 80-120 °С/с, при скорости $V_{800-500} = 30-40$ °С/с, способствует формированию неустойчивых к высокому отпуску мелкодисперсных промежуточных структур бейнитного типа.

3. Получены возрастающие зависимости ударной вязкости KCV^{50} от процентного содержания перекристаллизованной структуры в сечении металла шва, в состоянии до и после высокого отпуска.

Установлено, что при содержании перекристаллизованной структуры в сечении металла шва менее 45 % высокий отпуск снижает ударную вязкость. Формирование в макроструктуре шва свыше 45% однородной перекристаллизованной структуры позволяет повысить его хладостойкость после высокого отпуска.

Указанный эффект связан с разнонаправленным воздействием отпуска на литую и перекристаллизованную структуру. Отпуск литой структуры приводит к частичной рекристаллизации феррита и, как следствие, к снижению ударной вязкости шва. Отпуск перекристаллизованной структуры позволяет повысить однородность дисперсной феррито-перлитной смеси, способствует сфероидизации карбидной фазы и увеличивает ударную вязкость металла шва.

4. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность использования экономнолегированных безникелевых сварочных материалов композиции С-Mn-Si для сварки кремнемарганцовистой стали, с обеспечением хладостойкости металла шва при температуре минус 50°С в состоянии до и после проведения высокого отпуска.

5. Установленные оптимальные сочетания технологических параметров сварки позволяют предотвратить формирование крупнозернистой структуры на участке перегрева зоны термического влияния кремнемарганцовистой стали и обеспечить хладостойкость металла сварного соединения при температуре минус 50 °С.

6. На основании полученных экспериментальных зависимостей и результатов исследований научно обоснованы требования и экспериментально подтверждены условия формирования хладостойкой при температурах до минус 50 °С структуры металла шва сварных соединений из кремнемарганцовистой стали, как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, планировании и подготовке экспериментов, руководстве и непосредственном участии в их проведении, получении, анализе и обобщении научных результатов, промышленном внедрении разработок и включает в себя:

1. Исследование влияния технологических параметров сварки и погонной энергии на характеристики термического цикла сварки металла шва и ЗТВ, условия анизотермического распада аустенита при охлаждении, а также на геометрические характеристики и форму валиков сварного шва.

2. Исследование фазовых и структурных превращений металла шва, а также ЗТВ сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А, в зависимости от параметров режима сварки, величины погонной энергии, межваликовой температуры и раскладки валиков при заполнении разделки.

3. Исследование хладостойкости металла шва в зависимости от его химического состава и структурных состояний, как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения термической обработки.

4. Исследование влияния технологических параметров сварки, а также структурной неоднородности и размера зерна основного металла на хладостойкость сварных

соединений из листового проката и поковок кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А в состоянии до и после высокого отпуска.

5. Разработку технологии ручной, механизированной и автоматической дуговой сварки металлоконструкций из кремнемарганцовистой стали контейнеров для ОЯТ, обеспечивающей высокую хладостойкость металла шва и зоны термического влияния при температуре минус 50 °С, как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска.

6. Модернизацию и разработку технических условий на кремнемарганцовистые сварочные материалы для сварки стали марки 09Г2СА-А. Разработку дополнительных требований и корректировку руководящей документации на сварку ТУК МБК. Подготовку и согласование в «Ростехнадзоре» РФ технических решений об использовании кремнемарганцовистых сварочных материалов при изготовлении металлоконструкций контейнеров ОЯТ из стали марки 09Г2СА-А.

7. Участие в материаловедческом сопровождении при промышленном освоении разработанной технологии сварки стали марки 09Г2СА-А на отечественных предприятиях-изготовителях контейнеров для ОЯТ, в частности, при разработке карт технологических процессов сварки (спецификаций процессов сварки и т.п.), рассмотрении и согласовании производственно-технологической документации на сварку, сопровождении производственной аттестации технологии сварки, изготовлении и испытании производственных контрольных сварных соединений (ПКСС), а также при изготовлении наиболее ответственных сварных соединений изделий ТУК МБК.

Достоверность основных результатов, положений, выводов и рекомендаций подтверждена большим объемом выполненных экспериментов в лабораторных и промышленных условиях, включая испытания при аттестации технологии сварки и сварочных материалов, при изготовлении производственных контрольных сварных соединений. Также достоверность подтверждена положительным опытом освоения разработанной технологии сварки при изготовлении на различных отечественных промышленных предприятиях не менее 150 контейнеров для ОЯТ.

Практическая значимость работы

1. Разработана и освоена в отечественной промышленности технология сварки металлоконструкций из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А контейнеров для транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива, обеспечивающая высокую хладостойкость металла шва и зоны термического влияния сварных соединений (ТУК-120, ТУК-108/1, ТУК-109, УКХ-123 в ОАО «ПО «Севмаш», ТУК-109, УКХ-123, ТУК-104 в ЗАО «Энерготекс», ТУК-109 в ОАО «Ижорские заводы», ТУК-104 в ОАО «Савеловский машиностроительный завод» и ОАО «Уралхиммаш»).

2. Установлены требования для формирования хладостойкой структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А в состоянии до и после проведения высокого отпуска:

- в части технологии сварки – оптимизация параметров сварки и величины погонной энергии, последовательное заполнение разделки в раскладку валиками, обеспечивающее количество перекристаллизованной структуры в сечении шва не менее 35%, регламентирование межваликовой температуры на уровне ≤ 100 °С и ограниченное содержание вредных примесей в сварочных материалах ($S \leq 0,012$ %, $P \leq 0,013$ %);

- в части требований к полуфабрикатам из стали марки 09Г2СА-А - необходимость обеспечения однородной структуры основного металла с 7-8 баллом зерна, минимальные сдаточные значения ударной вязкости $KCV^{-50} \geq 98$ Дж/см² (извещение №5 к № ТУ05764417-064-97 на поковки из стали марки 09Г2СА-А).

3. Выполнена модернизация сварочных материалов композиции типа С-Mn-Si для сварки стали марки 09Г2СА-А, в результате которой разработаны ТУ 5.965-11840-2004 «Проволока стальная сварочная марок Св-08ГСА-А и Св-08Г2СА-А» и ТУ 5.965-11839-2004 «Электроды марок УОНИИ-13/55АА и УОНИИ-13/45АА».

4. Использование разработанной технологии сварки и сварочных материалов композиции С-Mn-Si для сварки металлоконструкций ТУК МБК из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А ручным, механизированным и автоматическим способом сварки согласовано Федеральной службой по атомному надзору РФ (в настоящее время «Ростехнадзор» РФ). Результаты работы отражены в части требований РД5.УЕИА.3153/3232-99 «Руководящий документ. Сварка, наплавка и термическая обработка основного металла и сварных соединений деталей и узлов металлобетонных контейнеров транспортно-упаковочного комплекта» (Извещение РД-6-90.7728 об изменении №2). Изменение согласовано в Федеральной службе по экологическому технологическому и атомному надзору (в настоящее время «Ростехнадзор» РФ).

Апробация работы

Результаты работы были представлены научной общественности и обсуждались на следующих конференциях:

- XI, XII, XIII международных конференциях «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург 2010, 2012, 2014 г.

- II Международной выставке и конгрессе «Перспективные технологии XXI века» при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации Федерального агентства по науке и инновациям, Москва, 2008г.

- III, IV, VI научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов материаловедов, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург 2004, 2005, 2007 г.

- Межотраслевой научно-практической конференции «Корабельная ядерная энергетика», ФГУП «ОКБМ», Нижний-Новгород 2004г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 3 в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 в международном издании, включенном в международные базы цитируемости, разработки защищены 3 патентами РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа объемом 222 страницы состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы из 90 наименований и включает 6 приложений. Работа содержит 81 рисунок и 24 таблицы.

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 литературный обзор, в котором рассмотрены назначение, типы, схема и конструктивные элементы металлобетонных контейнеров (ТУК МБК), предназначенных для многоразовой транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Представлены условия эксплуатации ТУК МБК и основные требования к сварным соединениям силовых элементов из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А. Рассмотрены характеристики и требования к кремнемарганцовистым сталям для объектов хладостойкого исполнения, а также особенности их сварки.

На основании анализа нормативной и научно-технической литературы показано, что к металлу шва и сварным соединениям ТУК МБК предъявляются более высокие требования по обеспечению хладостойкости по сравнению с традиционными требованиями к сварным соединениям кремнемарганцовистых сталей. Кроме того, установлено, что в отечественной промышленности отсутствуют технологии и опыт изготовления сварных металлоконструкций с использованием крупногабаритных поковок из стали марки 09Г2СА-А в толщинах до 350 мм, обеспечивающие требование $KCV^{50} \geq 29,4$ Дж/см² для металла шва и ЗТВ сварных соединений в состоянии до и после высокого отпуска. В связи с этим рассмотрены общие принципы обеспечения хладостойкости металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений из низколегированных сталей.

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

Во второй главе представлены материалы и методика исследований.

Приведены характеристики основных и сварочных материалов, исследованных в работе, показаны форма подготовки кромок, виды и типоразмеры экспериментальных сварных проб. В качестве основных материалов для изготовления сварных соединений использовался листовой прокат и поковки из стали марки 09Г2СА-А, в качестве сварочных материалов использовались покрытые электроды и сварочные проволоки с композициями легирования типа С-Mn-Ni и С-Mn-Si.

Представлены оборудование и методы имитационного моделирования термомеханических условий при различных способах сварки, а также оборудование и методы замеров термических циклов сварки металла шва и ЗТВ реальных сварных соединений. Приведены методики комплексных исследований структуры и механических свойств

металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 09Г2СА-А в состоянии до и после высокого отпуска.

Предложенный комплекс исследований структуры и механических свойств металла сварных соединений стали марки 09Г2СА-А позволил выполнить поставленные задачи диссертационной работы, достоверно изучить факторы и экспериментально подтвердить условия формирования хладостойкой структуры металла шва и ЗТВ, а также подтвердить качество и хладостойкость производственных сварных соединений ТУК МБК, выполненных по разработанной технологии сварки.

Третья глава посвящена исследованиям металла шва сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А, выполненных ручной, механизированной и автоматической дуговой сваркой под флюсом, с целью научного обоснования условий формирования хладостойкой при температуре минус 50°С структуры шва, обеспечивающей $KCV^{50} \geq 29,4$ Дж/см² в состоянии до и после проведения высокого отпуска.

В качестве унифицированных легирующих композиций сварочных материалов для сварки стали марки 09Г2СА-А выбраны композиции С-Мn-Si и С-Мn-Ni.

Выбор указанных композиций основан на результатах исследований влияния термокинетических условий на анизотермический распад переохлажденного аустенита при имитации процессов сварки.

Установлено, что анизотермический распад переохлажденного аустенита металла шва композиции С-Мn-Ni (рисунок 1а) сопровождается феррито-бейнитным превращением в широком диапазоне скоростей охлаждения ($V_{800-500} = 10 - 80$ °С/с), а для металла шва композиции С-Мn-Si указанное превращение протекает при скоростях охлаждения не менее 20 °С/с (рисунок 1б). При более низких скоростях охлаждения анизотермический распад аустенита металла шва композиции С-Мn-Si сопровождается феррито-перлитным превращением по диффузионному механизму.

