

**Севостьянов Сергей Петрович**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ  
ПОВЫШЕНИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРИ МНОГОДУГОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ТРУБ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**ЕФИМЕНКО Любовь Айзиковна**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.  
Губкина, профессор

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент

**КОБЕРНИК Николай Владимирович**

ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э.  
Баумана», врио директора

кандидат технических наук

**ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валерьевич**

НИУ «МЭИ», доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь**

Защита состоится «29» апреля 2021 г. в 14:30 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном  
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,  
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью  
организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного  
совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана  
и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

**Щипаков Н.А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В условиях растущего спроса на природный газ, и значительного удаления его месторождений от конечных потребителей возрастает роль газотранспортной системы в развитии энергетической отрасли страны. Отличительной особенностью современных газотранспортных систем является использование для их строительства электросварных труб большого диаметра (до 1420 мм) из высокопрочных сталей способных обеспечить надежную эксплуатацию магистральных газопроводов высокого давления (до 11,8 МПа). При изготовлении труб большого диаметра производители применяют высокопроизводительный способ многодуговой сварки под флюсом 4-я или 5-ю сварочными дугами в одну ванну.

Всякий раз при переходе на изготовление новой номенклатуры труб производитель вынужден разрабатывать технологические мероприятия по сварке, компенсирующие негативное влияние термовременных параметров многодугового процесса. Как правило такие работы требуют полноценных научных исследований.

Анализ современных литературных данных свидетельствует о том, что одной из наиболее сложных задач при сварке труб является обеспечение нормативных требований по ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния, особенно для эксплуатации в условиях отрицательных температур.

Многие исследователи (Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И., Матросов Ю.И., Франтов И.И., Пышминцев И.Ю., Макаров Э.Л., Грей Дж. М., Коллинз Ч. и др.) отмечают необходимость дополнительных материальных и трудовых затрат для исключения значительного «разброса» значений ударной вязкости при испытаниях металла зоны термического влияния сварных соединений, присущего многодуговой сварке современных трубных сталей. Для потребителей это фактор риска несоответствия показателей трещиностойкости требованиям, предъявляемым нормативными документами.

Среди известных методов регулирования процессов структурообразования и свойств сварных соединений большинство базируется на снижении погонной энергии. Известны приемы варьирования скоростей охлаждения при способах сварки с большим тепловложением за счет дополнительного охлаждения сварных соединений. Вместе с тем при использовании традиционной технологии производства труб, особенно с повышенными толщинами стенок, применение указанных методов технологического регулирования термических циклов не всегда эффективно.

Проблема нарушения стабильности показателей сопротивления хрупкому разрушению в зоне термического влияния сварных соединений, выполненных многодуговой сваркой под флюсом, остается открытой.

В связи с чем разработка технологических мероприятий по обеспечению стабильности значений ударной вязкости сварных соединений при многодуговой сварке под флюсом труб является актуальной.

## **Цель работы и основные задачи исследования**

**Цель работы** - обеспечение стабильных значений ударной вязкости сварных соединений продольных стыков труб для магистральных газопроводов при многодуговой автоматической сварке под флюсом

Для реализации указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести экспериментальную оценку параметров термических циклов процесса многодуговой сваркой под флюсом труб высокого давления;
- изучить влияние многодуговой сваркой под флюсом на изменение ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния исследуемых сталей;
- выполнить анализ особенностей кинетики распада аустенита при многодуговой сварке под флюсом труб высокого давления;
- исследовать влияние морфологии структуры на снижение ударной вязкости металла около шовного участка зоны термического влияния;
- обосновать параметры термического цикла сварки, обеспечивающие стабильное значение ударной вязкости сварного соединения и условия их реализации;
- разработать технологические мероприятия по обеспечению требуемых значений ударной вязкости сварных соединений при многодуговой сварке под флюсом продольных заводских стыков труб.

## **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты экспериментальной оценки параметров термических циклов процесса многодуговой сваркой под флюсом труб высокого давления
2. Особенности кинетики распада аустенита при многодуговой сварке под флюсом высокого давления
3. Результаты оценки влияния морфологии структуры металла околошовного участка зоны термического влияния на снижение ударной вязкости сварных соединений.
4. Обоснование значений параметров термических циклов сварки и технологических мероприятий, обеспечивающих требуемые показатели ударной вязкости сварных соединений при многодуговой сварке под флюсом продольных стыков труб.

## **Научная новизна**

1. Выявлены особенности кинетики фазовых превращений аустенита в металле околошовного участка зоны термического влияния при энергоемкой многодуговой трехпроходной сварке под флюсом, которые выражаются в снижении устойчивости аустенита при повторном (после сварки внутреннего шва) сварочном нагреве, смещении всех областей распада на термокинетических диаграммах к более высоким температурам и большим скоростям охлаждения. Содержание ферритной фазы увеличивается в 1,5 раза по сравнению с однократным сварочным нагревом.
2. Установлено, что основной причиной низкой ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния при многодуговой сварке под флюсом наряду с ростом зерна аустенита является выделение

карбидных фаз по границам аустенитных зерен вследствие более высоких скоростей диффузии легирующих элементов по границам зерен.

3. Обоснован и экспериментально подтвержден режим дополнительного полесварочного нагрева и охлаждения ( $T_{\max}$ -950-1050 °С,  $W_{8-5}$ -2-5 °С), обеспечивающий подавление выделений высокоуглеродистых карбидных фаз по границам аустенитных зерен и образование в ферритных зернах карбонитридов ниобия, гарантирующий стабильность высоких значений ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния.

#### **Практическая значимость работы.**

Предложены технологические мероприятия, позволяющие в процессе высокопроизводительной многодуговой сварке под флюсом продольных стыков труб продольных стыков труб, обеспечивать стабильность требуемых значений ударной вязкости сварных соединений.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением апробированных методик экспериментальных исследований. Использованием современного, сертифицированного и аттестованного оборудования, программных пакетов обработки данных, а также большим объемом выполненных экспериментов.

