

На правах рукописи

Хайдарова Анна Александровна

**ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ
ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.03.06 –
Технологии и машины сварочного производства

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гнюсов Сергей Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Радченко Михаил Васильевич
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник ИФПМ СО РАН
Дураков Василий Григорьевич

Ведущая организация: **Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Омский государственный
технический университет»**

Защита состоится «24» декабря 2009 г. в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова» Д 212.004.01 по адресу:
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
АлтГТУ им. И. И. Ползунова.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации,
просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, АлтГТУ.
Факс: (3852)36-79-03, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Автореферат разослан «__» ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета к.т.н, доцент



Шевцов Ю.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время трубопроводы нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности не дорабатывают своего нормативного срока эксплуатации за счет коррозионных разрушений.

В нефтедобывающей промышленности способом защиты внутренней поверхности трубопроводов от коррозии является нанесение лакокрасочных материалов и эпоксидных смол. Сварные стыки таких трубопроводов содержат внутренние кольца из коррозионно-стойких сталей. Сварку данных стыков осуществляют как двухслойных: «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т». Соединение выполняют с использованием сочетания электродов, предназначенных для сварки каждого слоя в отдельности, или с применением специальных мер по наложению шва. Но даже в этом случае на границах сплавления разнородных сталей могут образовываться закалочные структуры, вызывая образование трещин сразу после сварки или в период эксплуатации трубопроводов. Это требует дополнительных затрат по выбраковке и ремонту данных сварных соединений.

В нефтеперерабатывающей промышленности в процессе эксплуатации трубопроводов печей пиролиза из стали 45Х25Н35СБ (немецкий аналог PG25/35Nb) в камерах радиации на змеевики одновременно воздействует высокая температура (~950°С) и углеводородная среда, что приводит к интенсивному науглероживанию внутренней стенки трубы, развитию межкристаллитной коррозии, образованию трещин и, как следствие, выбраковке данных участков змеевиков. При этом структурно-фазовый состав металла науглероженного слоя и основного объема металла трубы существенно отличается. Данную трубу в полной мере можно принять за двухслойную. Следовательно, в процессе ремонта таких трубопроводов необходимо проводить сварку труб, имеющих науглероженный слой, т.е. сварку условно «двухслойных» труб. Это приводит к усложнению технологии сварки труб печей пиролиза при проведении ремонтных работ, которая до сих пор окончательно не отработана и заключается в предварительном и сопутствующем подогреве свариваемых кромок до 750°С и послесварочном отжиге при 950°С в течение часа с охлаждением под слоем теплоизоляции.

Для обоих случаев металл двухслойных труб отличается как по содержанию углерода и легирующих элементов, так и по структурно-фазовому составу, что усложняет процесс их сварки. Следовательно, в современных условиях дефицита средств ремонта оборудования, стремления к минимизации затрат энергии с одновременным повышением качества неразъемных соединений, исследования по разработке более эффективных способов сварки двухслойных труб являются актуальными.

Целью настоящей работы является разработка способов сварки двухслойных труб, используемых в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности («сталь 20 - сталь 12Х18Н10Т» и «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем»), позволяющих получить прочные сварные соединения с одновременным уменьшением трудоемкости и энергозатрат при их формировании.

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

1. Отработать технологию ручной дуговой сварки на постоянном токе двухслойных труб «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» с обоснованием выбора сочетания типов и марок электродов.

2. Выявить влияние параметров сварки модулированным током на структурные характеристики наплавляемого металла. Обосновать основные структурные характеристики, существенно влияющие на свойства высоколегированного наплавляемого металла.

3. Исследовать влияние параметров сварки модулированным током на структурно-фазовое состояние и механические свойства сварных швов двухслойных труб «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т».

4. Изучить характер изменения структурно-фазового состояния стали 45Х25Н35СБ трубопроводов печей пиролиза в процессе эксплуатации.

5. Исследовать структурно-фазовое состояние и механические свойства сварных швов двухслойных труб «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем» в зависимости от параметров сварки модулированным током.

6. Провести апробацию сварки двухслойных труб по разработанным способам в условиях технологических площадок на ЗАО «Нефтеэнергомонтаж» и ООО «Томскнефтехим». На основе результатов контроля данных сварных соединений разработать рекомендации для внедрения способов сварки в технологию формирования неразъемных соединений на данных предприятиях.

Научная новизна

1. Установлено, что ручная дуговая сварка на постоянном токе двухслойных труб «сталь 20 - сталь 12Х18Н10Т» электродами ЭА-395/9 (тип Э-11Х15Н25М6АГ2), или сочетанием электродов ЗИО-8 (тип Э-10Х25Н13Г2, корень, заполнение) и УОНИ-13/55 (тип Э50А, облицовка) позволяет сформировать сварные соединения с крупнокристаллической структурой наплавляемого металла. Данная структура обеспечивает угол изгиба при испытаниях на статический изгиб, не превышающий $90...105^\circ$, что не удовлетворяет правилам устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов ПБ 03-585-03.

2. Показано, что к наиболее значимым критериям, влияющим на свойства сварных соединений двухслойных труб «сталь 20 - сталь 12Х18Н10Т» и «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем», относятся: длина пакетов дендритов (L), вносящая основной вклад в равноосность зерен (k), угол разориентировки пакетов дендритов (β), уровень микротвердости наплавляемого металла и ее изменение (ΔH_{\square}) в направлении шов – зона термического влияния – сталь 20.

3. Установлено, что для получения мелкокристаллической разориентированной структуры наплавляемого металла при ручной дуговой сварке двухслойных сталей («сталь 12Х18Н10Т – сталь 20» и «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем») модулированным током необходимо использовать режим с равными между собой длительностями тока импульса и тока паузы (240...270 мс) при определенном сочетании электродов. Это обеспечивает угол изгиба $120...130^\circ$ при испытаниях сварных соединений «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» на статический изгиб.

Практическая значимость

1. Предложен способ сварки двухслойной стали «сталь 20 – сталь 12X18H10T», при котором соединение труб, содержащее две трубы с внутренним эмалевым покрытием и внутренними кольцами из коррозионностойкой стали 12X18H10T, выполняют способом сварки модулированным током с прямоугольной формой импульсов тока, длительностью тока импульса 240...260 мс, длительностью тока паузы 250...270 мс, силой тока импульса $I_{и}=145$ А, силой тока паузы $I_{п}=50$ А в три прохода электродами марки ОЗЛ-8.

2. Предложен способ ремонта трубопроводов печей пиролиза из высоколегированных жаростойких сталей (типа стали 45X25H35СБ), имеющих науглероженный слой до 5 мм, с помощью сварки с предварительным и сопутствующим подогревом до 750°С. С целью уменьшения температуры отжига после сварки до 750°С при толщине науглероженного слоя больше 1 мм или полного его исключения при толщине науглероженного слоя до 1 мм сварку проводят с использованием униполярных импульсов тока, модулированных по амплитуде. Корневой слой заваривают ручной дуговой сваркой модулированным током покрытыми электродами марки ГС-1. Заполняющие слои выполняют покрытыми электродами марки ОЗЛ-9.