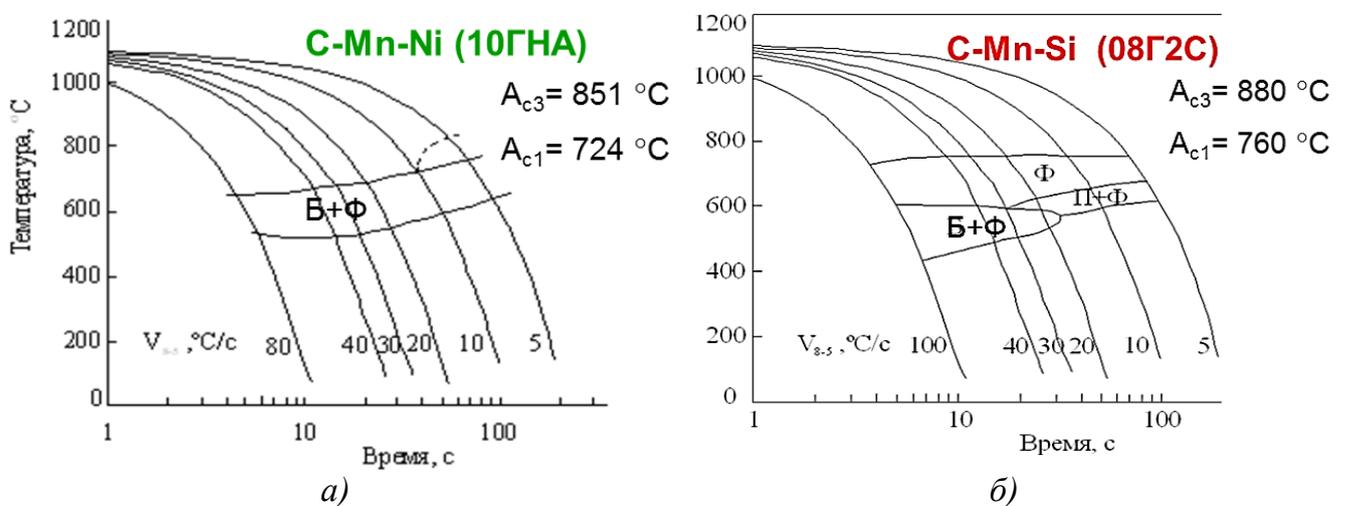


Рисунок 1 – Термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита металла шва композиции типа С-Мn-Ni (а) и С-Мn-Si (б)

В результате исследований влияния термокинетических условий на структурные и фазовые превращения металла шва композиции С-Мn-Si (рисунок 2) и С-Мn-Ni (рисунок 3) установлено, что формирование структурных состояний металла шва указанных композиций помимо скорости охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С также зависит от скорости охлаждения в высоко-температурном интервале 1200-800 °С.

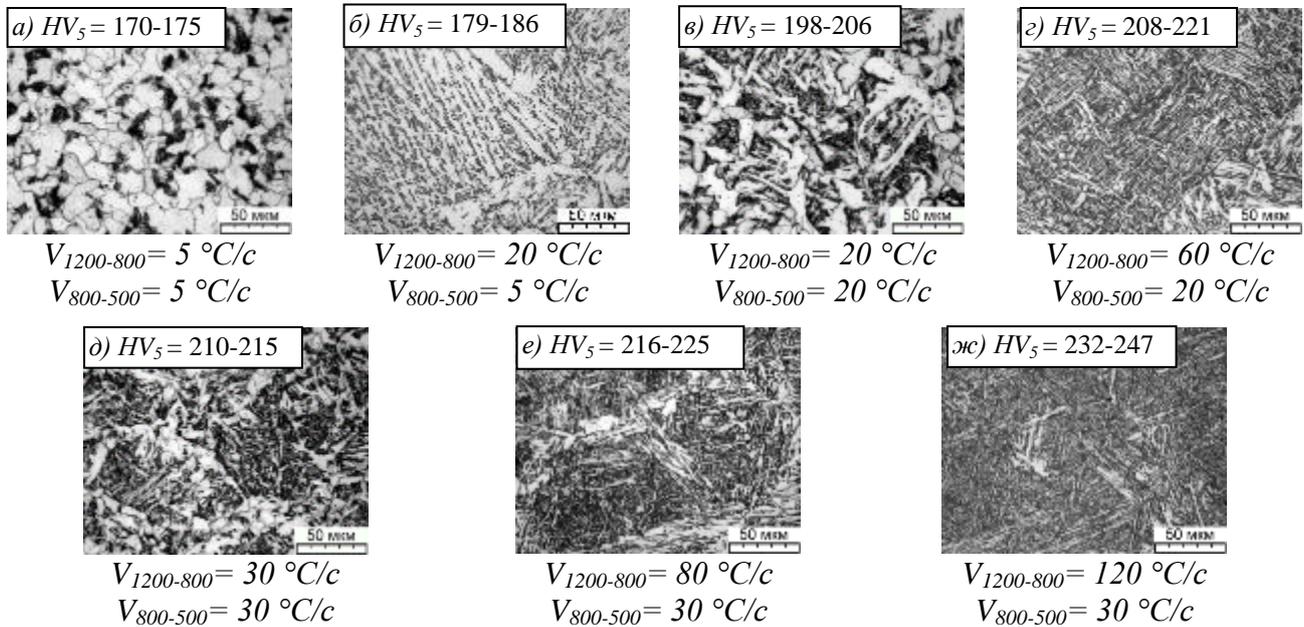


Рисунок 2 – Микроструктура металла шва композиции С-Мn-Si в зависимости от скорости охлаждения $V_{1200-800}$ и $V_{800-500}$ при дилатометрических испытаниях

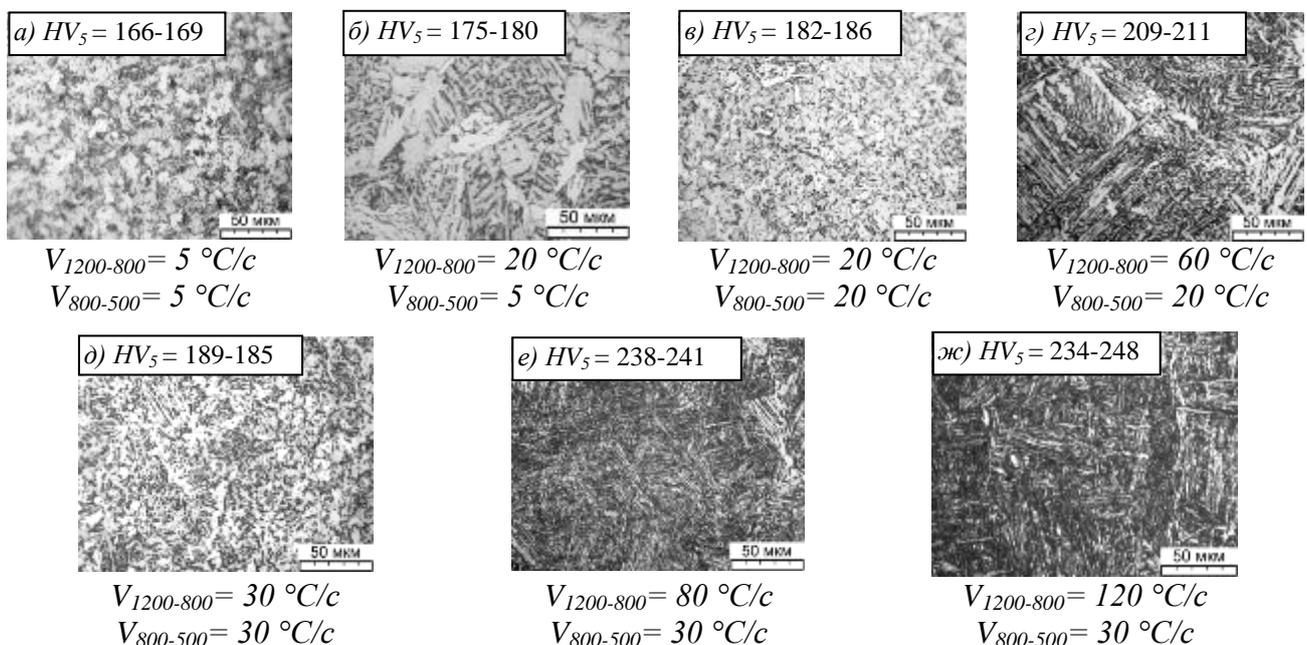


Рисунок 3 – Микроструктура металла шва композиции С-Мn-Ni в зависимости от скорости охлаждения $V_{1200-800}$ и $V_{800-500}$ при дилатометрических испытаниях

Условия формирования хладостойкой структуры игольчатого феррита, характеризующегося высокой устойчивостью при отпуске, включают охлаждение металла шва со скоростями $V_{1200-800} = 40-60$ °C/c и $V_{800-500} = 20-30$ °C/c (рисунки 2 г и 3 г).

Увеличение скорости охлаждения металла шва $V_{1200-800}$ до 80-120 °C/c, при скорости $V_{800-500} = 30-40$ °C/c, способствует формированию неустойчивых при высоком отпуске мелкодисперсных промежуточных структур бейнитного типа (рисунки 2 е, ж и 3 е, ж).

Структурные изменения металла шва, в зависимости от условий охлаждения в интервалах температур 1200-800 °C и 800-500 °C, связаны со сдвигом критических температур полиморфного превращения. Увеличение скорости охлаждения металла шва в интервале 1200-800 °C может быть причиной усиления неоднородности переохлажденного аустенита по углероду и приводит к снижению критических температур полиморфного превращения для композиции С-Mn-Si на величину от 45 до 117 °C (рисунок 4а) и для композиции С-Mn-Ni на величину от 39 до 126 °C (рисунок 4б).

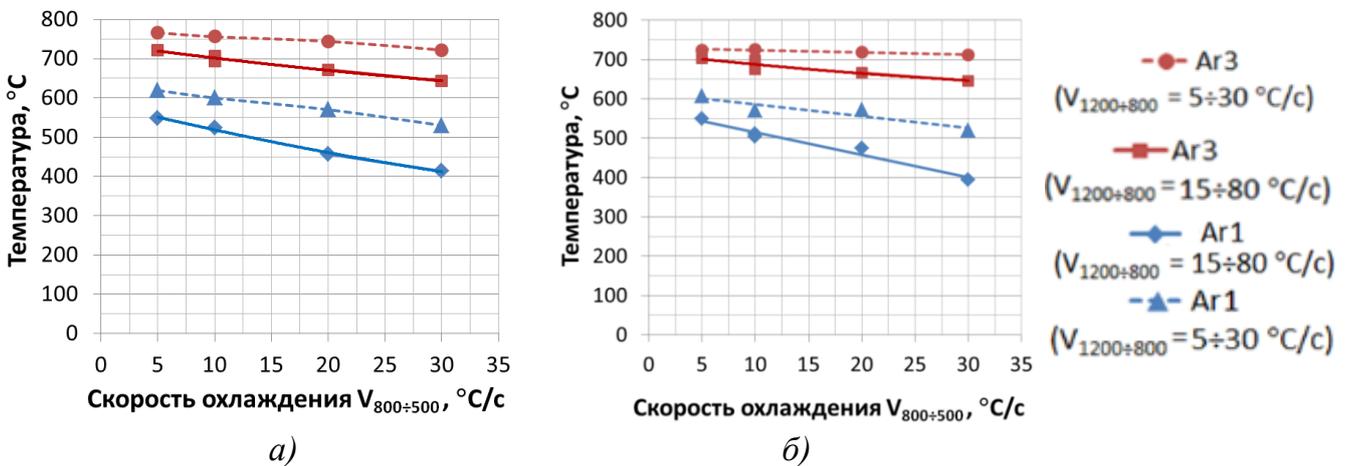


Рисунок 4 – Влияние скорости охлаждения $V_{1200-800}$ и $V_{800-500}$ на сдвиг температур полиморфного превращения для металла шва композиции С-Mn-Si (а) и С-Mn-Ni (б) при dilatометрических испытаниях

С целью установления практических путей реализации оптимальных скоростей охлаждения металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni в высокотемпературном интервале 1200-800 °C и в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °C проводились исследования влияния технологических параметров сварки на характеристики экспериментальных термических циклов.

В результате исследования установлено, что в зависимости от сочетания параметров сварочного режима, величины погонной энергии и межваликовой температуры (МВТ) скорость охлаждения в высокотемпературном интервале 1200-800 °C может в 3-4 раза превышать скорость охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °C, при этом диапазоны изменения скоростей охлаждения при автоматической дуговой сварке под флюсом составляют $V_{1200-800}$ от 20 до 111 °C/c и $V_{800-500}$ от 5 до 30 °C/c (рисунок 5).