**Апробация работы.** Результаты работы доложены и обсуждены на научном семинаре кафедры Сварки и диагностики МГТУ имени Н.Э. Баумана, (Москва, 2019), VII международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (поселок Развилка, Московская обл., 2017), научно-технической конференции «Лазерные технологии сварки труб и трубных деталей» (Москва, 2018), IX отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром» (поселок Развилка, Московская обл. 2018), VIII международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (поселок Развилка, Московская обл. 2019).

**Личный вклад автора.** Автор выполнил цикл лабораторных исследований, обработал и проанализировал результаты и сделал выводы, подтверждающие достижение цели исследований.

Результаты работы автором опубликованы и внедрены при создании конструкции индуктора и разработке технологии дополнительного послесварочного нагрева сварного шва с целью получения стабильно высоких значений ударной вязкости металла сварного соединения.

Авторам по результатам работы подготовлены и сделаны доклады на научных конференциях.

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 научных работах общим объемом 2,78 п.л., из них 4 работы опубликованы в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS, в том числе входящих в перечень ВАК РФ.

**Объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе и списка литературы из 96 наименований. Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертации.

В **первой главе** приведены результаты анализа литературных источников посвященных особенностям производства труб высокого давления для магистральных газопроводов; реакции малоуглеродистых высокопрочных сталей на термический цикл сварки, влияния структурно-фазового состава на механические свойства сварных соединений. Приведены требования основных нормативных документов к механическим свойствам сварных соединений труб из высокопрочных сталей.

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

**Вторая глава** работы посвящена экспериментальной оценке параметров термических циклов при многодуговой сварке под флюсом продольных стыков труб.

продольных швов труб. Для записи термических циклов сварки использовались пластины размером 1200x300x25,8 мм. установленные с помощью специального приспособления под агрегатом сварки наружного шва трубоэлектросварочного стана; хромель-алюмелевые термопары, размещенные в предварительно просверленных на определенном расстоянии от стыка отверстиях, и аналоговый-цифровой преобразователь «Мемограф М» (Рисунок 1).

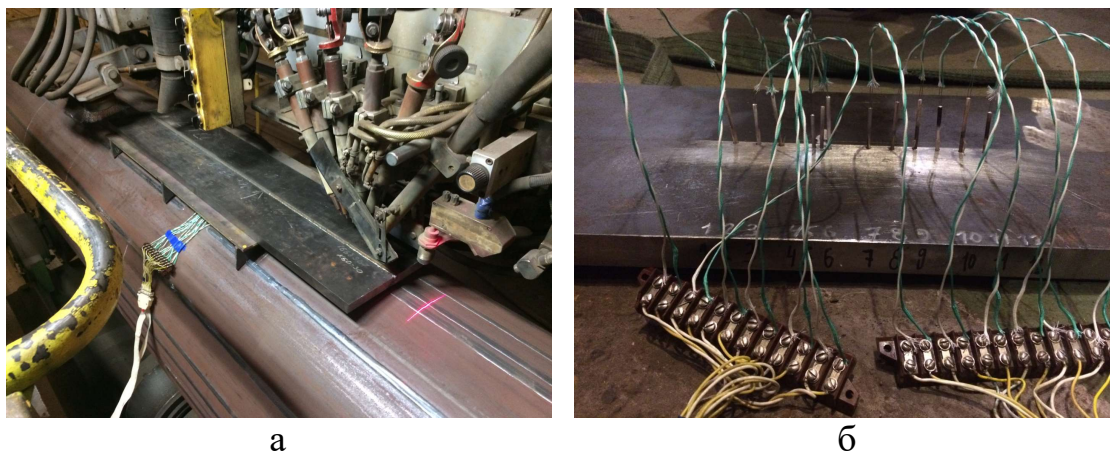


Рисунок 1. Трубоэлектросварочный стан наружного шва (а) и пластина с термопарами для исследования температурно-временных параметров сварочного цикла, установленные в области расчетной зоны термического влияния (б)

Определено, что наиболее вероятный интервал скоростей охлаждения металла зоны термического влияния труб с толщиной стенки 25,4 – 33,4 мм составляет от 2,3 до 5,5 °C/с. Сопоставление термических циклов многодуговой сварки под флюсом продольных стыков труб с аналогичными показателями способов автоматической многослойной сварки показало их существенную разницу. В частности при многодуговой сварке под флюсом труб высокого давления скорость охлаждения металла сварного соединения на порядок ниже.

Это безусловно отражается на процессах структурообразования и изменения механических свойств сварных соединений, особенно ударной вязкости.

**В третьей главе приведены результаты исследования влияния многодуговой сварки под флюсом на ударную вязкость металла околошовного участка зоны термического влияния.**

В реальных сварных соединениях металл околошовного участка зоны термического влияния имеет относительно малые размеры. Вследствие чего оценка ударной вязкости металла этого участка и его роли в интегральном показателе вязкости затруднена. В тоже время для решения задачи обеспечения требуемых показателей ударной вязкости сварных соединений крайне важно иметь информацию о микроструктуре и механических свойствах непосредственно металла околошовного участка зоны термического влияния.

С этой точки зрения наиболее корректными являются исследования с использованием методов физического моделирования структурных превращений при сварке. Для этих целей в работе использовалась технология имитации термических циклов сварки на установке токов высокой частоты. Из стали каждой композиции легирования были подготовлены по две серии образцов, на которых реализовывались режимы нагрева и охлаждения зоны металла, претерпевающей воздействие обоих сварочных проходов. В связи с чем часть образцов подвергалась однократному нагреву в индукторе установки ТВЧ до температуры 1350 °С, другая партия двукратному до той же температуры. За счет погружения торцов образцов в воду на различную глубину в их центральной части был реализован диапазон скоростей охлаждения металла от 2 °С/с до 20 °С/с.

Анализ результатов испытаний ударных образцов (Таблица 1) показал, что при столь высоком тепловложении значения ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния, при температуре минус 40 °С, находятся ниже нормативных требований как при однократном, так и при двукратном нагреве.