3. Разработанные способы сварки двухслойных сталей использованы для получения неразъемных соединений в условиях технологических площадок на ЗАО «Нефтеэнергомонтаж» и ООО «Томскнефтехим». На основе результатов визуально-измерительного и рентгенографического контролей сварных соединений разработанные способы сварки рекомендованы для внедрения в технологию формирования неразъемных соединений на данных предприятиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ импульсно-дуговой сварки двухслойной стали «сталь 20 – сталь 12X18H10T», с прямоугольной формой импульсов тока, длительностью протекания тока импульса 240...260 мс, длительностью протекания тока паузы 250...270 мс, силой тока импульса $I_{и}=145$ А, силой тока паузы $I_{п}=50$ А электродами марки ОЗЛ-8, защищенный патентом РФ № 2344910;

2. Способ ремонта трубопроводов печей пиролиза «сталь 45X25H35СБ - Сталь 45X25H35СБ с науглероженным слоем до 5 мм» с помощью сварки с предварительным и сопутствующим подогревом до 750°С, уменьшением температуры отжига после сварки до 750°С или полного его исключения при толщине науглероженного слоя до 1 мм, с использованием униполярных импульсов тока, модулированных по амплитуде, на который получено положительное решение по заявке на патент № 2007.141.830 от 12.03.09 г.;

3. Комплекс результатов исследований влияния способов сварки, параметров импульсно дуговой сварки, типов и марок электродов, термической обработки на структурно-фазовое состояние, скорость коррозии и механические свойства сварных соединений двухслойных труб.

Личный вклад соискателя заключается в написании литературного обзора по тематике диссертации, постановке задачи диссертации, проведении экспериментов, обработке полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей и патентов по теме диссертации.

Апробация работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Региональной научно-технической конференции «Сварка и контроль – 2005», г. Челябинск, 2005 г.; Международной школе-семинаре «Новые материалы, создание, структура, свойства», г.Томск, 2006.; «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства», г. Тольятти, 2006 г.; XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г.Томск, 2006 г.; IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 2008 г.; Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2009 г.; Международной научно-практической конференции «Славяновские чтения», г. Липецк, 2009 г.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 4 статья в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, получен 1 патент РФ и положительное решение на выдачу патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка литературы из 174 наименований, приложения, содержит 145 страниц машинописного текста, включая 24 таблицы и 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель исследований, научная новизна и практическая значимость.

В первом разделе «ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ СВАРИВАЕМОСТИ» проанализированы проблемы коррозионного разрушения трубопроводов нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности.

Показано, что при формировании неразъемного соединения транспортных трубопроводов нефтедобывающей промышленности возникает необходимость сварки двухслойных труб, состоящих из аустенитного (Сталь 12Х18Н10Т) и феррито-перлитного (Сталь 20) слоев. При ремонтной сварке труб печей пиролиза нефтеперерабатывающей промышленности необходимо соединять трубы из стали 45Х25Н35СБ, имеющей науглероженный слой толщиной до 5 мм с исходным металлом трубы, то есть формировать неразъемное соединение условно двухслойных труб.

Установлено, что при сварке технологических труб из двухслойных сталей существуют проблемы, связанные с формированием переходных и закалочных структур при перемешивании основного и электродного металлов, относящихся к разным структурным классам. Приведены существующие пути решения данных проблем. Рассмотрена возможность применения способа сварки модулированным током в качестве альтернативного для соединения двухслойных труб. Указаны достоинства данного способа сварки. На основании изложенного сделан вывод об актуальности проведения исследований сварки технологических труб из двухслойных сталей. Данные технологические трубопроводы контролируются Ростехнадзором РФ.

Во втором разделе «МАТЕРИАЛЫ, АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ» представлены материалы, применяемые в работе и методы их исследования. Объектами исследований являлись образцы сварных соединений двухслойных труб (рис.1), полученных ручной дуговой сваркой постоянным и модулированным током. Сварку осуществляли с использованием выпрямителя ВДМ-1001 и балластного реостата РБ-306. Для модуляции постоянного тока использовали устройство УДИ-301. Амплитудное значение тока задавали балластным реостатом РБ-306, а величину тока паузы – устройством УДИ-301. При наплавке и сварке модулированным током варьировались такие параметры, как длительность тока импульса и длительность тока паузы с целью всестороннего анализа формирующихся структур.

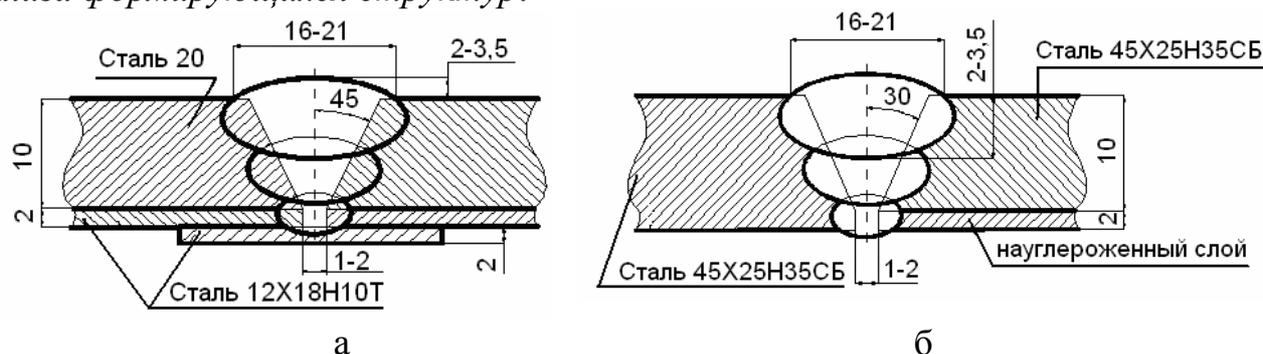


Рис. 1. Форма сварных соединений двухслойных сталей «стал 20 – стал 12Х18Н10Т» (а), «стал 45Х25Н35СБ - стал 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем» (б)

Величины тока импульса и тока паузы не изменялись и составляли 145 и 50 А соответственно. Алгоритм модуляции тока (рис.2) предусматривал формирование дополнительных кратковременных импульсов тока ($\tau_{\text{доп.имп}} = 8,6$ мс; $f=28$ Гц) в период низкого энергетического уровня с целью обеспечения технологической устойчивости процесса сварки покрытыми электродами. Выбор значений тока импульса и тока паузы, а также формы импульсного тока обоснован в работах [1,2].