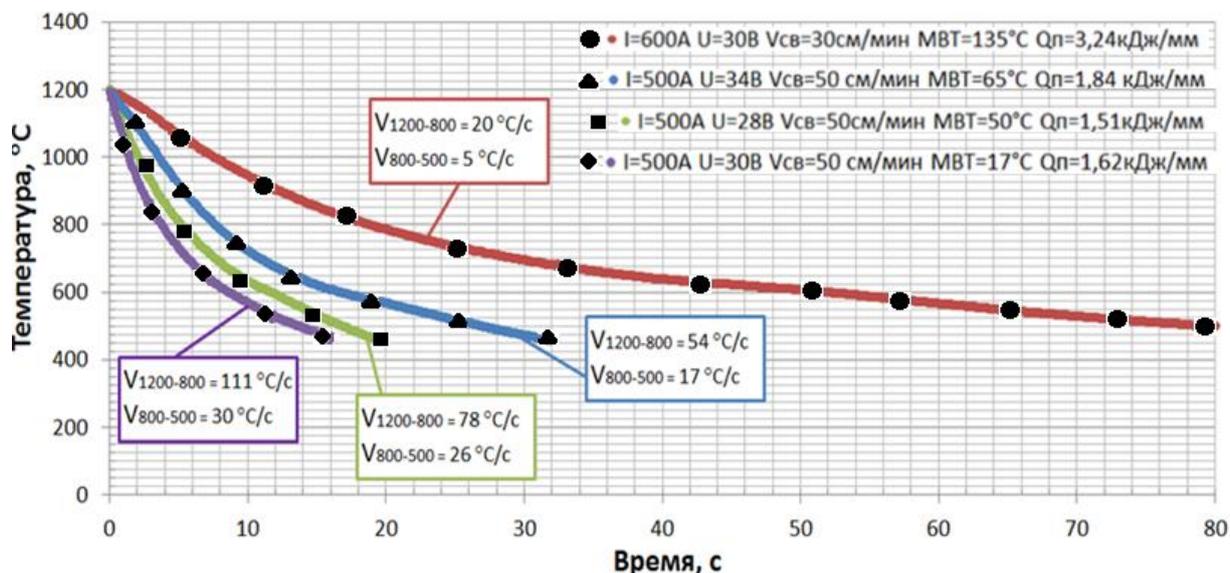


Рисунок 5 - Экспериментальные сварочные термоциклы металла шва композиции C-Mn-Si при автоматической дуговой сварке под флюсом

На основании полученных экспериментальных зависимостей (рисунок 6) установлено, что величина погонной энергии не может однозначно использоваться для достоверной оценки скорости охлаждения металла шва при формировании его структурных состояний. При одинаковой величине погонной энергии значения скорости охлаждения металла шва могут отличаться в 2-4 раза.

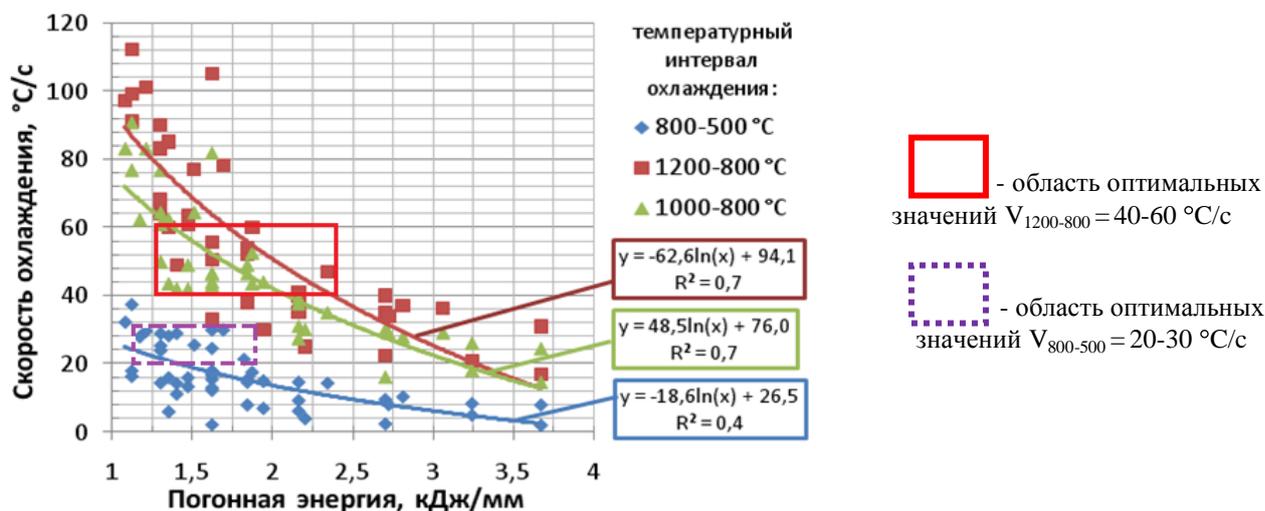
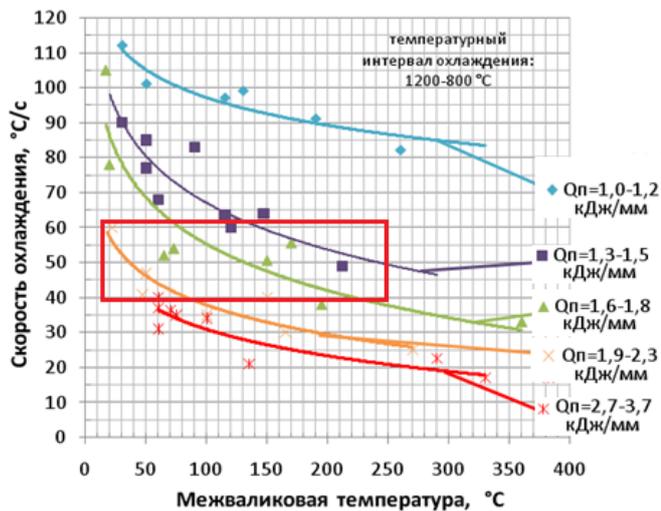


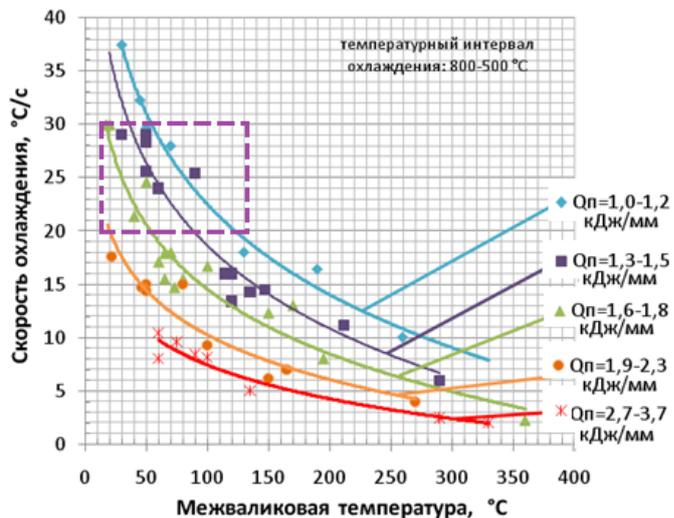
Рисунок 6 - Влияние погонной энергии при автоматической дуговой сварке под флюсом на скорость охлаждения металла шва

В связи с этим, построены экспериментальные зависимости скорости охлаждения $V_{1200-800}$ и $V_{800-500}$ от межваликовой температуры (рисунок 7) и сочетания параметров сварочного режима: скорости сварки, силы сварочного тока и напряжения на дуге (рисунок 8, 9).



- область оптимальных значений $V_{1200-800} = 40-60 \text{ } ^\circ\text{C/c}$

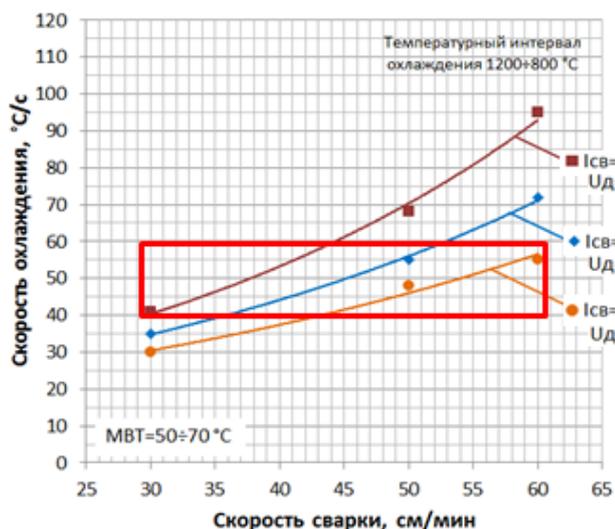
а)



- область оптимальных значений $V_{800-500} = 20-30 \text{ } ^\circ\text{C/c}$

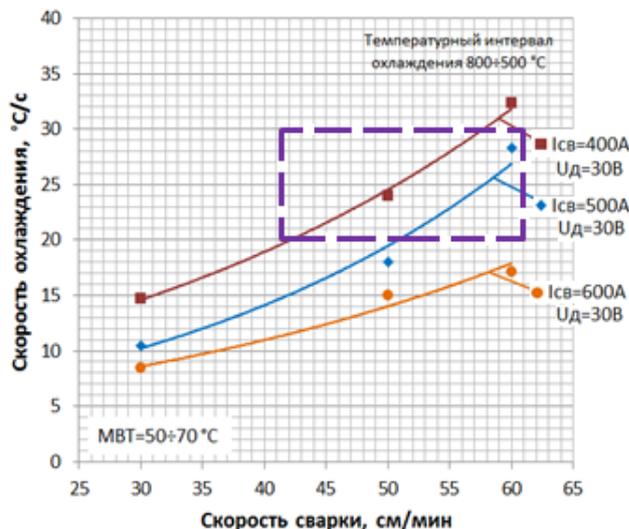
б)

Рисунок 7 – Влияние МВТ и погонной энергии при автоматической сварке под флюсом на скорость охлаждения металла шва в интервалах температур 1200-800 °C (а) и 800-500 °C (б)



- область оптимальных значений $V_{1200-800} = 40-60 \text{ } ^\circ\text{C/c}$

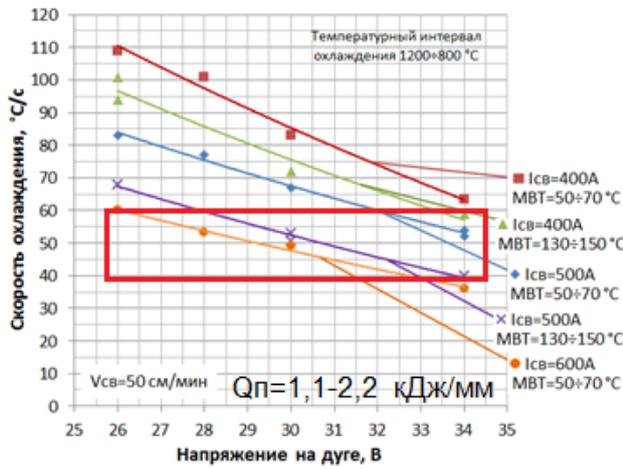
а)



- область оптимальных значений $V_{800-500} = 20-30 \text{ } ^\circ\text{C/c}$

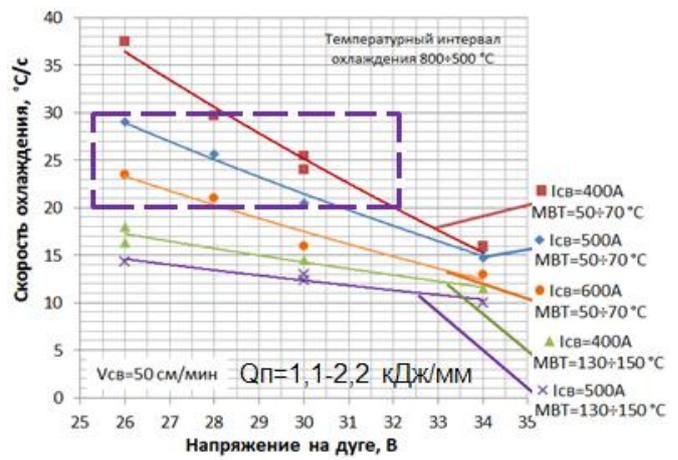
б)

Рисунок 8 - Влияние скорости сварки на скорость охлаждения металла шва в зависимости от величины сварочного тока при автоматической сварке под флюсом в интервалах температур 1200-800 °C (а) и 800-500 °C (б)



- область оптимальных значений $V_{1200-800} = 40-60 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$

а)



- область оптимальных значений $V_{800-500} = 20-30 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$

б)

Рисунок 9 - Влияние напряжения на дуге на скорость охлаждения металла шва в зависимости от силы сварочного тока и МВТ при автоматической сварке под флюсом в интервалах температур 1200-800 °С (а) и 800-500 °С (б)

Установлено, что наиболее эффективное управление скоростью охлаждения металла шва в интервале температур 1200-800 °С обеспечивается регулированием силы сварочного тока и напряжения на дуге, а в интервале температур 800-500 °С преобладающее влияние оказывают межваликовая температура и скорость сварки.