Таблица 1.

Значения ударной вязкости околошовного участка зоны термического влияния исследованных сталей после имитации одно- и двухпроходной сварки

06Г2БМ		07Г2БФ		05Г2Б	
Однократный нагрев					
$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$	$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$	$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$
$w_1=2$	7,6	$w_1=2$	15,2	$w_1=2$	6,9
$w_1=5$	8,2	$w_1=10$	8,6	$w_1=5$	28,0
$w_1=10$	7,5	$w_1=20$	23,6	$w_1=10$	35,6
$w_1=20$	15,8			$w_1=20$	26,3
Двукратный нагрев					
$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$	$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$	$w_{8-5},\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Среднее значение $KCV^{-40},\text{ Дж}/\text{см}^2$
$w_1=2$	13,5	$w_1=2$	8,8	$w_1=2$	14,3
$w_1=2$		$w_1=2$		$w_1=2$	
$w_1=20$	10,8	$w_1=20$	6,8	$w_1=20$	21,7
$w_1=20$		$w_1=20$		$w_1=20$	

На Рисунке 2 представлены результаты испытаний на ударный изгиб металла околошовного участка зоны термического влияния в диапазоне температур от плюс 20 °С до минус 40 °С. Рассмотрены варианты формирования в металле околошовного участка зоны термического влияния ферритно-бейнитной микроструктуры ( $w_{8-5}=5$  °С/с).

Анализ приведенных данных показал, что при температуре испытания плюс 20 °С ударная вязкость околошовного участка зоны термического влияния всех исследованных сталей отвечает требованиям нормативной документации (63 Дж/см<sup>2</sup>). С понижением температуры до 0 °С и ниже в околошовном участке зоны термического влияния сталей 06Г2БМ и 07Г2БФ наблюдается существенный разброс значений ударной вязкости, появляются показатели, не отвечающие минимально допустимым требованиям.

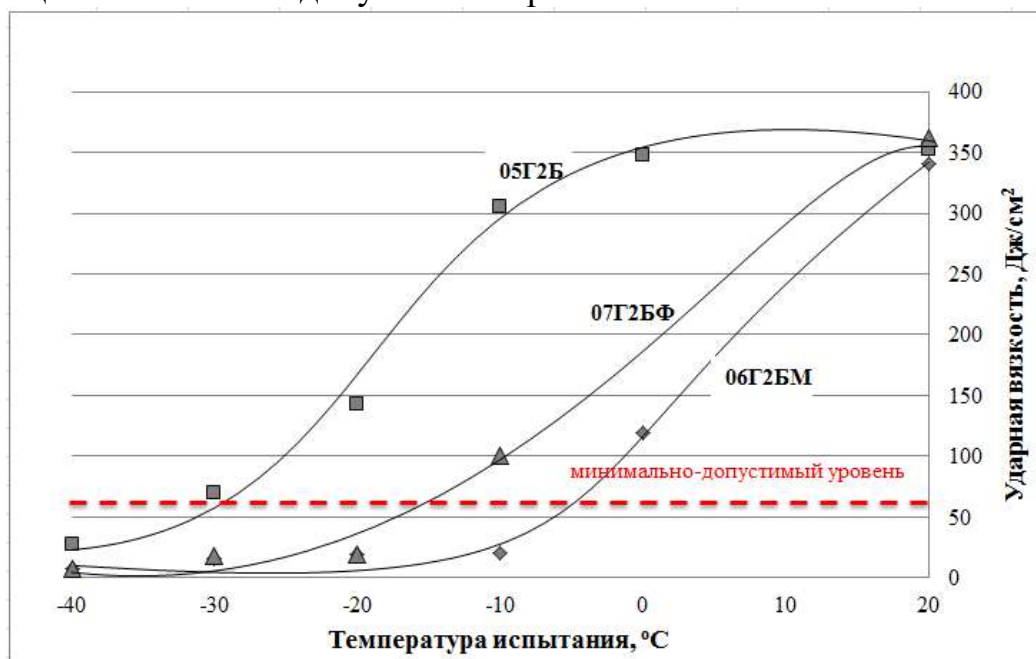


Рисунок 2. Изменение ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния в зависимости от температуры испытания ( $W_{8-5} - 5$  °С/с) и фрактограммы поверхности излома,  $w_{8-5} - 20$  °С/с

Металл околошовного участка зоны термического влияния, соответствующий скоростям охлаждения при имитации термических циклов сварки (сталь марки 05Г2Б), показал высокие значения ударной вязкости в исследованном диапазоне температур испытаний от плюс 20°С до минус 30 °С. При температуре испытания минус 40 °С значения  $KCV^{-40}$  околошовного участка зоны термического влияния данной стали также ниже принятых требований.

Известно, что к основным факторам, влияющим на сопротивление разрушению относятся: диаметр зерна аустенита, структурно-фазовый состав и морфология его составляющих. Определение размера зерна аустенита металла околошовного участка зоны термического влияния исследованных сталей показало, что в среднем он составляет 70-80 мкм, но обнаруживаются зерна, выросшие до 95-100 мкм.