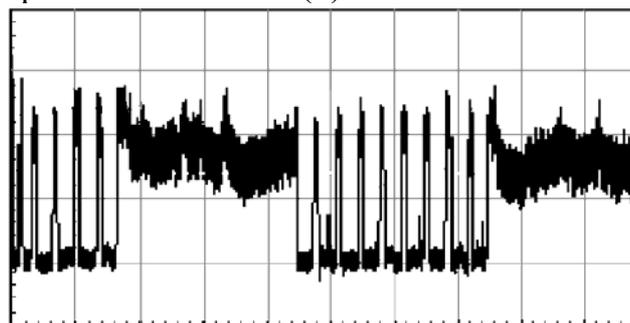


Рис. 2. Осциллограмма тока в сварочной цепи: масштаб по вертикальной оси $\mu_i=50$ А/дел; по горизонтальной - $\mu_t=100$ мс/дел

Структурные исследования проводили методами металлографии с помощью оптического микроскопа *МЕТАМ-ЛВ 31*. Фрактографическое исследование поверхности изломов разрушенных образцов проводили с использованием растрового электронного микроскопа *Philips SEM 515*, снабженного микроанализатором *EDAX ECON IV*. Рентгеноструктурный анализ осуществляли с помощью рентгеновского дифрактометра *ДРОН-УМ1*.

Микротвердость металла определяли на приборе *ПМТ-3*. Испытания на статический изгиб и статическое растяжение проводили согласно ГОСТ 6996-66. При испытаниях на стойкость к питтинговой коррозии сварные швы выдерживали в 10%-ном водном растворе $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ при температуре $(20 \pm 1)^\circ C$ по три образца на одно испытание (ГОСТ 9.912-89).

В третьем разделе «СВАРКА ДВУХСЛОЙНЫХ ТРУБ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ» приведены результаты исследований сварных соединений двухслойных сталей «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» и «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем». Сварку двухслойной стали «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» осуществляли по девяти режимам, отличающимся марками применяемых электродов и их сочетаниями при формировании корня, заполнения и облицовки шва. Показано, что при послойном исполнении сварного соединения разными марками электродов (корень шва со стороны нержавеющей стали – аустенитными электродами, заполняющие слои феррито-перлитными), наряду с основной структурой образуется бейнитная, бейнитно – мартенситная или мартенситная неравновесные структуры. Формирование данных структур обеспечивает неравномерное распределение микротвердости по толщине наплавленного металла (рис. 3,а,б) и образование трещин в металле шва, околошовной зоне (ОШЗ) или в зоне термического влияния (ЗТВ).

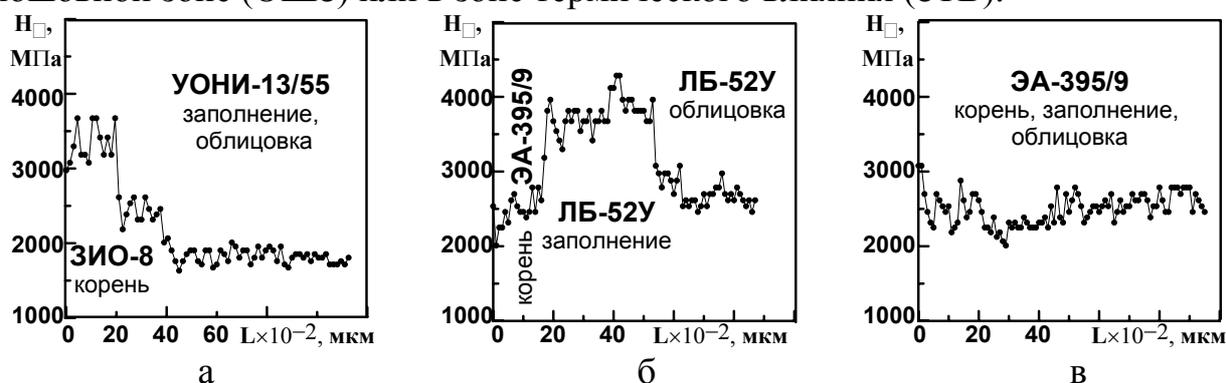


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине металла шва

При выполнении корня сварного соединения электродами марки ЗИО-8, а последующих слоев – электродами марки УОНИ-13-55 формируется аустенитно-мартенситная структура. О наличии мартенсита в зоне сплавления свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа, микроструктура (пластинчатая его морфология) и высокая микротвердость (рис. 4,а,б).

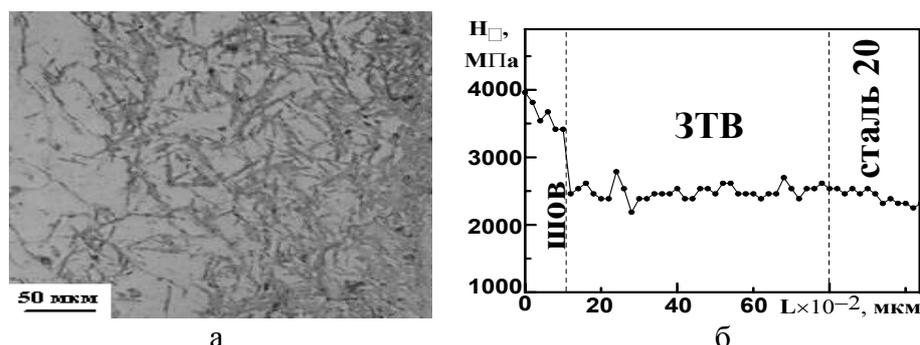


Рис. 4. Микроструктура (а) и распределение микротвердости по зоне термического влияния (б) участка сварного соединения «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т», выполненного сочетанием электродов ЗИО-8 (корень) – УОНИ-13/55 (заполнение и облицовка)

При формировании корня шва и заполнении электродами ЗИО-8, а облицовке - электродами УОНИ-13/55 в зоне перемешивания наплаваемого металла «заполнение-облицовка» сталь 12Х18Н10Т не принимает участия, вследствие чего образования метастабильных структур не происходит. В этом случае, также как и при формировании сварного шва электродами марок ЭА-395/9, ОЗЛ-8, НИАТ-5,

наблюдается наиболее однородное распределение микротвердости по толщине металла шва (рис. 3,в). При испытаниях на статический изгиб максимальный угол изгиба ($90...105^\circ$) показали сварные соединения, выполненные электродами марки ЭА-395/9, и сочетанием электродов ЗИО-8 (корень, заполнение), УОНИ-13/55 (облицовка). По правилам устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов ПБ 03-585-03, минимальный угол изгиба для низколегированных сталей должен составлять 120° , для аустенитных – 100° .