Известно, что наличие перекристаллизованной структуры в металле шва при многопроходной сварке способствует повышению его хладостойкости.

На основании результатов выполненных исследований получена взаимосвязь между параметрами режимов сварки, формой, геометрическими размерами сварочных валиков и процентным содержанием перекристаллизованной структуры в сечении металла шва (таблица 1, рисунок 10).

Таблица 1 – влияние параметров режима сварки, формы и геометрических размеров сварочных валиков на макроструктуру металла шва

п/п	Способ сварки /сварочные материалы	Параметры режима			Qп, кДж/мм	Форма и геометрические размеры валиков,			«Л»*, %	«П»**, %	
		Iсв, А	Uд, В	Vсв, см/мин.		Ширина, мм	Толщина, мм				Коэфф. формы провара
							Полная	Полная			
1	Автоматическая дуговая сварка / Св-08ГС + флюс ФЦ-16А	580	28	54	1,62	9,3-18,7	2,8-8,7	1,8-8,2	1,2-3,8	75	15
2		480	30	54	1,44	9,0-16	2,1-3,3	1,5-2,7	3,1-4,6	68	32
3		500	32	50	1,72	15,0-18,0	2,0-3,2	1,0-2,0	5,6-7,0	36	64
5	Ручная дуговая сварка / электроды 48Н-37/1	130	26	16	0,95	9,2-12,0	3,5-4,5	2,0-3,6	2,1-3,5	43	57

* «Л»- литая и ** «П» - перекристаллизованная структура в поперечном сечении металла шва

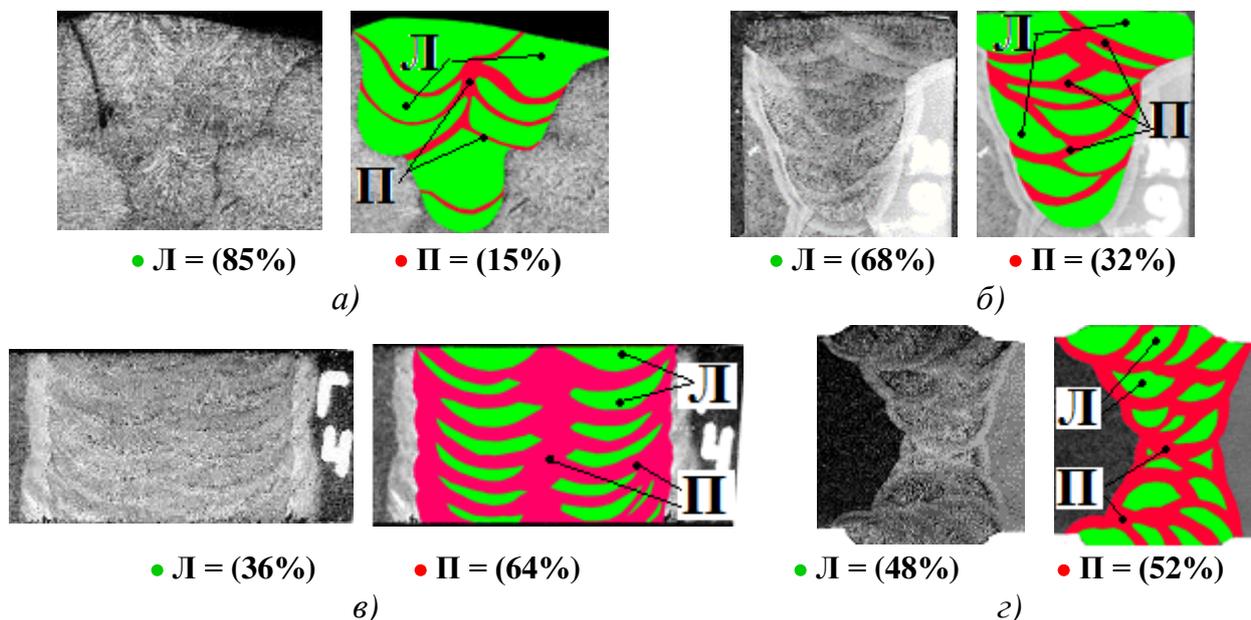


Рисунок 10 – процентное содержание литой «Л» и перекристаллизованной «П» структуры в металле шва при автоматической сварке под флюсом ФЦ-16А проволокой Св-08ГС (а,б,в) и ручной дуговой сварке покрытыми электродами 48Н-37/1 (С-Mn-Ni) (г)

В качестве критерия для оценки формы сварочных валиков в данной работе принят коэффициент формы провара, равный отношению ширины валика к глубине проплавления.

Установленные требования к форме и геометрическим размерам сварочных валиков, обеспечивающим повышенное содержание перекристаллизованной структуры в сечении металла шва сварных соединений стали 09Г2СА-А, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к геометрическим размерам и форме сварочных валиков при заполнении разделки сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А

Способ сварки	Форма и геометрические размеры заполняющих сварочных валиков			
	Ширина, мм	Толщина, мм		Кoeff. формы провара
		Полная (литая + перекристаллизованная)	Литая часть	
Автоматическая дуговая сварка под флюсом	17,0-22,0* 15,0-18,0**	$\leq 6,0$	$\leq 4,0$	4,5-7,0
Механизированная дуговая сварка в смеси защитных газов	10,0-14,0	$\leq 4,5$	$\leq 3,5$	2,0-4,5
Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	9,0-12,0	$\leq 4,5^*$ $\leq 4,0^{**}$	$\leq 3,5^*$ $\leq 3,0^{**}$	2,0-4,5
Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадкой	7,0-12,0	$\leq 4,5$	$\leq 3,5$	2,0-4,5

*- диаметр сварочной проволоки (покрытого электрода) 4 мм

** - диаметр сварочной проволоки (покрытого электрода) 3 мм

На основании исследования взаимосвязи структуры и хладостойкости металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni в состоянии до и после высокого отпуска обоснованы условия формирования хладостойкой структуры металла шва, обеспечивающей

высокую ударную вязкость ($KCV^{-50} \geq 60$ Дж/см²) при ручной, механизированной и автоматической дуговой сварке под флюсом.

Металл шва сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А, выполненный вышеуказанными способами сварки, характеризуется многообразием структурных и фазовых составляющих, разнонаправленно влияющих на его хладостойкость.

Установлено, что в результате высокого отпуска, необходимого для повышения хладостойкости металла ЗТВ и снижения остаточных сварочных напряжений металлоконструкций контейнеров для ОЯТ, происходит распад промежуточных структур феррито-бейнитного типа, что может приводить к рекристаллизации структурно свободного феррита и резкому снижению ударной вязкости металла шва композиции С-Мn-Ni и С-Мn-Si при температуре минус 50 °С (рисунок 11).

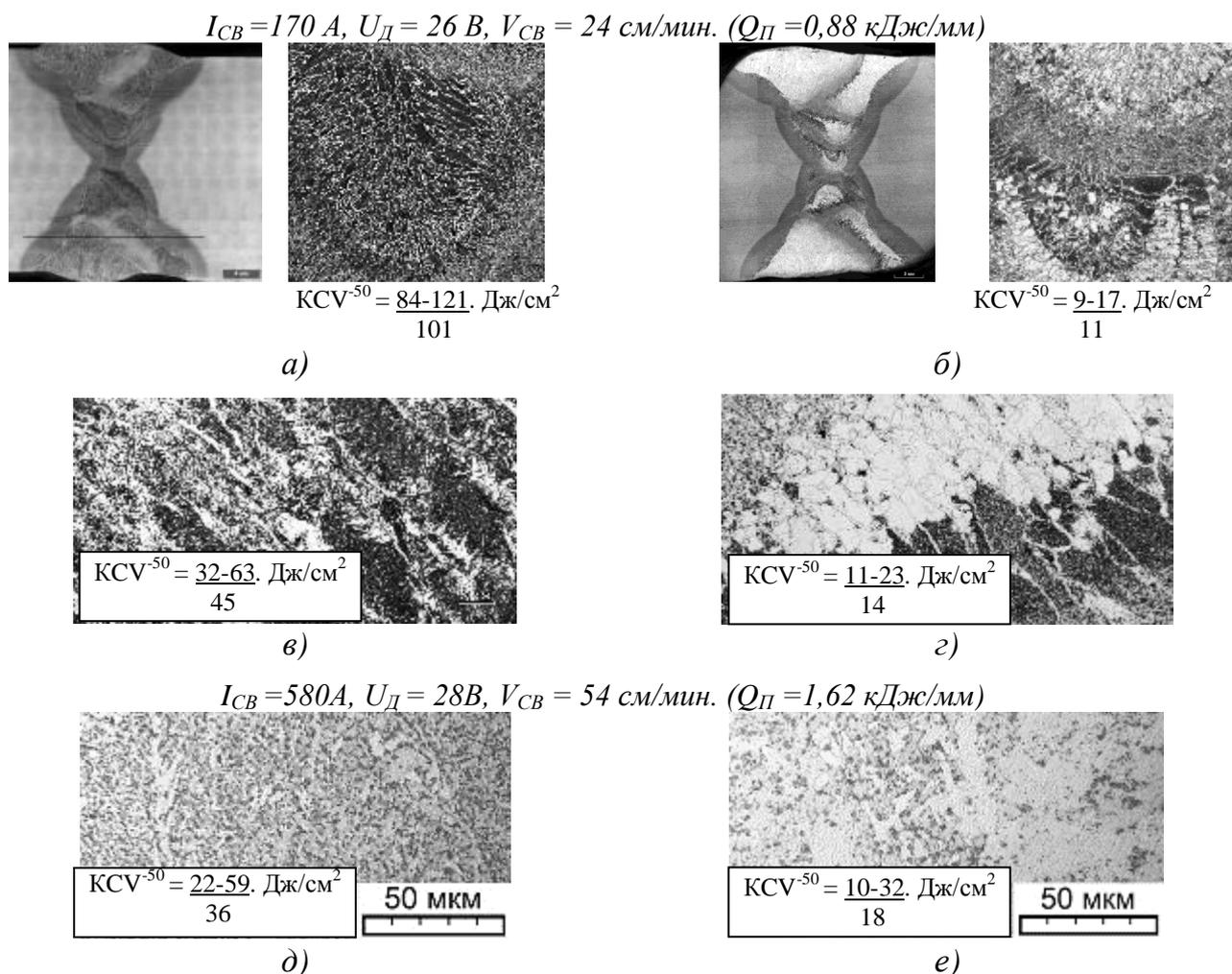
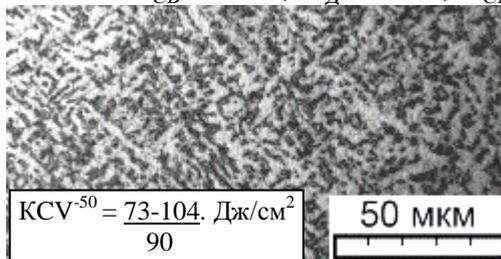