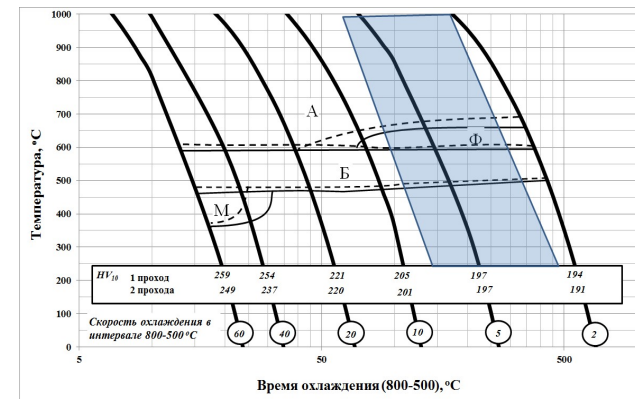
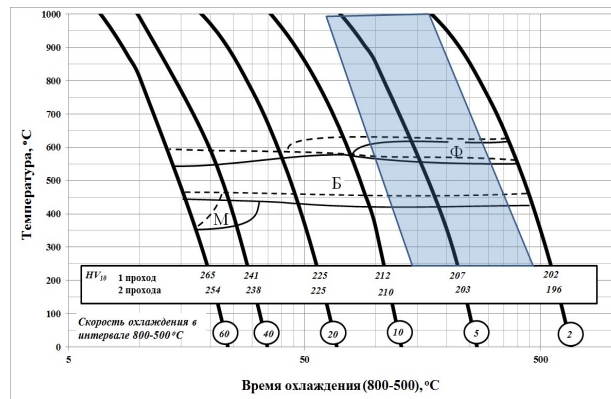
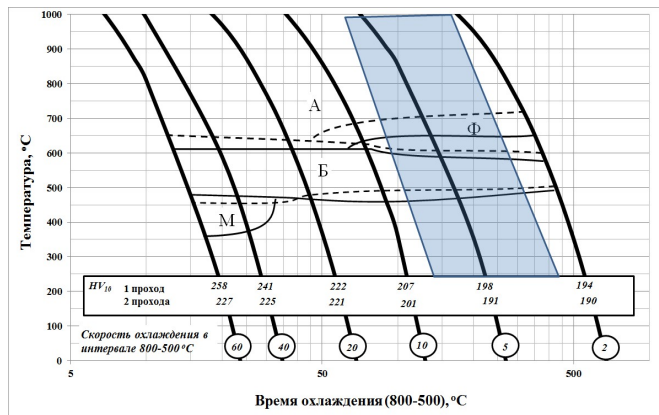
Следует обратить внимание на то, что при тепловложении, характерном для процесса многодуговой сварки под флюсом, изменение скорости охлаждения, в исследуемом диапазоне значений, не позволило снизить его негативное влияние на ударную вязкость металла околошовного участка зоны термического влияния. Анализ поверхности разрушения ударных образцов свидетельствует о хрупком микромеханизме их разрушения.

**В четвертой главе** на основе изучения особенностей распада аустенита металла околошовного участка зоны термического влияния при многодуговой сварке под флюсом труб было исследовано влияние процессов структурообразования на снижение сопротивления хрупкому разрушению. При этом учитывались процессы, протекающие как при однократном, так и при двукратном нагреве и охлаждении металла. Это позволило имитировать специфику воздействия на металл околошовного участка зоны термического влияния термических циклов многодуговой сварки под флюсом.

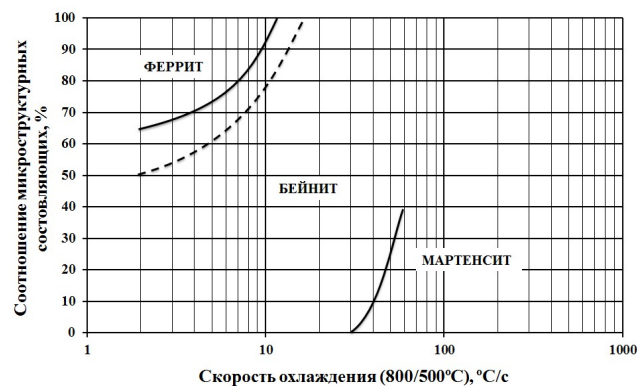
Анализ термокинетических и структурных диаграмм показал (рисунок 3), что во всем диапазоне скоростей охлаждения при многодуговой сварке под флюсом наблюдается устойчивый распад аустенита исследованных сталей в бейнитной области. Для диапазона скоростей охлаждения ( $2-5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), соответствующего технической возможности его реализации в условиях традиционного способа сварки продольных стыков труб (заштрихованная область диаграмм Рисунок 3), формируется ферритно-бейнитная микроструктура. При выполнении первого прохода содержание ферритной фазы в структуре околошовного участка зоны термического влияния составляет около 25-35 %.

После повторного нагрева происходит понижение устойчивости аустенита, смещение всех областей распада на термокинетических диаграммах к более высоким температурам и большим скоростям охлаждения. Содержание ферритной фазы увеличивается в 1,5 раза по сравнению с однократным сварочным нагревом. Ферритно-карбидная смесь имеет близкое морфологическое строение. При реализации термических циклов в околошовном участке зоны термического влияния формируется бейнит, характеризующийся пакетной морфологией, представляющей структуру, состоящую из параллельно расположенных реек и небольшого количества глобулярного бейнита. Отличительной особенностью является наличие в структуре большого количества выделений высокоуглеродистых фаз (МАК), что может способствовать снижению ударной вязкости металла.

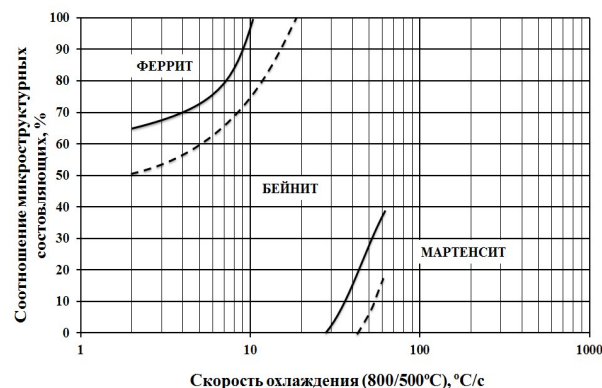
В связи с чем была поставлена задача исследования морфологического строения структуры металла околошовного участка зоны термического влияния.