На основе анализа проведенных исследований обоснован выбор данных сварочных материалов. Можно предположить, что дополнительное целенаправленное влияние на формирование структуры в процессе сварки (например, способ сварки модулированным током) в сочетании с выбранными марками электродов позволит получить сварное соединение двухслойных сталей, которое при испытаниях будет обеспечивать угол изгиба не менее 120° .

Для оценки возможности сварки условно “двухслойных” труб «сталь 45X25H35СБ - сталь 45X25H35СБ с науглероженным слоем», изучено изменение структуры и фазового состава стали 45X25H35СБ трубопроводов печей пиролиза на основе их анализа в исходном состоянии, после 20 тыс. часов наработки и после выхода из эксплуатации.

В исходном состоянии аустенитная сталь 45X25H35СБ имеет литое строение с включениями карбидов хрома типа Cr_3C_2 . Распределение микротвердости по толщине стенки трубы равномерное и составляет 2500 МПа (рис. 5,а). После эксплуатации 20 тыс.ч. по границам аустенитных зерен наблюдается интенсивное выпадение карбидов хрома типа Cr_7C_3 . В дальнейшем со стороны внутренней поверхности трубы в результате наличия углеродов и высокой температуры идет активная диффузия углерода, приводящая к более значительному увеличению количества карбидов хрома в этом объеме материала. Это приводит к росту среднего значения твердости данной зоны до 3000 МПа с одновременным увеличением разброса значений (2200...4300 МПа) (рис. 5,б). Выделение и коагуляция карбидов по границам зерен способствует охрупчиванию последних. Одновременное действие МКК и выделение хрупких карбидов приводит к образованию микротрещин и пор, которые в ходе эксплуатации объединяются. Проникающий внутрь рабочий газ продолжает интенсивно насыщать углеродом приповерхностный к трещинам объем металла. Это приводит к дополнительному образованию карбидов пластинчатой формы типа $Cr_{23}C_6$. Образование дисперсных карбидов $Cr_{23}C_6$ способствует повышению среднего значения микротвердости этого объема материала до 3500 МПа (рис. 5,в) с одновременным увеличением ее разброса (2300...4500 МПа).

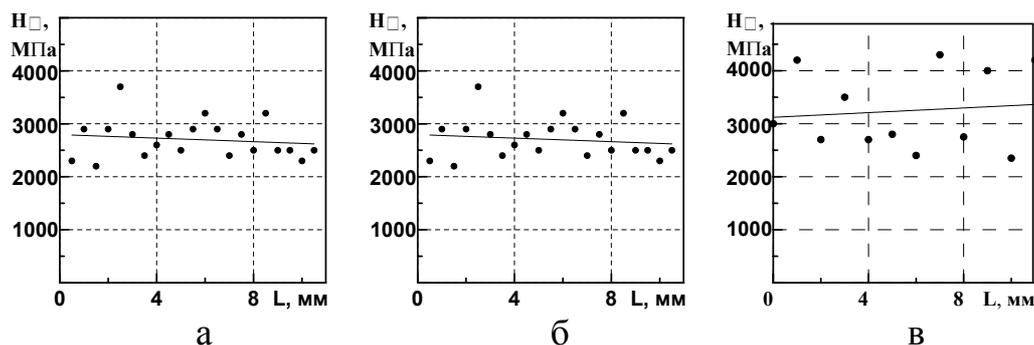


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине стенки трубы, изготовленной из стали 45Х25Н35СБ в исходном состоянии (а), после 20 тыс.ч. эксплуатации (б), после выхода из эксплуатации (в)

Данные структурно-фазовые изменения стали приводят к неравномерному распределению легирующих элементов по толщине стенки трубы (рис. б), формированию трещин и, следовательно, выбраковке труб.

Согласно принятой технологии ремонта трубопроводов печей пиролиза, в процессе сварки осуществляются предварительный и сопутствующие подогревы до 750°C , а после сварки - отжиг при 950°C в течение часа с охлаждением под слоем теплоизоляции. Высокий отжиг позволяет частично растворить выделившиеся карбиды. Их средний диаметр составляет $d_{\text{ср}} = 4,2$ мкм, а дисперсия $\sigma_n = 4,4$ мкм. меньшая температура отжига или его отсутствие способствует увеличению как среднего размера карбидных частиц, так и дисперсии их распределения ($500^{\circ}\text{C} - d_{\text{ср}} = 5.6$ мкм, $\sigma_n = 6$ мкм; без отжига - $d_{\text{ср}} = 6$ мкм, $\sigma_n = 6,8$ мкм), что приводит к образованию трещин, распространяющихся преимущественно по металлу корня шва.

Таким образом, диффузия углерода в процессе эксплуатации стали 45Х25Н35СБ приводит к изменению ее структурно-фазового состава с образованием «двухслойной» структуры металла трубы. В ходе ремонта таких труб возникает необходимость применения сложной термической обработки при формировании сварного соединения ручной дуговой сваркой на постоянном токе.

Можно предположить, что применение альтернативного способа сварки, например, ручной дуговой сварки модули-

рованным током, позволит упростить термическую обработку при сохранении уровня прочности сварного соединения.

В четвертом разделе «ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ ТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АУСТЕНИТНОГО НАПЛАВЛЯЕМОГО МЕТАЛЛА» проведены исследования структуры и микротвердости аустенитного металла, наплавленного в три прохода на сталь 12Х18Н10Т электродами марки ОЗЛ-8, и на сталь 45Х25Н35СБ со стороны науглероженного слоя (первый - электродами ГС-1; второй и третий – электродами ОЗЛ-9А) с помощью модулированного и постоянного тока. Величина постоянного тока составляла 90 А.

На рис. 7 представлены схема формирующейся структуры наплавленного металла и ее оценка: β - угол разориентировки пакетов дендритов (зерен), град; L – длина пакетов дендритов, мкм; b – ширина пакетов дендритов, мкм.