Рисунок 11 – Влияние высокого отпуска (650 °С - 8 ч.) на микроструктуру и KCV^{-50} металла шва:

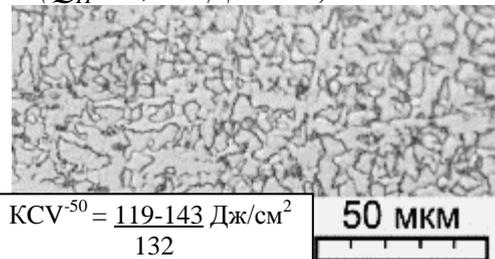
- при механизированной сварке в смеси газов проволокой Св-10ГНА в состоянии после сварки (а) и после высокого отпуска (б), проволокой Св-08Г2С в состоянии после сварки (в) и после высокого отпуска (г);
- при автоматической сварке под флюсом проволокой Св-08ГС в состоянии после сварки (д) и после высокого отпуска (е)

Формирование игольчатого феррита в литых зонах металла шва позволяет повысить термическую устойчивость и сохранить дисперсность его микроструктуры в процессе проведения высокого послесварочного отпуска. Это способствует повышению хладостойкости металла шва при температуре минус 50 °С как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска (рисунок 12).

$$I_{CB} = 500 \text{ A}, U_D = 30 \text{ B}, V_{CB} = 50 \text{ см/мин.} (Q_{II} = 1,63 \text{ кДж/мм})$$

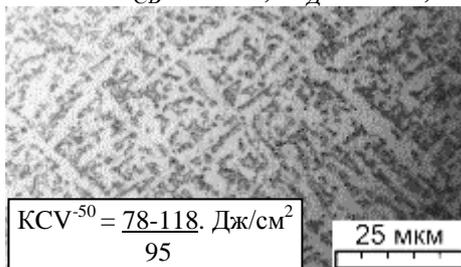


а)

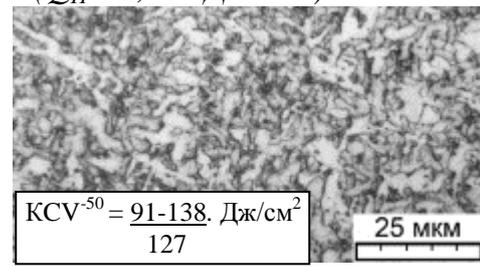


б)

$$I_{CB} = 520 \text{ A}, U_D = 29 \text{ B}, V_{CB} = 54 \text{ см/мин.} (Q_{II} = 1,51 \text{ кДж/мм})$$

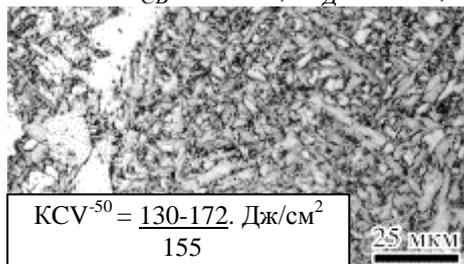


в)

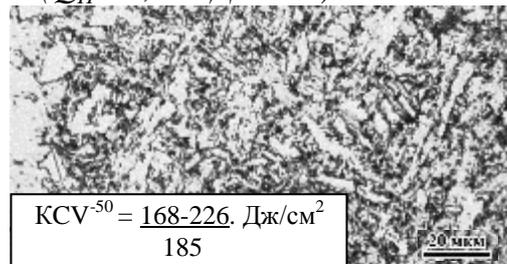


г)

$$I_{CB} = 130 \text{ A}, U_D = 12 \text{ B}, V_{CB} = 9 \text{ см/мин.} (Q_{II} = 0,73 \text{ кДж/мм})$$



д)



е)

Рисунок 12 – Влияние высокого отпуска ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержка 8 ч.) на микроструктуру и KCV^{-50} металла шва:

- при автоматической сварке под флюсом проволокой Sv-08ГC в состоянии после сварки (а) и после высокого отпуска (б), проволокой Sv-10ГНА в состоянии после сварки (в) и после высокого отпуска (г);

- при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом с присадочной проволокой Sv-08Г2С в состоянии после сварки (д) и после высокого отпуска (е)

Соотношение литой и перекристаллизованной структуры оказывает непосредственное влияние на хладостойкость многопроходного низколегированного шва. В результате исследований получены возрастающие зависимости ударной вязкости KCV^{-50}

от процентного содержания перекристаллизованной структуры в сечении металла шва, в состоянии до и после высокого отпуска (рисунок 13).

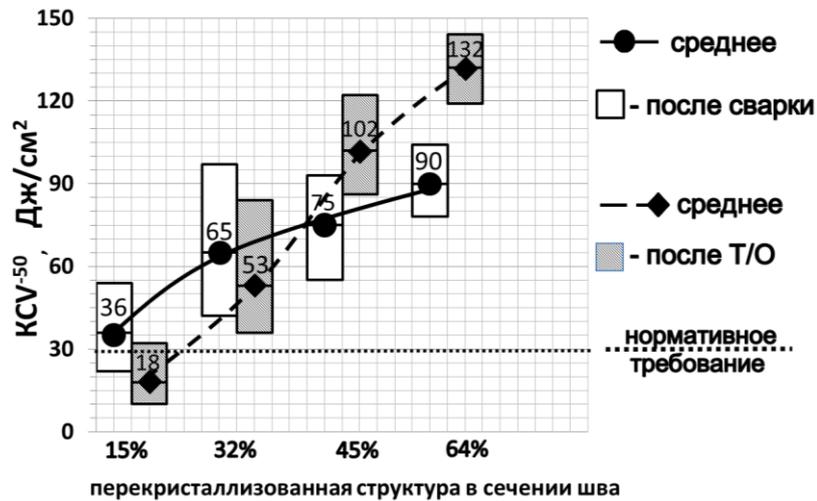


Рисунок 13 – Влияние процентного содержания перекристаллизованной структуры на хладостойкость металла шва в состоянии до и после высокого отпуска при автоматической сварке под флюсом ФЦ-16А сварочной проволокой Св-08ГС

Установлено, что наличие порядка 35 % перекристаллизованной структуры в сечении металла шва позволяет обеспечить требование $KCV^{50} \geq 29,4$ Дж/мм² в состоянии до и после высокого отпуска.

При содержании перекристаллизованной структуры в сечении металла шва менее 45 % отпуск снижает ударную вязкость. Формирование в макроструктуре шва свыше 45% однородной перекристаллизованной структуры позволяет повысить его хладостойкость после высокого отпуска (рисунок 13).

Указанный эффект связан с разнонаправленным воздействием отпуска на литую и перекристаллизованную структуру. Отпуск литой структуры приводит к частичной рекристаллизации феррита и, как следствие, к снижению ударной вязкости шва. Отпуск перекристаллизованной структуры позволяет повысить однородность дисперсной феррито-перлитной смеси, способствует сфероидизации карбидной фазы (рисунок 14) и увеличивает ударную вязкость металла шва.

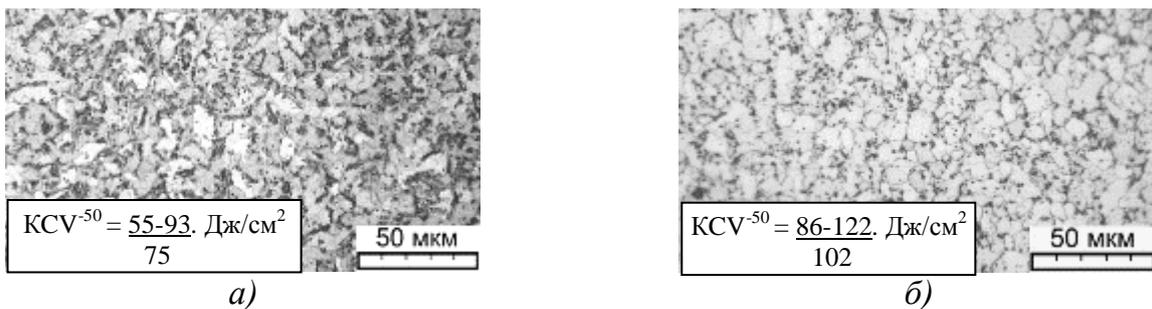


Рисунок 14 – Перекристаллизованная микроструктура металла многопроходного шва при автоматической сварке под флюсом ФЦ-16А сварочной проволокой Св-08ГС, в состоянии после сварки (а) и после высокого отпуска (б)

В результате исследования влияния межваликовой температуры на структуру и хладостойкость металла низколегированного шва в состоянии до и после высокого отпуска установлено требование по ограничению МВТ ≤ 100 °С при сварке стали 09Г2СА-А.

На основании сравнительной оценки влияния содержания вредных примесей на хладостойкость металла шва в состоянии до и после высокого отпуска установлено требование по ограничению содержания серы и фосфора до 0,012 % и 0,013 % соответственно в сварочных материалах для сварки стали 09Г2СА-А.

В результате выполненных экспериментов, определены оптимальные сочетания параметров сварочного режима и диапазоны погонной энергии при ручной, механизированной и автоматической дуговой сварке под флюсом (таблица 3), позволяющие обеспечить формирование хладостойкой при температуре минус 50 °С структуры сварных швов композиции С-Мn-Si и С-Мn-Ni (рисунок 15).

Таблица 3 – Требования к параметрам режимов сварки стали марки 09Г2СА-А

Способ сварки	Сварочные материалы	Ø, мм	Параметры режима сварки			Q _п , кДж/мм
			I _{св} , А	U _д , В	V _{св} , мм/с (см/мин.)	
Автоматическая дуговая сварка под флюсом (ФЦ-16А)	Св-08ГС	3	380-460	29-32	8,0-9,0 (48-54)	1,30-1,65
	Св-08Г2С, Св-10ГНА	4	450-520	30-33	8,0-9,0 (48-54)	1,50-1,80
Механизированная дуговая сварка в смеси газов	Св-08Г2С (80% Ar+20% CO ₂)	1,2	180-220	28-32	3,5-6,0 (21-36)	0,90-1,3
Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	48Н-37, УОНИИ-13/55	3	110-130	26	2,0-3,0 (12-18)	0,85-1,2
	48Н-37, УОНИИ-13/55	4	120-140	26	2,0-3,5 (12-21)	0,95-1,3
Ручная аргонодуговая сварка с присадкой	Св-08Г2С (100% Ar)	3	120-160	10-12	1,0-2,0 (6-12)	0,65-0,90

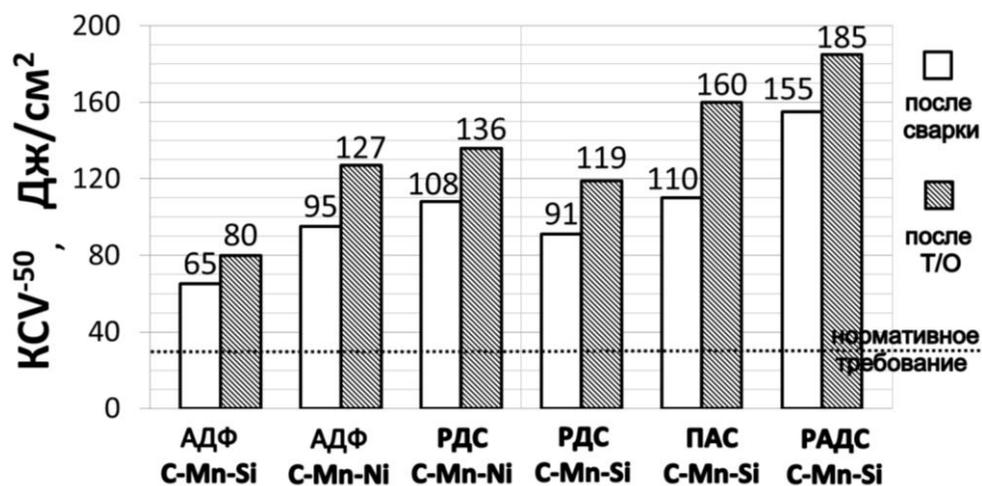


Рисунок 15 – ударная вязкость металла шва химической композиции С-Мn-Si и С-Мn-Ni, в состоянии до и после высокого отпуска при автоматической дуговой сварке под флюсом (АДФ), ручной дуговой сварке покрытыми электродами (РДС), полуавтоматической (механизированной) сварке в смеси защитных газов (ПАС) и ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом с присадкой (РАДС)

Четвёртая глава посвящена изучению основных факторов и экспериментальному подтверждению условий формирования хладостойкой структуры металла ЗТВ, обеспечивающих ударную вязкость сварных соединений из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А в состоянии до и после высокого отпуска $KCV^{50} \geq 29,4$ Дж/см².