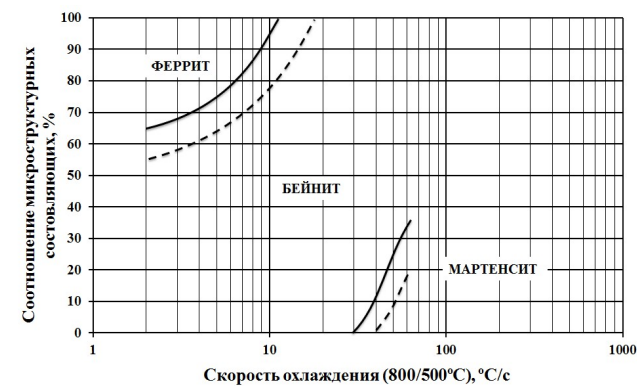
а



05Г2Б



б  
06Г2БМ



07Г2БФ

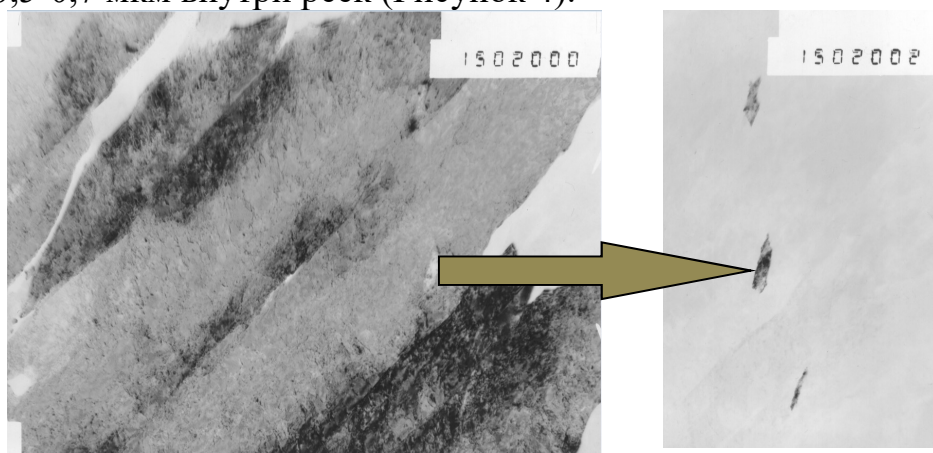
Рисунок 3. Термокинетические (а) и структурные (б) диаграммы превращения переохлажденного аустенита в металле околошовного участка зоны термического влияния сталей различных композиций легирования:

— при выполнении одного прохода  
 --- при выполнении двух проходов

**Пятая глава** содержит результаты оценки влияния морфологии структуры металла околошовного участка зоны термического влияния на снижение ударной вязкости. На образцах из стали 06Г2БМ предварительно имитировался термический цикл околошовного участка зоны термического влияния при многодуговой сварке под флюсом ( $T_{max}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w_{8-5}=5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ ).

Анализ результатов, проведенных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показал, что структура металла околошовного участка зоны термического влияния весьма гетерогенна. При  $w_{8-5}=5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$  она состоит из малодислокационного обедненного углеродом феррита с размером зерна около 2 мкм, и ферритно-карбидной смеси разного морфологического строения (перлита и бейнита).

Реечный бейнитный феррит (РБФ) состоит из преимущественно нижнего типа бейнита, что подтверждается скоплением цементитных выделений размером 0,5-0,7 мкм внутри реек (Рисунок 4).



Темнопольное изображение,  $\times 15000$

Рисунок 4. Цементитные выделения внутри реек

В структуре РБФ также наблюдаются фрагменты мартенсита и остаточного аустенита размером 3-5 мкм (Рисунок 5, а, б). Размер остаточного аустенита составляет 1-1,5 мкм.

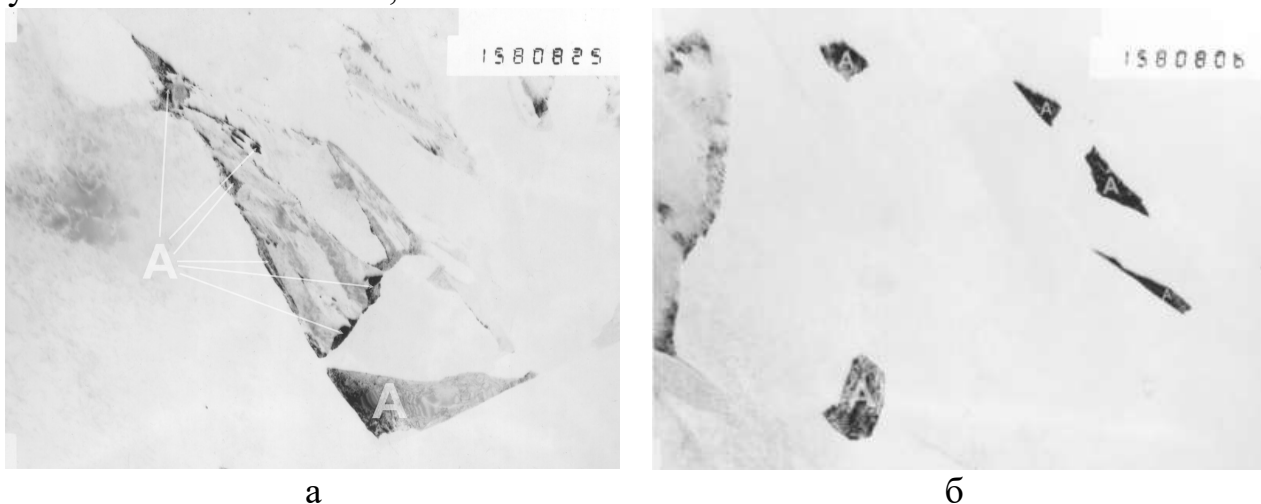


Рисунок 5. МА-фазы (а) и остаточный аустенит (б) в металле околошовного участка зоны термического влияния

Также выявляются участки с цементитными выделениями (рисунок 5, а) неправильной формы и отсутствием четкого чередования пластин цементита и феррита, морфология которых соответствует вырожденному перлиту (Рисунок 6, б). Строение матрицы образцов охлажденных с  $w_{8-5} -20$  °C/с не имеет существенного отличия от строения матрицы образцов, охлажденных со скоростью 5 °C/с. Следует отметить, что в обоих случаях наблюдаются значительные загрязнения границ зерен.