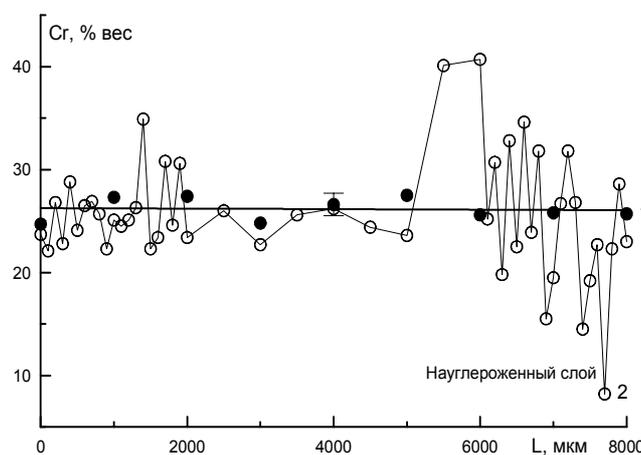


Рис. 6. Распределение хрома по толщине трубы до (1) и после (2) эксплуатации

При анализе микроструктуры металла, наплавленного на исследуемые стали, было выявлено, что минимальный угол разориентировки пакетов дендритов ($5...15^{\circ}$) наблюдается

при ручной дуговой наплавке постоянным
ТОКОМ

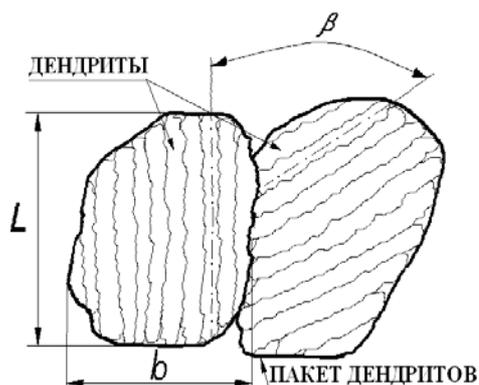


Рис. 7. Схема формирующейся структуры наплавленного металла

или модулированным током по режимам, у которых длительности импульса и паузы в 2...4 раза отличаются друг от друга (рис. 8,а,в). Средние размеры зерен для всех исследуемых режимов наплавки практически не отличаются друг от друга (135...164 мкм для наплавки на сталь 12Х18Н10Т, 320...390 мкм для наплавки на сталь 45Х25Н35СБ), однако дисперсия размеров зерен отличается в 2...2,5 раза (рис. 8,б,г).

Наибольшую дисперсию размеров зерен имеют наплавки, выполненные модулированным током с $\tau_{\text{и}} \sim 400$ мс и постоянным током, а наименьшую - модулированным током с $\tau_{\text{и}} \sim 250$ (240...260) мс, $\tau_{\text{п}} \sim 260$ (250...270) мс и дополнительно для стали 12Х18Н10Т с $\tau_{\text{и}} \sim 80$ (70...90) мс, а $\tau_{\text{п}} \sim 260$ (250...270) мс. Однородность размера зерна обеспечивает равномерное распределение микротвердости по толщине наплавленного металла (рис. 9).

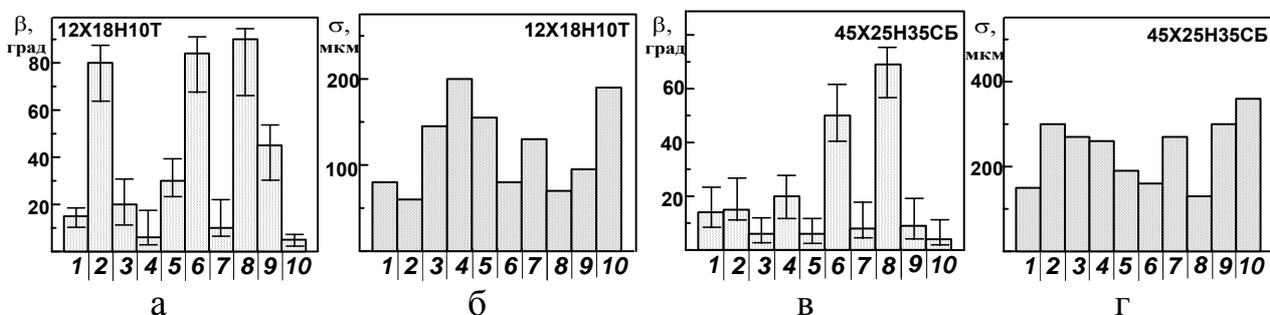


Рис.8. Угол разориентировки (а,в) и дисперсия размеров зерен (б,г) металла, наплавленного на сталь 12Х18Н10Т и на сталь 45Х25Н35СБ соответственно по режимам:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau_{\text{и}}$ (мс):	150	80	350	400	50	80	100	250	300	пост.
$\tau_{\text{п}}$ (мс):	365	260	260	400	450	75	400	260	170	Ток

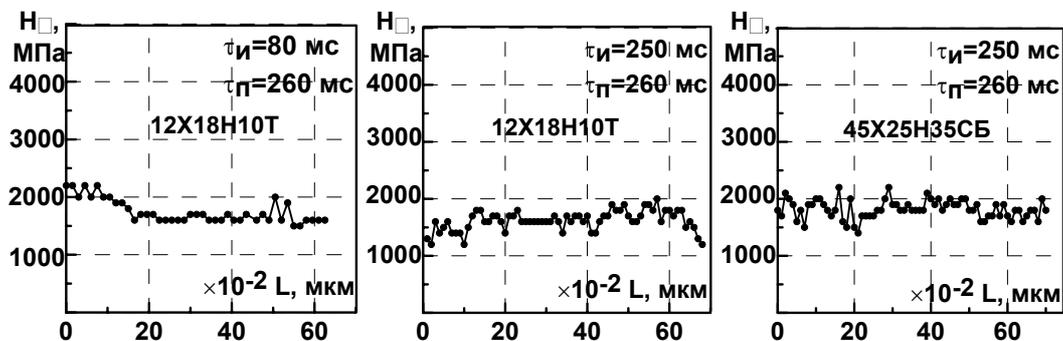


Рис. 9. Распределение микротвердости по толщине наплавленного металла

Основываясь на результатах данных исследований можно предположить, что прочные сварные соединения рассматриваемых двухслойных труб позволят получить режимы сварки модулированным током, обеспечивающие большой угол разориентировки пакетов дендритов и минимальную их дисперсию.

В пятом разделе «СВАРКА ДВУХСЛОЙНЫХ ТРУБ МОДУЛИРОВАННЫМ ТОКОМ» проведены исследования структуры и свойств сварных соединений двухслойных сталей «сталь 20 – сталь 12X18H10T» и «сталь 45X25H35СБ – сталь 45X25H35СБ с науглероженным слоем», выполненных ручной дуговой сваркой модулированным током.

Анализ результатов исследования, представленных в четвертом разделе, показал, что применение способа сварки модулированным током позволяет не только регулировать кристаллизацию металла шва, но и влиять на глубину проплавления основного металла. Это напрямую зависит от тепловложения. Из литературы известно пять способов расчета погонной энергии. Для всех пяти способов получены расчетные значения величины погонной энергии при ручной дуговой сварке модулированным током по режимам с длительностью тока импульса ~ 80 и ~ 250 мс, длительностью тока паузы ~ 260 мс и при сварке на постоянном токе. Оказалось, что наиболее приемлемым способом расчета, результаты которого совпадают с экспериментально полученными данными по протяженности зоны термического влияния, является способ, предложенный в [3]. На основе указанного способа расчета и данных эксперимента установлено, что применение электродов марки ОЗЛ-8 приводит к уменьшению величины погонной энергии на 10...30% по сравнению с электродами марок НИАТ-5 и ЭА-395/9. Это обусловлено высоким коэффициентом наплавки электродов марки ОЗЛ-8, что приводит к увеличению скорости сварки и, как следствие, уменьшению погонной энергии и протяженности зоны термического влияния.