В результате термокинетических исследований (рисунок 16), имитирующих процессы сварки, установлено, что сталь марки 09Г2СА-А обладает большим запасом технологичности при использовании сварочных процессов с пониженным тепловложением. Увеличение скорости охлаждения при сварке до 100 °С/с не приводит к образованию закалочных структур ($HV_{10} \geq 350$) мартенситного типа (рисунок 17 а). Область бейнитного превращения в стали 09Г2СА-А образуется при $V_{800-500} \geq 10$ °С /с. Понижение скорости охлаждения приводит к смене механизма распада аустенита со смешанного на диффузионный и сопровождается ростом ферритного зерна в феррито-перлитной структуре (рисунок 17 б).

Диапазон скоростей охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита $10 \leq V_{800-500} \leq 30$ °С/с является оптимальным для различных участков ЗТВ сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А, нагреваемых выше температур полиморфного превращения при сварке.

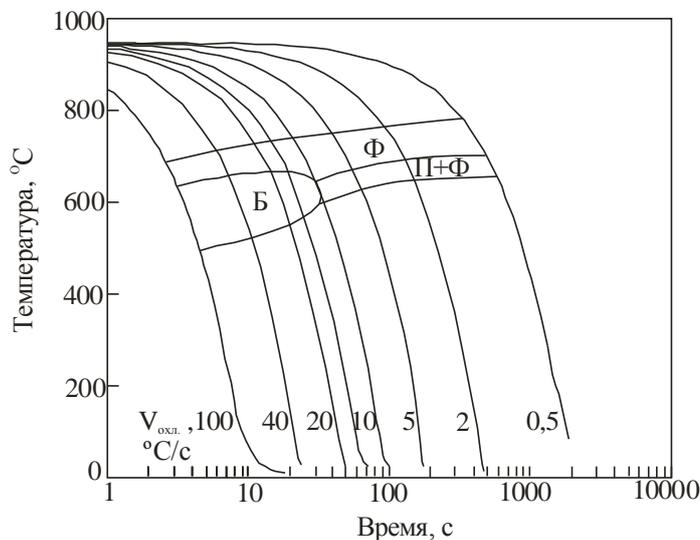
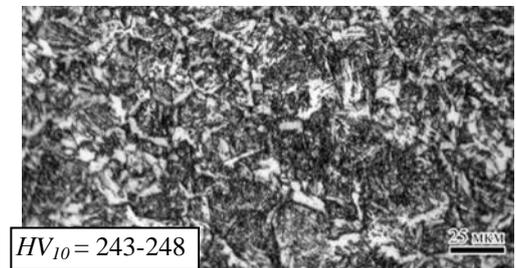
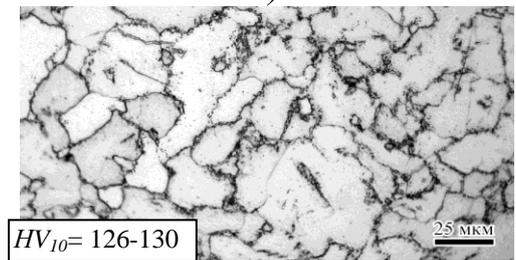


Рисунок 16 – Термокинетическая диаграмма анизотермического распада переохлажденного аустенита стали марки 09Г2СА-А



а)



б)

Рисунок 17 - Микроструктура и твердость стали марки 09Г2СА-А при: $V_{800-500} = 100$ °С/с (а) и $V_{800-500} = 5$ °С /с (б)

В результате исследования влияния погонной энергии и технологических параметров сварки на характеристики термических циклов различных участков ЗТВ стали марки 09Г2СА-А установлены практические пути минимизации негативного воздействия термодиформационного цикла сварки на основной металл.

Ограничение величины погонной энергии при автоматической дуговой сварке под флюсом до 1,62 кДж/мм и оптимизация сочетания параметров сварочного режима

эффективно обеспечивает охлаждение металла ЗТВ в рациональном диапазоне скоростей охлаждения: $10^{\circ}\text{C}/\text{c} \leq V_{800-500} \leq 30^{\circ}\text{C}/\text{c}$.

Снижение погонной энергии с 2,7 кДж/мм до 1,62 кДж/мм путем увеличения скорости автоматической сварки под флюсом с 30 до 50 см/мин, а также ограничение $\text{МВТ} \leq 100-130^{\circ}\text{C}$ позволяют сократить длительность пребывания металла ЗТВ на участке перегрева в интервале температур интенсивного роста аустенитных зерен (1200-1050 $^{\circ}\text{C}$) с 9 до менее чем 1 секунды (рисунок 18). При этом длительность пребывания металла ЗТВ в интервалах температур неполной перекристаллизации $\text{Ac}_3\text{-Ac}_1$ (рисунок 19), высокого отпуска (650-500 $^{\circ}\text{C}$) и термомодеформационного старения (350-200 $^{\circ}\text{C}$) может уменьшаться в 2-4 раза.

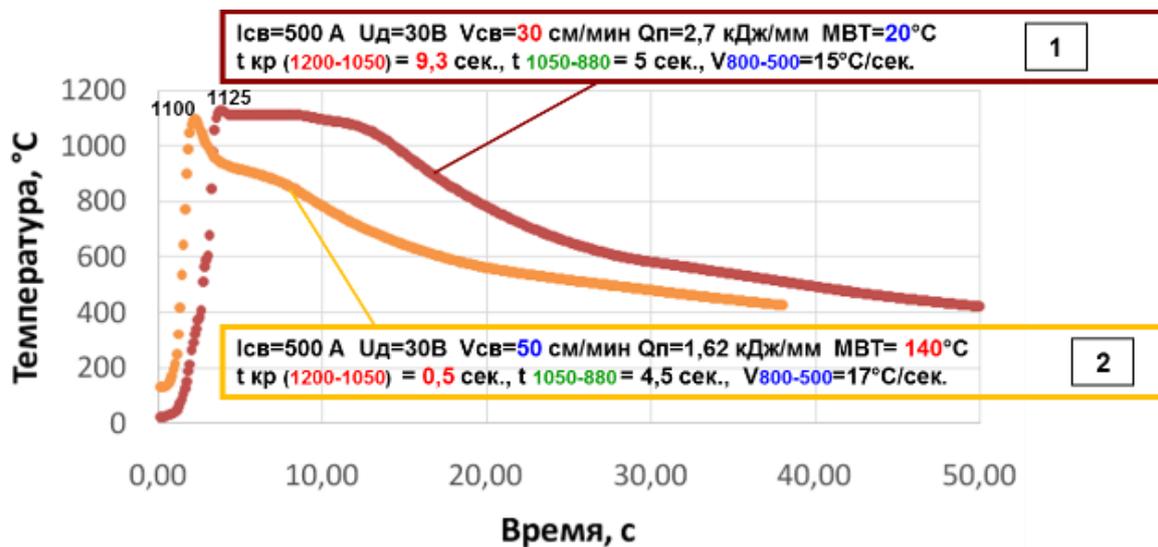


Рисунок 18 – Влияние погонной энергии, скорости сварочного процесса и МВТ на характеристики термических циклов сварки на участке перегрева (1200-1050 $^{\circ}\text{C}$) в ЗТВ сварных соединений стали 09Г2СА-А при автоматической сварке под флюсом ФЦ-16А проволокой Св-08Г2С

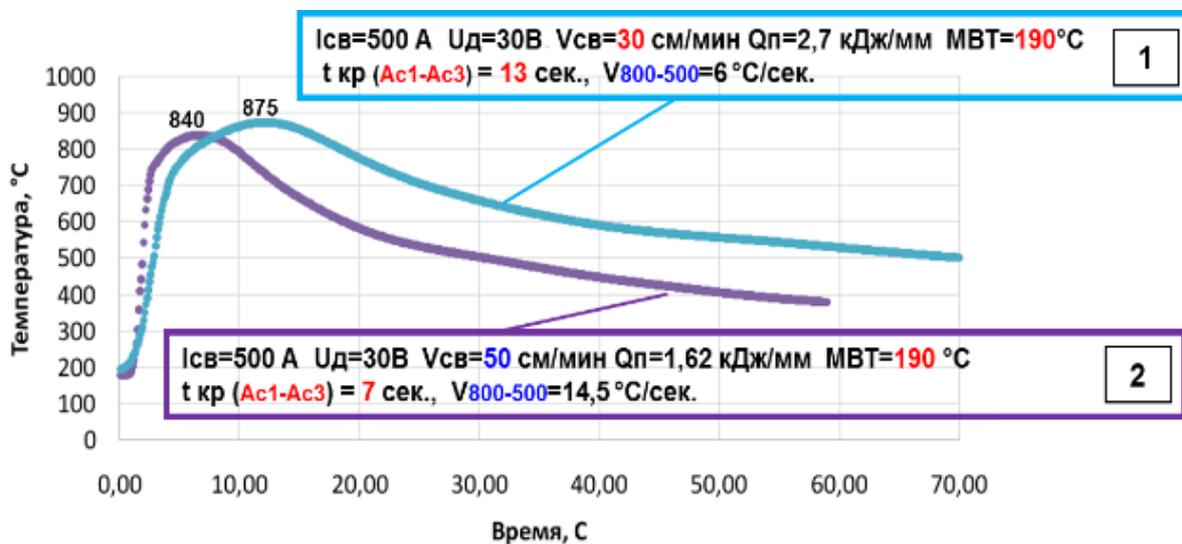
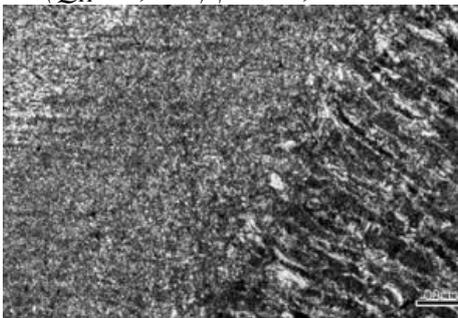


Рисунок 19 – Влияние погонной энергии и скорости сварочного процесса на характеристики термических циклов сварки на участке неполной перекристаллизации (880 – 730 $^{\circ}\text{C}$ ($\text{Ac}_3\text{-Ac}_1$)) в ЗТВ сварных соединений стали 09Г2СА-А при автоматической сварке под флюсом ФЦ-16А сварочной проволокой Св-08Г2С

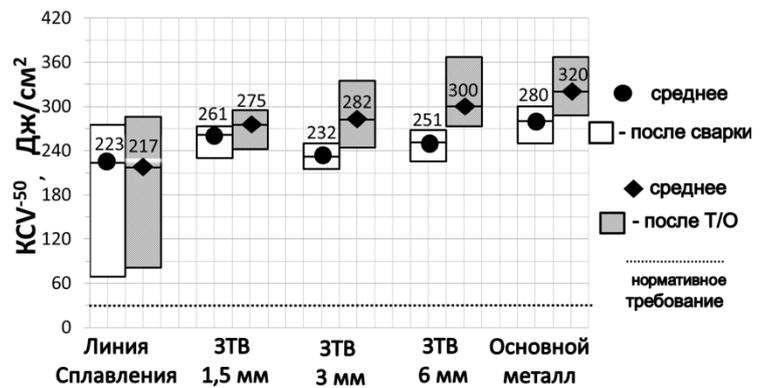
В результате исследования взаимосвязи структуры и ударной вязкости KCV⁻⁵⁰ металла сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А установлено влияние технологии сварки и структуры основного металла на хладостойкость металла различных участков зоны термического влияния.