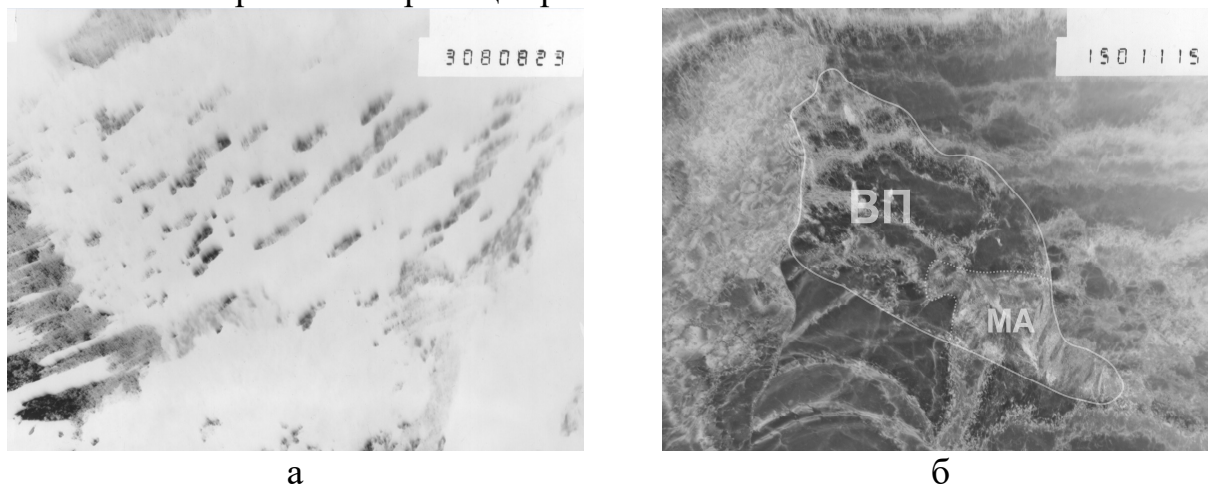


Рисунок 6. Строение матрицы (а) металла околошовного участка зоны термического влияния с участком вырожденного перлита (б)

Энергодисперсионный анализ содержания высокоуглеродистых включений на границах аустенитных зерен металла околошовного участка зоны термического влияния (рисунок 7) показал, что содержание углерода на границе, в основном, превышает его концентрацию в теле зерна. При этом содержание углерода в различных участках границ отличается в 1,5-2 раза (Таблица 2).

Следует отметить, что выявленное большое количество высокоуглеродистых фаз по границам аустенитных зерен, в сочетании с их большим размером являются причиной снижения ударной вязкости сварных соединений.

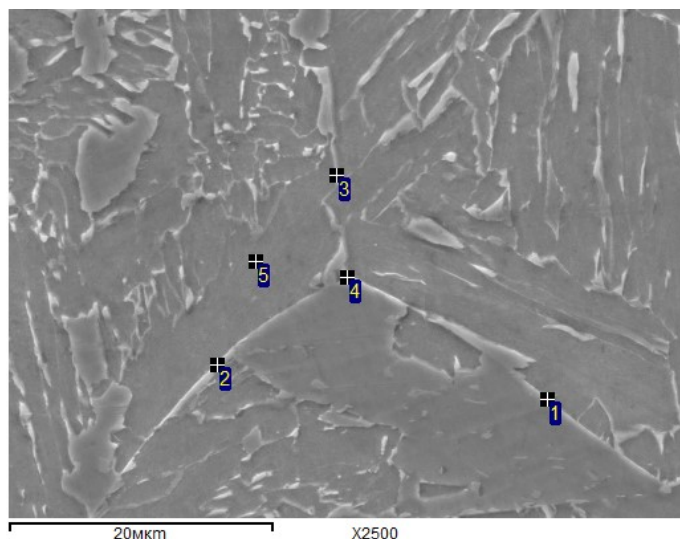


Рисунок 7. Расположение анализируемых точек в образце

Таблица 2.

Химический состав металла околошовного участка зоны термического влияния в исследованных точках

Спектр	C	Si	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Итог
1	5.85	0.25	0.00	1.78	91.83	0.11	0.19	0.00	100.00
2	1.91	0.32	0.05	1.89	95.42	0.21	0.21	0.00	100.00
3	1.89	0.36	0.00	1.92	95.46	0.20	0.17	0.00	100.00
4	3.17	0.28	0.00	1.89	94.20	0.24	0.22	0.00	100.00
5	1.42	0.29	0.00	1.84	96.17	0.12	0.15	0.00	100.00

**Шестая глава** посвящена разработке технологических мероприятий, направленных на повышение ударной вязкости металла сварного соединения труб при многодуговой сварке под флюсом.

Поскольку при традиционной технологии производства труб, особенно повышенных толщин, методы технологического регулирования ТЦС весьма ограничены. Было предложено изменить конфигурацию ТЦ результирующего прохода за счет дополнительного воздействия на сварной шов и зону термического влияния самостоятельного источника энергии.

Параметры дополнительного термического цикла должны позволить провести обработку металла шва и зоны термического влияния в интервале температур полной перекристаллизации (Рисунок 8).



Рисунок 8. Предлагаемая конфигурация ТЦ результирующего прохода

Это определяет минимальное значение температуры нагрева. Максимальное значение этого параметра не должно превышать температуру интенсивного роста зерна аустенита ( $T_{\text{нир}}$ ). Его выбор осуществлялся по результатам исследования кинетики роста зерна. Выбор значений скоростей охлаждения проводился с учетом особенности распада аустенита металла околошовного участка зоны термического влияния в условиях воздействия дополнительного цикла.