Сварное соединение «сталь 20 – сталь 12X18H10T». Сварку двухслойных образцов «сталь 20 – сталь 12X18H10T» выполняли электродами марок ОЗЛ-8, НИАТ-5 и ЭА-395/9 по режимам с длительностью импульса ~ 80 и ~ 250 мс, длительностью паузы ~ 260 мс.

Режим сварки модулированным током с длительностью импульса ~ 80 мс в три раза меньшей длительности паузы (~ 260 мс) приводит к зашлаковыванию металла шва вследствие недостаточного давления дуги для оттеснения шлаковой ванны (рис. 10,а).

Микроструктура металла швов по всей ее толщине имеет дендритное строение. Замечено, что при сварке модулированным током средняя длина пакетов дендритов L меньше (рис. 10,б), а угол разориентации β больше, чем при сварке на постоянном токе (рис. 10,в). Применение режима сварки с $\tau_{и} \sim 250$ мс электродами ОЗЛ-8

позволяет получить пакеты дендритов в два раза короче ($L = 0.65$ мм), чем при сварке на постоянном токе ($L = 1,3$ мм). Несмотря на то, что электроды марок НИАТ-5 и ЭА-395/9 относятся к одному типу Э-11Х15Н25М6АГ2, средняя длина пакетов дендритов при использовании электродов марки ЭА-395/9 больше в 1,4 раза, чем при использовании электродов марки НИАТ-5. Это связано с ускоряющим действием азота на рост зерна аустенита, который входит в состав электродов ЭА-395/9.

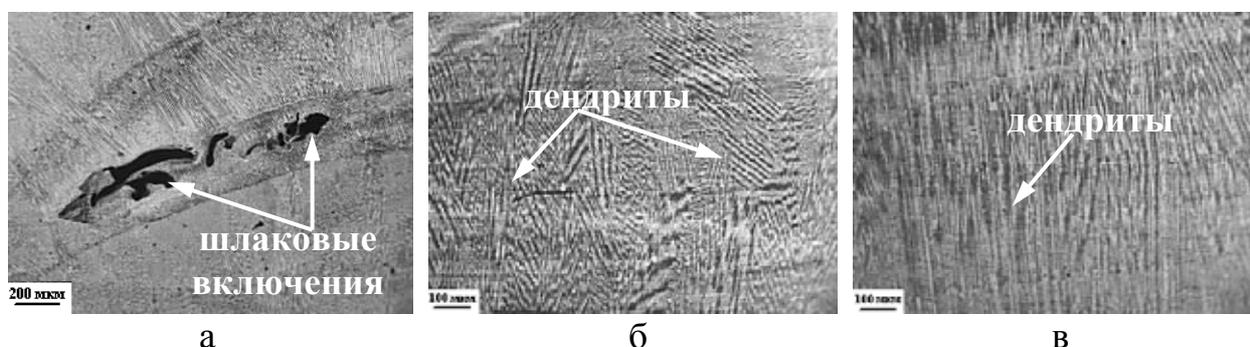


Рис. 10. Микроструктура металла шва после сварки модулированным (а – ($\tau_{и} \sim 80$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс) б - ($\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс)) и постоянным (в) током

Сравнивая ширину и длину пакетов дендритов, была оценена их равноосность ($k=b/L$). Выявлено, что наибольшую равноосность имеют пакеты дендритов в сварных соединениях, выполненных модулированным током электродами НИАТ-5 и ЭА-395/9 при $\tau_{и} \sim 80$ мс, и электродами ОЗЛ-8 при $\tau_{и} \sim 250$ мс.

Средние значения микротвердости металла швов максимально отличаются между собой на 450...500 МПа. Наиболее равномерное её распределение по толщине шва наблюдается при сварке модулированным током с $\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс. Этот же режим позволяет получить наименьшую дисперсию микротвердости в направлении шов – ЗТВ – сталь 20.

При испытаниях сварных соединений на статический изгиб наибольший угол изгиба (130°) получен на соединении, выполненном сваркой модулированным током с $\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс электродами марки ОЗЛ-8. Наименьший угол изгиба (69°) – на соединении, выполненном электродами марки НИАТ-5 при использовании режима с $\tau_{и} \sim 80$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс.

При испытаниях на статическое растяжение сварные соединения, выполненные сваркой модулированным током с $\tau_{и} \sim 80$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс, разрушились по зоне термического влияния, а сваркой с $\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс – по основному металлу.

Анализ результатов испытаний металла швов на стойкость к питтинговой коррозии показал, что процесс коррозии идет интенсивно в течение первых 24 часов. При этом металл швов сварных соединений, полученных сваркой модулированным током с $\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс, корродирует со скоростью, меньшей на 25...40 %, чем металл швов других сварных соединений.

Минимальная скорость коррозии наблюдается в металле сварного шва, выполненного электродами марки ЭА-395/9. Замечено, что коррозия происходит исключительно в тех участках шва, где в процессе сварки происходило перемешивание электродного металла и стали 20. Корень шва, в котором в большей

степени участвует сталь 12Х18Н10Т, во всех образцах оставался стойким к питтинговой коррозии.

Таким образом, сварка модулированным током ($\tau_{и} \sim 250$ мс, $\tau_{п} \sim 260$ мс) двухслойных труб «сталь 20 - сталь 12Х18Н10Т» электродами марки ОЗЛ-8 позволяет получать прочное сварное соединение, стойкое к питтинговой коррозии.

Сварное соединение «сталь 45Х25Н35СБ – сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем». Сварку двухслойных образцов «сталь 45Х25Н35СБ – сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем» выполняли с предварительным подогревом до 750°C по режиму с длительностью импульса 250 мс, длительностью паузы 260 мс. Часть образцов подвергалась отжигу после сварки при температурах 300, 500, 750 и 950°C .

Измельчение структуры первичной кристаллизации, увеличение угла разориентации при сварке модулированным током и отжиг при температурах 950 и 750°C позволяют релаксировать внутренние напряжения и, следовательно, получить сварное соединение без трещин (рис. 11,а). Отжига при температурах 300 и 500°C недостаточно для релаксации термических напряжений и растворения грубых карбидных выделений типа Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , поступающих из науглероженного слоя при формировании корня шва, что в результате приводит к появлению трещин в наплавленном металле сварных соединений (рис. 11,б). Образование трещин не наблюдается в образцах, имеющих науглероженный слой толщиной до 1 мм, даже при отсутствии отжига.