Оптимальные сочетания технологических параметров сварки позволяют предотвратить формирование крупнозернистой структуры на участке перегрева ЗТВ кремнемарганцовистой стали и обеспечить хладостойкость металла сварного соединения при температуре минус 50 °С (рисунок 20).

$I_{CB} = 430 \text{ A}$, $U_D = 32 \text{ B}$, $V_{CB} = 50 \text{ см/мин}$.
($Q_{II} = 1,49 \text{ кДж/мм}$, $МВТ = 100 \text{ °С}$)



а)

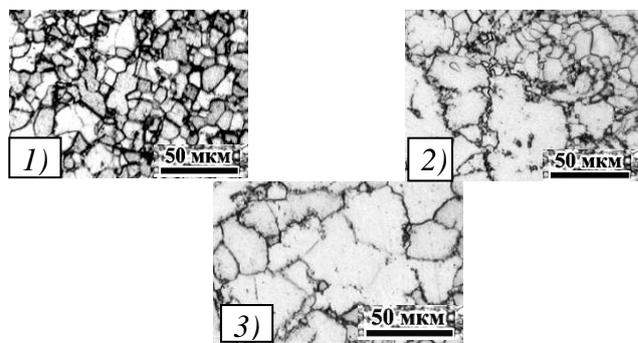
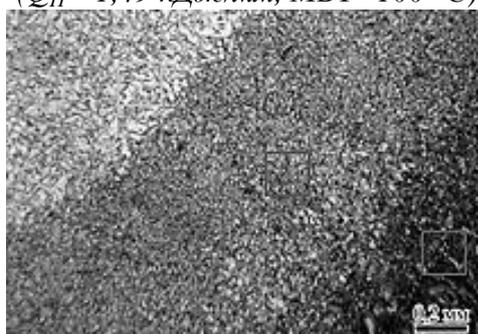


б)

Рисунок 20 – Структура (а) и хладостойкость (б) ЗТВ сварного соединения из листового проката стали марки 09Г2СА-А, выполненного автоматической сваркой под флюсом ФЦ-16А сварочной проволокой Св-08ГС при оптимизированном сочетании параметров сварочного режима

Хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений из поковок стали 09Г2СА-А зависит от структурной неоднородности и размера зерна основного металла. При наличии 3-5 балла зерна (рисунок 21) в основном металле поковки могут быть получены значения ударной вязкости менее требуемых (29,4 Дж/см²) на всех участках ЗТВ (рисунок 22).

$I_{CB} = 430 \text{ A}$, $U_D = 32 \text{ B}$, $V_{CB} = 50 \text{ см/мин}$.
($Q_{II} = 1,49 \text{ кДж/мм}$, $МВТ = 100 \text{ °С}$)



- 1- участок полной перекристаллизации
- 2 - участок частичной перекристаллизации
- 3- основной металл

Рисунок 21 – Структура ЗТВ сварного соединения из неоднородной крупнозернистой (3-6 балл) поковки стали 09Г2СА-А, выполненного автоматической сваркой под флюсом ФЦ-16А проволокой Св-08ГС

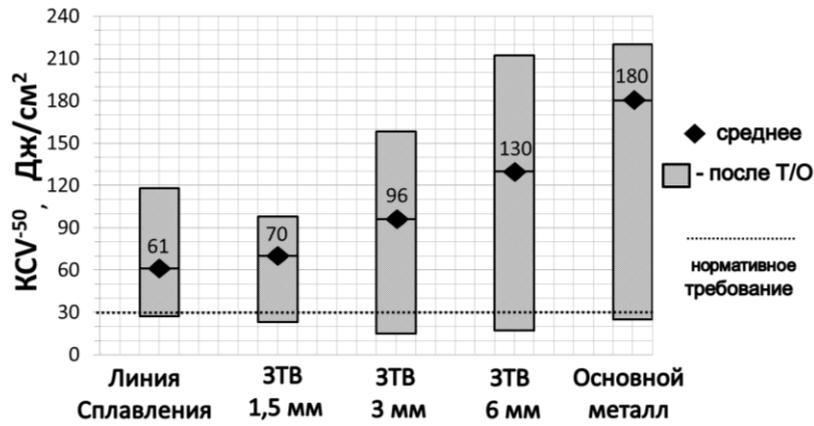
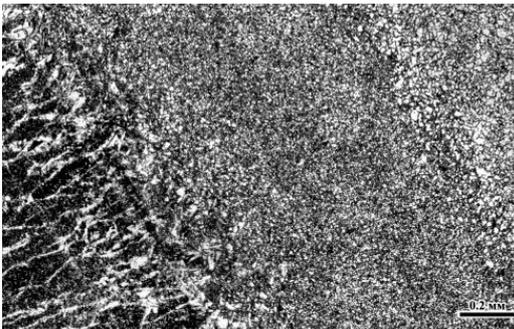


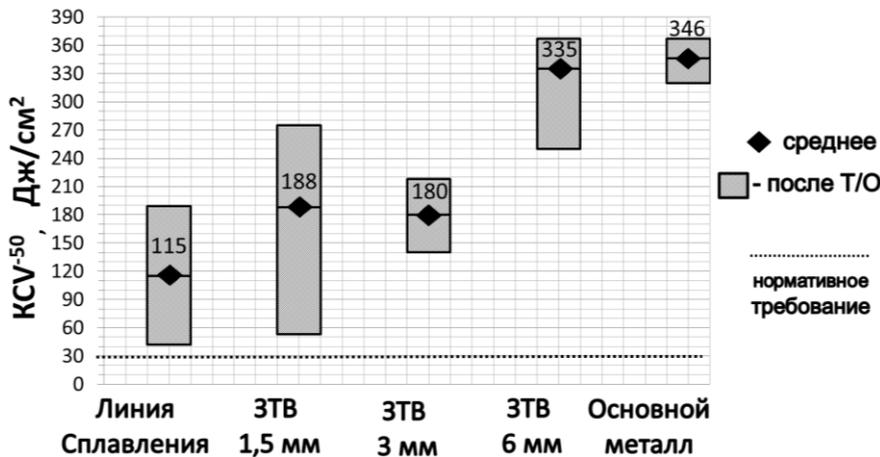
Рисунок 22 – Хладостойкость ЗТВ сварного соединения из неоднородной крупнозернистой (3-6 балл) поковки стали 09Г2СА-А, выполненного автоматической сваркой под флюсом ФЦ-16А проволокой Св-08ГС

Для обеспечения требуемой ударной вязкости в металле ЗТВ, наряду с использованием оптимальной технологии сварки, необходимо предъявлять требования к основному металлу поковок по обеспечению однородной структуры с 7-8 баллом зерна (рисунок 23).

$I_{CB} = 430 \text{ A}$, $U_D = 32 \text{ B}$, $V_{CB} = 50 \text{ см/мин.}$
 $(Q_{II} = 1,49 \text{ кДж/мм, MBT} = 100 \text{ °C})$



а)



1- участок полной перекристаллизации

2- участок частичной перекристаллизации

3- основной металл

б)

Рисунок 23 – Структура (а) и хладостойкость (б) ЗТВ сварного соединения из модифицированной V и Nb мелкозернистой (7-8 балл) поковки стали 09Г2СА-А, выполненного автоматической сваркой под флюсом ФЦ-16А проволокой Св-08ГС

В результате исследования взаимосвязи между хладостойкостью при минус 50 °С основного металла и металла различных участков ЗТВ, установлена и обоснована необходимость повышения требований к минимальным сдаточным значениям ударной вязкости KCV^{50} с 29,4 до 98 Дж/см² для поковок из стали марки 09Г2СА-А.

На основании полученных экспериментальных зависимостей и результатов исследований научно обоснованы требования и экспериментально подтверждены условия формирования хладостойкой при температурах до минус 50 °С структуры металла сварных соединений из кремнемарганцовистой стали в состоянии до и после проведения высокого отпуска.

Пятая глава посвящена разработке, аттестации и практическому использованию технологии сварки стали марки 09Г2СА-А при изготовлении контейнеров для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Требования к выбору режимов сварки, раскладке валиков, их форме и геометрическим размерам, межваликовой температуре и сварочным материалам при разработке технологии сварки установлены в соответствии с полученными результатами при изучении основных факторов и закономерностей формирования хладостойкой структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений кремнемарганцовистой стали.

Аттестация разработанной технологии ручной, механизированной и автоматической дуговой сварки под флюсом проведена в соответствии с требованиями ПНАЭГ 7-010-89 «Сварные соединения и наплавки. Правила контроля» и РД5.УЕИА.3153/3232-99 «Сварка, наплавка и термическая обработка основного металла и сварных соединений деталей и узлов металлобетонных контейнеров транспортно-упаковочного комплекта».

Разработанная технология ручной, механизированной (полуавтоматической) и автоматической дуговой сварки под флюсом низколегированной стали марки 09Г2СА-А внедрена на различных предприятиях-изготовителях ТУК МБК (ТУК-120, ТУК-108/1, ТУК-109, ТУК-123 в ОАО «ПО «Севмаш», ТУК-109, ТУК-123, УКХ-121 в ЗАО «Энерготекс», ТУК-109 в ОАО «Ижорские заводы», ТУК-104 в ОАО «Савеловский машиностроительный завод» и ОАО «Уралхиммаш»).

Свидетельством успешного освоения технологии сварки служат полученные на различных предприятиях результаты испытаний KCV^{50} производственных контрольных сварных соединений (ПКСС), результаты производственной аттестации технологии сварки, а также изготовление и эксплуатация не менее 150 металлобетонных контейнеров для транспортировки и длительного хранения ОЯТ.

Основные выводы и результаты работы

1. На основании результатов выполненных исследований и полученных закономерностей установлены условия формирования хладостойкой до минус 50°С структуры металла шва и ЗТВ сварных соединений из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А.

2. Установлено, что в результате высокого отпуска, необходимого для повышения хладостойкости металла ЗТВ и снижения остаточных сварочных напряжений ме-

таллоконструкций контейнеров для ОЯТ, происходит распад промежуточных структур феррито-бейнитного типа, что может приводить к рекристаллизации структурно свободного феррита и резкому снижению ударной вязкости металла шва композиции С-Mn-Ni и С-Mn-Si при температуре минус 50 °С.

3. Установлено, что формирование игольчатого феррита в литых зонах металла шва позволяет повысить термическую устойчивость и сохранить дисперсность его микроструктуры в процессе проведения высокого послесварочного отпуска. Это способствует повышению хладостойкости металла шва при температуре минус 50 °С как в исходном состоянии после сварки, так и после проведения высокого отпуска.

4. Установлено, что формирование структурных состояний металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni, помимо скорости охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С, также зависит от скорости охлаждения в высокотемпературном интервале 1200-800 °С.

Условия формирования хладостойкой структуры игольчатого феррита, характеризующегося высокой устойчивостью к распаду при отпуске, включают охлаждение металла шва со скоростями $V_{1200-800} = 40-60$ °С/с и $V_{800-500} = 20-30$ °С/с.