По результатам исследований диапазон значений максимальных температур нагрева составил 950-1050 °C, скорость охлаждения 2-5 °C/с. При этом диаметр действительного зерна аустенита уменьшился в 3-4 раза (до 20 мкм). В зоне термического влияния сформировалась структура, состоящая из полиэдрического феррита с размером зерна 8-10 мкм и ферритно-карбидной



смеси различной морфологии (вырожденный перлит и бейнит преимущественно верхнего типа).

Структурные составляющие, обогащенные углеродом, представлены «островками» МА-фаз, карбидами и карбонитридами, в основном, ниобия, которые располагаются преимущественно по телу зерна, оставляя чистыми их границы (Рисунок 9, 10).

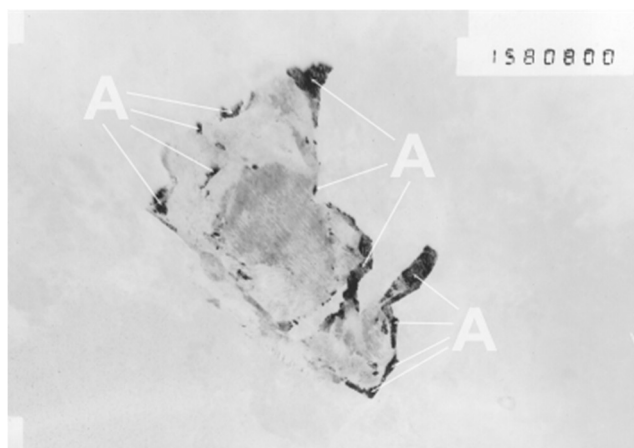


Рисунок 9. МА фаза

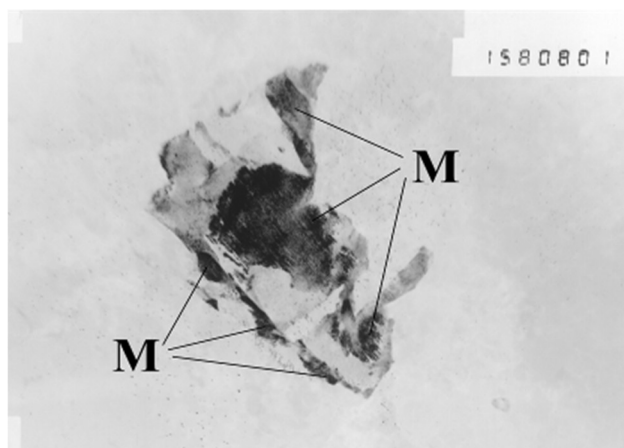


Рисунок 10. Карбонитриды (карбиды)  
в теле зерна

Была проведена экспериментальная оценка влияния предложенного технологического решения на изменение ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния. Для этого на серии ударных образцов с помощью установки ТВЧ воспроизводились термические циклы, соответствующие непосредственно условиям сварки продольных стыков с учетом предлагаемого изменения в технологии.

При этом металл образцов испытывал тройной нагрев. Два раза до температуры 1350 °С и один раз до 950-980 °С. Охлаждение образцов проводилось на воздухе со скоростью порядка 2-5 °С/с во всех случаях.

Представленные в Таблице 3 значения ударной вязкости образцов, подвергнутых указанному воздействию, свидетельствуют, что металл околошовного участка зоны термического влияния, в этом случае, имеет высокие значения ударной вязкости вплоть до температуры испытания минус 40 °С.

Таблица 3.

Значения ударной вязкости металла околошовного участка зоны термического влияния после двух проходов и дополнительного термического цикла

Сталь 07Г2БМ	
Скорость охлаждения, °C/с	KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
Внутреннего шва $w_1=5$ Наружного шва $w_2=5$ Третий термический цикл $w_3=2$	149-370
Сталь 06Г2БМ	
Внутреннего шва $w_1=5$ Наружного шва $w_2=5$ Третий термический цикл $w_3=2$	97-290
Сталь 05Г2Б	
Внутреннего шва $w_1=5$ Наружного шва $w_2=5$ Третий термический цикл $w_3=2$	305,7-319,4

Данные, полученные имитационным путем, были подтверждены при исследовании реальных сварных соединений после реализации на них предложенного термического цикла (Таблица 4). Во всех случаях значения ударной вязкости металла шва и зоны термического влияния, при температуре испытания минус 40 °C, были значительно выше нормативных требований.

Таблица 4.

Значения ударной вязкости металла шва и околошовного участка зоны термического влияния сварного соединения при температуре испытания минус 40 °C

Место нанесения надреза	KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	
	До дополнительного ТЦ	После дополнительного ТЦ
шов	206,8-286,0	189,1-256,0
околошовный участок зоны термического влияния	29,6-212,3	117,6-236,0

Таким образом, показана возможность обеспечения нормативных показателей ударной вязкости сварных соединений продольных стыков труб высокого давления за счет предложенного регулирования термического цикла традиционного процесса многодуговой сварки под флюсом.

Для реализации предлагаемого способа регулирования термического цикла сварки продольного стыка труб предлагается использование индукционного источника нагрева с применением установки ТВЧ.

Предложена схема узла нагрева установки (Рисунок 11) и выполнен расчет его мощности.

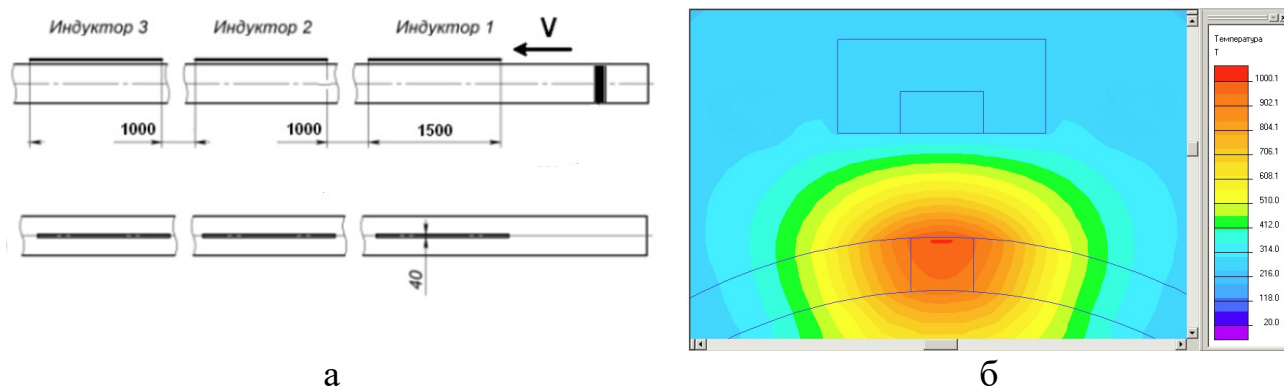


Рисунок 11. Схема индуктора (а) и распределение теплового поля в поперечном сечении сварного соединения (б)