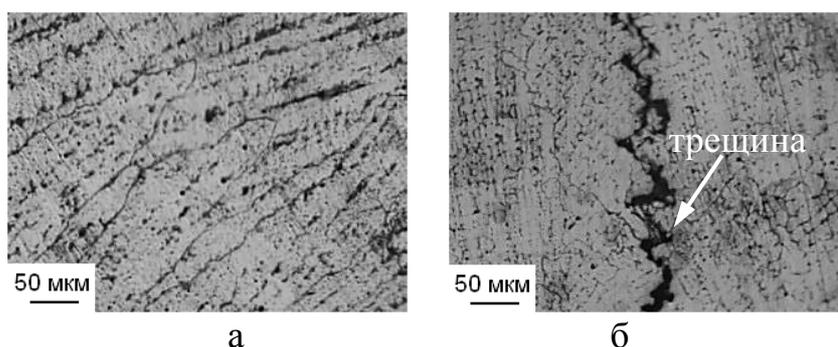


Рис. 11. Микроструктура металла шва: отжиг 750°C (а), отжиг 500°C (б)

Средний диаметр карбидов в металле швов, выполненных сваркой модулированным током независимо от температуры отжига, на 25...40 % меньше, чем в металле швов, выполненных сваркой на постоянном токе (рис. 12,а), и в два раза меньше диаметра карбидов, выделяющихся при эксплуатации в основном металле. Температура

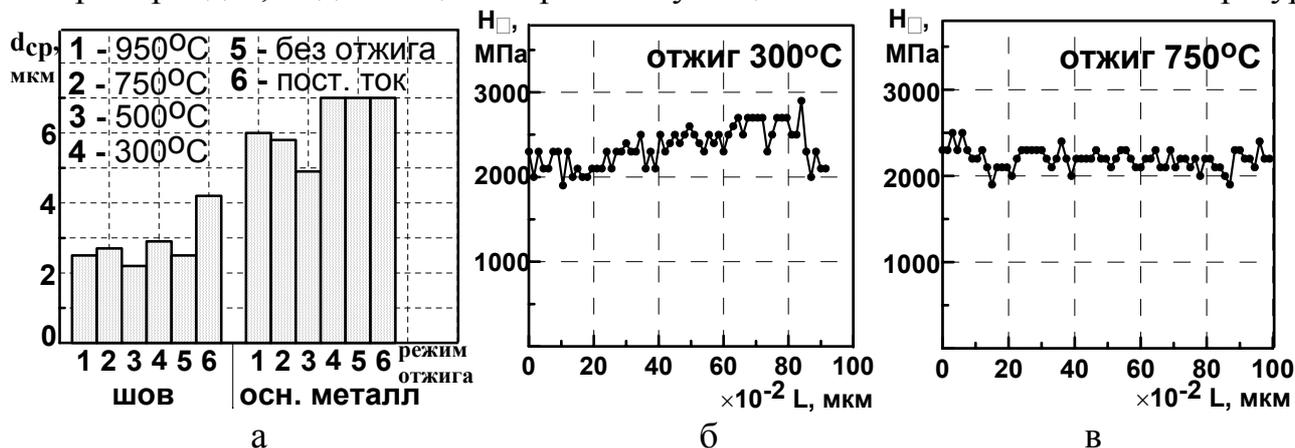


Рис. 12. Средний размер карбидов (а) и распределение микротвердости по толщине металла шва (б,в)

отжига влияет на равномерность выделения карбидов по объему наплавляемого металла и, следовательно, на однородность в распределении микротвердости по толщине металла шва.

Неравномерное выделение карбидов хрома в металле швов, подвергнутых низкому отжигу, вызывает большой разброс значений микротвердости по толщине сварного шва (рис. 12,б). Наиболее равномерное распределение микротвердости по толщине металла шва наблюдается в сварных соединениях после отжигов 500, 750 и 950°C (рис. 12,в). При этом среднее значение микротвердости сварных швов не превышает 2500 МПа, что удовлетворяет требованиям РД по ремонту трубопроводов печей пиролиза.

Более равномерная и дисперсная структура сварных швов по сравнению с основным металлом, в процессе эксплуатации которого увеличивается как объемная доля карбидов хрома по границам зерен со стороны внутренней стенки трубы (диффузия углерода), так и их средний размер, приводит при испытаниях на статический загиб к разрушению образцов по основному металлу. Угол изгиба при этом не превышает 30°.

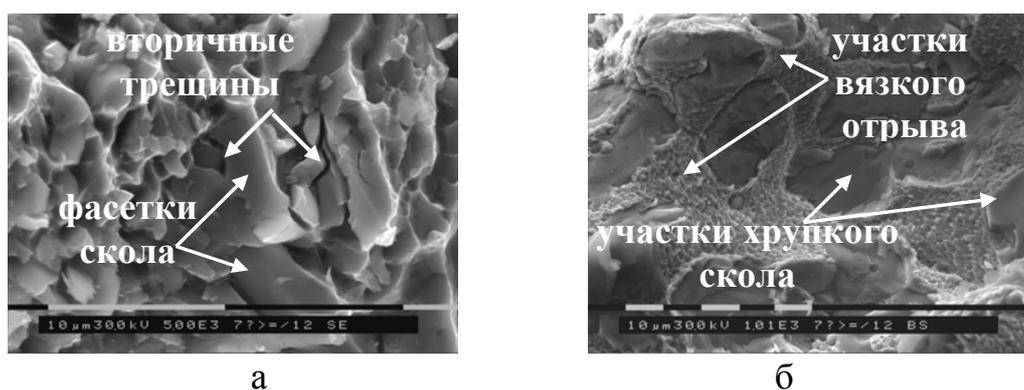


Рис. 13. Фрактография изломов: со стороны внутренней стенки трубы (науглероженный слой) (а), со стороны внешней стенки трубы (б)

При испытаниях сварных соединения на статическое растяжение разрушение всех образцов происходит по основному металлу. Анализ изломов образцов после испытаний на растяжение свидетельствует о том, что со стороны науглероженного слоя изломы представлены как типично хрупкие (рис. 13,а). Явно видны хрупкие участки скола и межзеренного разрушения. На фасетках скола видны многочисленные вторичные трещины. Встречаются только отдельные изолированные участки вязкого отрыва. Для исходного материала и материала со стороны внешней стенки трубы, где отсутствует науглероживание, излом типично хрупко-вязкий (рис. 13,б). Участки хрупкого скола отдельных карбидных составляющих окружены со всех сторон участками вязкого отрыва. Микрорельеф данных поверхностей имеет ямочное строение, характерное для вязкого излома.

Таким образом, сварка модулированным током ($\tau_{и} \sim 250 \text{мс}$, $\tau_{п} \sim 260 \text{мс}$) условно двухслойных труб «сталь 45Х25Н35СБ – сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем» позволяет снизить температуру отжига до 750°C при толщине науглероженного слоя более 1 мм или полностью его исключить при толщине

науглероженного слоя менее 1 мм и получить одновременно равнопрочное сварное соединение.