Увеличение скорости охлаждения металла шва $V_{1200-800}$ до 80-120 °С/с, при скорости $V_{800-500} = 30-40$ °С/с, способствует формированию неустойчивых к высокому отпуску мелкодисперсных промежуточных структур бейнитного типа.

5. Установлены практические пути реализации оптимальных скоростей охлаждения металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni в высокотемпературном интервале 1200-800 °С и в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С.

На основании полученных экспериментальных зависимостей показано, что наиболее эффективное управление скоростью охлаждения металла шва в высокотемпературном интервале 1200-800 °С обеспечивается регулированием силы сварочного тока и напряжения на дуге, а в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 °С преобладающее влияние оказывают межваликовая температура и скорость сварки.

На основании исследования влияния межваликовой температуры (МВТ) на структуру и хладостойкость металла низколегированного шва в состоянии до и после высокого отпуска установлено требование по ограничению $МВТ \leq 100$ °С при сварке стали марки 09Г2СА-А.

6. Установлены оптимальные сочетания параметров сварочного режима и диапазоны погонной энергии при ручной, механизированной и автоматической дуговой сварке под флюсом, обеспечивающие формирование хладостойкой структуры металла шва композиции С-Mn-Si и С-Mn-Ni.

7. Показано, что соотношение литой и перекристаллизованной структуры оказывает непосредственное влияние на хладостойкость многопроходного низколегированного шва. Получены возрастающие зависимости ударной вязкости KCV^{50} от процентного содержания перекристаллизованной структуры в сечении металла шва, в состоянии до и после высокого отпуска.

Установлено, что при содержании перекристаллизованной структуры в сечении металла шва менее 45 % высокий отпуск снижает ударную вязкость. Формирование в макроструктуре шва свыше 45% однородной перекристаллизованной структуры позволяет повысить его хладостойкость после высокого отпуска.

Указанный эффект связан с разнонаправленным воздействием отпуска на литую и перекристаллизованную структуру. Отпуск литой структуры приводит к частичной рекристаллизации феррита и, как следствие, к снижению ударной вязкости шва. Отпуск перекристаллизованной структуры позволяет повысить однородность дисперсной феррито-перлитной смеси, способствует сфероидизации карбидной фазы и увеличивает ударную вязкость металла шва.

8. Установлены условия, обеспечивающие повышенное процентное содержание указанной структуры при ручной, механизированной и автоматической дуговой сварке под флюсом.

Показана взаимосвязь между формой, геометрическими размерами сварочных валиков и процентным содержанием перекристаллизованной структуры в сечении металла шва.

Построены экспериментальные зависимости влияния параметров сварочного режима на форму и геометрические размеры сварочных валиков.

Установлены требования к форме и геометрическим размерам сварочных валиков, разработана последовательность раскладки валиков при заполнении разделки сварных соединений, а также определены сочетания параметров сварочного режима, обеспечивающие повышенное содержание перекристаллизованной структуры.

9. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность использования экономнолегированных безникелевых сварочных материалов композиции С-Mn-Si для сварки кремнемарганцовистой стали, с обеспечением хладостойкости металла шва при температуре минус 50°С в состоянии до и после проведения высокого отпуска.

10. На основании сравнительной оценки влияния содержания вредных примесей на хладостойкость металла шва в состоянии до и после высокого отпуска установлено требование по ограничению содержания серы и фосфора до 0,012 % и 0,013 % соответственно в сварочных материалах, применяемых для сварки стали марки 09Г2СА-А.

Выполнена модернизация сварочных материалов кремнемарганцовистой композиции для сварки стали марки 09Г2СА-А, в результате которой разработаны ТУ 5.965-11840-2004 «Проволока стальная сварочная марок Св-08ГСА-А и Св-08Г2СА-А» и ТУ 5.965-11839-2004 «Электроды марок УОНИИ-13/55АА и УОНИИ-13/45АА».

11. Установлено, что при сварке стали марки 09Г2СА-А диапазон скоростей охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита: $10 \leq V_{800-500} \leq 30$ °С/с является оптимальным для металла различных участков в ЗТВ, нагреваемых выше температур полиморфного превращения.

12. Установлены практические пути минимизации негативного воздействия термомодеформационного цикла сварки на основной металл на основе снижения величины погонной энергии до 1,62 кДж/мм и оптимизации сочетания параметров сварочного режима.

13. На основании результатов исследования взаимосвязи структуры и ударной вязкости KCV^{-50} металла сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А показано влияние технологии сварки и структуры основного металла на хладостойкость металла различных участков зоны термического влияния.

14. Установленные оптимальные сочетания технологических параметров сварки стали марки 09Г2СА-А позволяют предотвратить формирование крупнозернистой структуры на участке перегрева зоны термического влияния кремнемарганцовистой стали и обеспечить хладостойкость металла сварного соединения при температуре минус 50 °С.

15. Установлено, что хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений из поковок стали марки 09Г2СА-А зависит от структурной неоднородности и размера зерна основного металла. Для обеспечения требуемой ударной вязкости в металле ЗТВ, наряду с использованием оптимальной технологии сварки, необходимо предъявлять требования к основному металлу поковок по обеспечению однородной структуры с 7-8 баллом зерна, а минимальные сдаточные значения ударной вязкости поковок стали марки 09Г2СА-А должны составлять не менее $KCV^{-50} \geq 98$ Дж/см².

16. Разработана и освоена в отечественной промышленности технология сварки металлоконструкций из кремнемарганцовистой стали марки 09Г2СА-А контейнеров для транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива, обеспечивающая высокую хладостойкость металла шва и зоны термического влияния сварных соединений (ТУК-120, ТУК-108/1, ТУК-109, ТУК-123 в ОАО «ПО «Севмаш», ТУК-109, ТУК-123, УКХ-121 в ЗАО «Энерготекс», ТУК-109 в ОАО «Ижорские заводы», ТУК-104 в ОАО «Савеловский машиностроительный завод» и ОАО «Уралхиммаш».

17. Использование разработанной технологии сварки и сварочных материалов кремнемарганцовистой композиции для сварки металлоконструкций ТУК МБК из стали марки 09Г2СА-А ручным, механизированным и автоматическим способом сварки одобрено Федеральной службой по атомному надзору РФ.

18. Результаты работы отражены в части требований РД5.УЕИА.3153/3232-99 «Руководящий документ. Сварка, наплавка и термическая обработка основного металла и сварных соединений деталей и узлов металлобетонных контейнеров транспортно-упаковочного комплекта» (Извещение РД-6-90.7728 об изменении №2). Изменение согласовано в Федеральной службе по экологическому технологическому и атомному надзору (в настоящее время «Ростехнадзор» РФ).

Основные результаты работы опубликованы в следующих трудах:

1. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Сварочные материалы и технология сварки металлоконструкций из кремнемарганцовистой стали контейнеров для транспортировки и длительного хранения отработавшего ядерного топлива // **Вопросы материаловедения**, 2010, №4(64), с. 90-104.

2. Скутин В.С., Карасев М.В., Гребенчук В.Г., Розерт Р. Изменение структуры и ударной вязкости металла шва сварных соединений низколегированных сталей типа 09Г2С, 15ХСНД, 09Г2ФБЮ после термической обработки 610-650 °С // **Сварка и диагностика**, 2013, №2, с.20-27.

3. Скутин В.С., Оленин М.И., Горынин В.И., Быковский Н.Г., Маркова Ю.М. Оптимизация режима термической обработки сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А // **Вопросы материаловедения**, 2011, №2(66), с.18-29.

4. **Патент №2425737** Способ сварки хладостойких низколегированных сталей // Скутин В. С., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Щербинина Н. Б., Воробьева Н. Ю. Бюллетень изобретений №22 от 10.08.2011 .

5. **Патент №2436663**. Сварочный материал для сварки хладостойких низколегированных сталей // Скутин В. С., Карзов Г. П., Галяткин С. Н., Щербинина Н. Б., Воробьева Н. Ю., Бюллетень изобретений №35 от 20.12.11.

6. **Патент №2299252**. Способ термической обработки сварных соединений из низкоуглеродистых феррито-перлитных сталей // Скутин В. С., Рыбин В. В., Филимонов Г. Н., Оленин М. И., Быковский Н. Г., Щербинина Н.Б., Галяткин С. Н., Воробьева Н. Ю., Подкорытов Р. А.и др. Бюллетень изобретений №14 от 20.05.2007.

7. Skutin V., Galyatkin S., Sherbinina N., Vorobiova N. Welding Materials and Welding Practice of Steelworks Based on Silicon-Manganese Steel of Containers for Transportation and Long Term Storage of Spent Nuclear Fuel.// ISSN 20751133, Inorganic Materials: Applied Research, 2011, Vol. 2, No. 6, pp. 596–606.

8. Скутин В.С., Горынин И.В., Карзов Г.П., Бережко Б.И., Быковский Н.Г., Оленин М.И., Калиничева Н.В. и др. Новая сталь для контейнеров с ОЯТ». // **Безопасность окружающей среды**, 2008, №4, с.52-55.

9. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Комплексный подход при обеспечении хладостойкости сварных соединений оборудования АЭС из низколегированных сталей // **Сборник тезисов докладов тринадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»**, Санкт-Петербург, 2014, с.63.

10. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Обеспечение хладостойкости сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А при изготовлении контейнеров для ОЯТ // **Сборник тезисов докладов двенадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»**, Санкт-Петербург, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2012, с.82.

11. Скутин В.С., Быковский Н.Г., Бережко Б.И., Васильева Н.А. Влияние модифицированием ванадием и ниобием на свойства основного металла и зоны термического влияния сварных соединений стали марки 09Г2СА-А // **Сборник тезисов докладов двенадцатой международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»**, Санкт-Петербург, 2012, с.60.

12. Скутин В.С., Оленин М.И., Быковский Н.Г., Горынин В.И. Лебедева Н.В. Повышение хладостойкости зоны термического влияния сварных соединений из низко-

углеродистых кремнемарганцовистых сталей // Труды 11-й научной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2010, с.97-109.

13. Скутин В.С., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю., Галяткин С.Н., Быковский Н.Г., Оленин М.И. Исследования сопротивления хрупкому разрушению металла сварных соединений стали марки 09Г2СА-А // Труды научно-практической конференции «Прочность и долговечность сварных конструкций тепловой и атомной энергетики», Санкт-Петербург, 2007, с.92.

14. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Исследование хладостойкости металла сварных соединений из стали марки 09Г2СА-А. // Сборник тезисов докладов VI конференции молодых ученых и специалистов материаловедов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 2007, с.4.

15. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Исследование хладостойкости сварных швов, выполненных экономнолегированными сварочными материалами при сварке металлобетонных контейнеров для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива. // Сборник тезисов докладов V конференции молодых ученых и специалистов материаловедов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 2005, с.16.

16. Скутин В.С., Быковский Н.Г., Воробьева Н.Ю., Галяткин С.Н., Калиничева Н.В., Карзов Г.П., Мартынихина Н.И., Оленин М.И., Романов О.Н., и др. Материаловедческие аспекты промышленного освоения производства контейнеров для хранения и транспортировки ОЯТ АЭУ // Сборник тезисов докладов межотраслевой научно-практической конференции «Корабельная ядерная энергетик», Нижний-Новгород, 2004, с.91-92.

17. Скутин В.С., Галяткин С.Н., Щербинина Н.Б., Воробьева Н.Ю. Совершенствование сварочных материалов применяемых при изготовлении металлобетонных контейнеров для хранения и транспортировки отработанного ядерного топлива // Сборник тезисов докладов IV конференции молодых ученых и специалистов материаловедов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 2004, с.14.

Подписано в печать _____ г.

Печать офсетная

Тираж 90 экз. Заказ № _____

Формат 60x48 1/16

Усл.п.л. 1,4 Уч.-изд.л. 1.05.

Отпечатано в типографии ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»

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

Лицензия на издательскую деятельность

Лр №020644 от 13 октября 1997