Узел состоит из трех последовательно расположенных неподвижных индукторов длиной по 1500 мм. Каждый из индукторов подключен к своему собственному источнику питания. Сварное соединение нагревается при движении трубы под индукторами вдоль продольной оси. Скорость движения трубы соответствует скорости сварки продольного шва.

Первый индуктор обеспечивает нагрев наружной поверхности от 500 до 980 °С. Электрическая мощность, подводимая к индуктору, составляет около 200 кВт.

Задача второго индуктора – поддержание температуры наружной поверхности на уровне, не превышающем 1050 °С, и повышение до необходимого значения температуры сварного соединения на внутренней поверхности стенки трубы. Второй индуктор необходимо располагать сразу за первым. На выходе из второго индуктора температура внутренней поверхности стенки трубы составляет около 900-920 °С.

Третий индуктор располагается на расстоянии 1000 мм от второго, пауза составит 40 секунд (время прохождения расстояния 1000 мм со скоростью 25 мм/с). Данный технологический прием служит для выравнивания температур между наружной и внутренней сторонами шва за счет теплопроводности. Средняя скорость охлаждения на воздухе за это время составит около 5 °С/с. Задача третьего индуктора – максимально снизить градиент температур по сечению. На выходе температура внутри составит 980...1000 °С.

Системы рассчитываются, а затем настраиваются с привязкой к конкретному объекту нагрева.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Экспериментальная оценка термических циклов многодуговой сварки продольных стыков труб с толщиной стенки от 25,8 до 33,4 мм показала, что скорости охлаждения металла зоны термического влияния изменяются в пределах от 2,3-5,5 °С/с.

2. Исследование влияния изменения скоростей охлаждения в диапазоне от 2 °С/с до 20 °С/с на ударную вязкость металла околошовного участка зоны



термического влияния при многодуговой сварке под флюсом показала, что для всех исследованных марок сталей значение ударной вязкости ( $KCV^{40}$ ) не удовлетворяет нормативным требованиям, как при одно, так и при двухпроходной сварке, даже при формировании преимущественно бейнитной структуры.

3. Изучение кинетики превращения аустенита при имитации одно и двухпроходной сварки показало, что распад аустенита металла околошовного участка зоны термического влияния исследованных сталей происходит преимущественно в бейнитной области в обоих случаях. Ферритное превращение наблюдается в узком интервале температур и скоростей охлаждения. Появление мартенсита в структуре металла околошовного участка зоны термического влияния при скоростях охлаждения более  $35^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Повторный нагрев металла околошовного участка зоны термического влияния способствует снижению устойчивости аустенита. Это выражается в смещении всех областей распада на термокинетической диаграмме к более высоким температурам и большим скоростям охлаждения. Области выделения ферритной фазы расширяются, его количество в структуре металла околошовного участка зоны термического влияния увеличивается. Возрастают значения скоростей охлаждения формирования мартенситной фазы. Исследованные стали имеют близкую устойчивость аустенита к распаду.

4. Методами оптической и электронной микроскопии показано наличие в структуре металла околошовного участка зоны термического влияния значительного количества высокоуглеродистых фаз (МАК), выделяющихся как по границам зерен, так и внутри составляющих структуры. Они, наряду с большим размером аустенитных зерен, являются причиной падения ударной вязкости.

5. Показано, что для повышения ударной вязкости сварных соединений, выполненных многодуговой сваркой под флюсом, целесообразно изменить термический цикл результирующего прохода и обеспечить дополнительную обработку металла шва и зоны термического влияния в интервале температур полной перекристаллизации. Определен режим дополнительного нагрева и охлаждения ( $T_{\text{max}} - 950-1050^\circ\text{C}$ ,  $w_{8-5} - 2-5^\circ\text{C}/\text{с}$ ), обеспечивающий уменьшение диаметра зерна аустенита в 4-5 раз (с 80-100 мкм до 20 мкм), подавление высокоуглеродистых карбидных фаз по границам зерен и как следствие повышение ударной вязкости;

Полученные данные подтверждены результатами испытаний на ударный изгиб реальных сварных соединений продольных стыков труб.

6. Предложена схема узла нагрева установки токов высокой частоты и выполнен расчет его мощности.

#### Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Влияние содержания углерода на механические свойства основного металла проката и околошовной зоны ниобийсодержащих сталей класса

прочности К65 / С. П. Севастьянов [и др.] // Сварочное производство. 2017. № 9. С. 3-7 (0,58 п.л./0,25 п.л.).

2. Влияние термической обработки на ударную вязкость металла сварных соединений труб, выполненных многодуговой автоматической сваркой под флюсом / Севастьянов С.П. [и др.] // Metallurg. 2018. № 3. С. 59-63 (0,58 п.л./0,2 п.л.).

3. Расчетно-экспериментальный анализ параметров термических циклов способов ремонта кольцевых стыков газопроводов / Севастьянов С.П. [и др.] // Сварочное производство. 2019. №11. С. 9-15 (0,81 п.л./0,3 п.л.).

4. Оценка структуры и свойств ремонтных сварных соединений газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости / Севастьянов С. П. [и др.] // Сварочное производство. 2019. №12. С. 40-46 (0,81 п.л./0,3 п.л.).