Планируемый экономический эффект от внедрения разработанного способа сварки двухслойных труб «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» составит ~126 тыс. руб. при сварке одного километра трубопровода. При внедрении разработанного способа сварки двухслойных труб «сталь 45Х25Н35СБ – сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем» планируемый экономический эффект составит ~4 тыс. руб. при замене 100 дефектных участков змеевиков печей пиролиза в процессе ремонта.

В приложении представлены протоколы механических испытаний сварных соединений, акт о проведении сварки натуральных образцов на ООО «Томскнефтехим» по разработанному способу и заключения по визуально-измерительному и радиографическому контролю данных сварных соединений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе использования широкой номенклатуры электродов при ручной дуговой сварке на постоянном токе двухслойных сталей, состоящих из аустенитного и феррито-перлитного слоев, обосновано применение электродов типа Э-11Х15Н25М6АГ2 (ЭА-395/9) или сочетания электродов типа Э-10Х25Н13Г2 (ЗИО-8, корень и заполнение) и Э50А (УОНИ-13/55, облицовка), обеспечивающее угол изгиба при испытаниях на статический изгиб, не превышающий $90...105^\circ$.

2. Показано, что при сварке на постоянном токе и при сварке модулированным током наиболее значимыми критериями, влияющими на свойства сварных соединений двухслойных труб «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т» и «сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем», являются: длина пакетов дендритов (L), вносящая основной вклад в равноосность зерен (k), угол разориентировки пакетов дендритов (β), микротвердость наплавляемого металла и уровень ее изменения в направлении шов – ЗТВ – сталь 20.

3. Установлено, что способ сварки модулированным током по сравнению со сваркой на постоянном токе позволяет сформировать структуру наплавленного металла с меньшей длиной пакетов дендритов (в 1,5-2 раза), большей их равноосностью (в 2-3 раза) и большим (в 6-9 раз) углом разориентировки. Это способствует получению прочных сварных соединений стойких к питтинговой коррозии.

4. Разработаны способы сварки модулированным током двухслойных труб в нефтедобывающей («сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т») и нефтеперерабатывающей («сталь 45Х25Н35СБ - сталь 45Х25Н35СБ с науглероженным слоем») отраслях промышленности с длительностями тока импульса 240...260 мс, тока паузы 250...270 мс и величинами тока в импульсе 145А, тока в паузе 50А, при использовании определенного сочетания электродов и режимов термической обработки, защищенные патентом РФ и положительным решением по заявке на патент.

5. Разработанные способы сварки двухслойных сталей использованы для получения неразъемных соединений в условиях технологических площадок на ЗАО «Нефтеэнергомонтаж» и ООО «Томскнефтехим». По результатам механических испытаний разработанные способы сварки рекомендованы для внедрения в технологию формирования неразъемных соединений на данных предприятиях. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных способов составляет 130126 руб.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Гнусов С.Ф., Романова А.А. (**Хайдарова А.А.**), Советченко Б.Ф. Влияние длительности эксплуатации трубопроводов печей пиролиза на структуру сварного шва и основного металла // Сварка в Сибири. – 2005. - №2. – С. 36-38.

2. Гнусов С.Ф., Романова А.А. (**Хайдарова А.А.**), Советченко Б.Ф. Влияние применения сварочных электродов на качество биметаллических стыков сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т нефтегазовых трубопроводов // Сварка в Сибири. – 2005. - №2. – С. 56-59.

3. Гнусов С.Ф., **Хайдарова А.А.**, Советченко Б.Ф. Влияние параметров режима сварки на образование сварного соединения из стали 45Х25Н35СБ со сложным фазовым составом // Тяжелое машиностроение. – 2008. - №4. – 21-24.

4. Гнусов С.Ф., **Хайдарова А.А.**, Советченко Б.Ф. Изменение структуры стали 45Х25Н35СБ в процессе эксплуатации // Тяжелое машиностроение. – 2008. - №6. – С. 25-28.

5. Гнусов С.Ф., **Хайдарова А.А.**, Советченко Б.Ф. Особенности сварки двухслойных труб из сталей 12Х18Н10Т и 20 // Сварочное производство. - 2009.- №8. – С. 9-15.

6. Гнусов С.Ф., **Хайдарова А.А.**, Советченко Б.Ф. Влияние способа сварки на структуру и свойства сварных соединений разнородных сталей с аустенитным швом (Ч.2) // Сварочное производство. - 2009.-№12. – С. 3-9.

7. Пат. 2344910 РФ. Способ сварки эмалированных труб с внутренней защитой сварного стыка / **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф., Советченко Б.Ф. Опубл. 27.01.2009.

8. Заявка на патент № 2007.141.830 РФ. / **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф., Советченко Б.Ф. Положительное решение от 12.03.09 г.

9. **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф., Советченко Б.Ф. Изменение структуры и особенности ремонтной сварки трубопроводов печей пиролиза // Сбор. док. Всероссийской науч. тех. конф. «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства» Т1. / ТГУ. - Тольятти, 2006.- С. 88-91.

10. **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф. Влияние способа сварки на образование сварного соединения из стали 45Х25Н35СБ со сложным фазовым составом // Труды IV Международной науч. тех. конф. «Современные проблемы машиностроения». / ТПУ. - Томск, 2008. – С. 304-307.

11. **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф. Сварка двухслойных труб из стали 20 и стали 12Х18Н10Т // Труды IV Международной науч. тех. конф. «Современные проблемы машиностроения». / ТПУ. - Томск, 2008. – С. 307-311.

12. **Хайдарова А.А.**, Гнусов С.Ф. Импульсно-дуговая сварка двухслойных труб сталь 20-сталь 12Х18Н10Т // Труды IV Международной науч. тех. конф. «Современные проблемы машиностроения». / ТПУ. - Томск, 2008. – С. 311-315.

13. Хайдарова А.А., Гнусов С.Ф. Особенности формирования структуры при импульсно-дуговой наплавке на сталь со сложным фазовым составом // Труды IV Международной науч. тех. конф. «Современные проблемы машиностроения». / ТПУ. - Томск, 2008. – С. 315-319.

Цитируемая литература:

1. Мазель А.Г., Дедюх Р.И., Князьков А.Ф. Устойчивость горения дуги при ручной дуговой сварке модулированным током. // Сварочное производство. – 1975. - №8. – С. 27-29.

2. Мазель А.Г., Дедюх Р.И. О стабильности процесса ручной дуговой сварки модулированным током. // Сварочное производство. – 1978. - №12. – С.11-13.

3. Барабохин Н.С., Сошко И.Ф. К расчету мощности импульсной дуги. // Сварочное производство. -1976. - №5. – С. 18-20.