

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет»

На правах рукописи

Маниленко Игорь Владимирович

**Исследование влияние контролируемого объемного нагрева и  
охлаждения на структуру и свойства формируемого при этом  
сварного соединения**

Направление подготовки  
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Воропаева Любовь Сергеевна
<b>Проверено</b>
18.10.2018 Зачтено Библиотека

2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Бахматов Павел Вячеславович.

Рецензент: кандидат технических наук, инженер ЛЭС  
Амурского ЛПУМГ ООО «ГАЗПРОМ  
ТРАНСГАЗТОМСК»  
Череповский Павел Викторович.

Защита состоится «28» июня 2018г. в 14 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, , ауд. 221/2.

Автореферат разослан 18.06.2018г.

Секретарь ГЭК  
кандидат технических наук, доцент

А.В. Свиридов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В современном судостроении сварка под слоем флюса является традиционным способом соединения корпусных элементов, как плоских, так и криволинейных, листовых и профильного проката. Этот метод выбран по причине хорошей автоматизации процесса, возможности сварки больших толщин (до 20мм) за один проход, а также из-за высокого КПД (0.8-0.95%). В России разработан стандарт ГОСТ 8713-80, определяющий типы и размеры сварных соединений, выполняемых сваркой под слоем флюса, как механизированной, так и автоматической. При всем многообразии стыковых сварных соединений в судостроительной практике для сварки листов, применяется соединение С7 без разделки кромок, с двухсторонним швом. Для осуществления такого соединения необходимы операции раскрепления, кантовки, закрепления, зачистки, ориентации сварочной головки по стыку, и дополнительного прохода, увеличивающие общее время сборочно-сварочных работ. Но этот метод предпочтителен по ряду причин: при сварке в соединение (проход) вкладывается меньше энергии, а второй валик является отжигающим для первого, то есть снимающий напряжение за счет теплового воздействия и эффекта самоотпуска. Таким образом, в сварном соединении наблюдаемая деформация значительно меньше, чем в соединении, выполненном этим же способом, но с формированием валика шва за один проход.

Разработке технологии, сварочного оборудования и материалов для сварки под слоем флюса посвящено значительное количество работ отечественных (Акулов А.И., Ерохин А.А., Бельчук Г.М., Веселков В.Д., Чернышев Г.Г.), украинских (Патон О.Е., Богдановский В.А., Галинич В.И., Колисник В.Н.) а также и зарубежных авторов (К. Тераи, М. Арикава, Р.Кейси, Л. Корнелл, М.Бредстрит, У.Чадбэнд, С.Уайли и др).

Переход на однопроходную одностороннюю сварку выгоден экономически, но технологически сложен в выполнении. Для его реализации необходимы формирующие устройства, удерживающие расплавленный металл сварочной ванны в корне шва от растекания и позволяющие организовать его форму, в соответствии с ГОСТ. Такими устройствами являются медный ползун, флюсо-медная подкладка, флюсовая подушка, остающаяся стальная подкладка и набирающая популярность керамическая подкладка. Тем не менее, погонная энергия, необходимая для расплавления основного и присадочного металла, вкладываемая на ограниченном участке соединения, вызывает значительные внутренние напряжения, обусловленные усадкой большого объема металла шва и основного металла, перегретого до полиморфных температур. Причем усадка происходит как в продольном, так и в поперечном направлении шва и тем больше, чем больше протяженность сварного шва. В этом случае деформации сварного соединения весьма значительны и для их исправления необходима правка и рихтовка с локальным подогревом. В судостроении объемная термообработка не применима из-за габаритности конструкций.

Поэтому повышение эффективности и производительности сварки под флюсом с обеспечением высокого качества и геометрической точности свариваемых конструкций является актуальной задачей для сварочного производства в судостроении.

Цель работы - исследование влияния контролируемого объемного нагрева и охлаждения на структуру и свойства формируемого при этом сварного соединения.

Для реализации цели работы поставлены следующие задачи:

- теоретически и экспериментально исследовать фактические причины образования сварочных напряжений и найти решение по их минимизации и/или устранению;

- исследование и оптимизация режимов сварки и их влияние на деформацию: при двухстороннем формировании шва без разделки кромок; при сварке односторонних однопроходных швов на керамических подкладках, при сварке односторонних однопроходных сварных соединений на керамических подкладках с возможностью предварительного нагрева;

- исследование структуры и свойств (деформаций и прочностных характеристик) сварных соединений полученных в ходе исследований и сравнение полученных результатов;

**Научная новизна:** обобщенный анализ механических свойств, построение диаграмм при односторонней однопроходной сварке на керамических подкладках без подогрева, односторонней однопроходной сварке на керамических подкладках с подогревом, двусторонней сварки без разделки кромок и построение изотерм основного и присадочного материала, для установления механизма образования остаточных напряжений при сварке основных соединений;

установленная закономерность изменения структуры и свойств сварных соединений при использовании контролируемого подогрева и охлаждения.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов и выводов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно–измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико–механических свойств и макро– и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям механики деформируемого твердого тела и теплофизики.

**Практическая значимость:** проведено сравнение между разработанной технологией и традиционным двусторонним способом сварки. Это доказывает значимость разработанной технологии которая позволяет снизить остаточные напряжения, улучшает структуру сварных соединений (физико-механических свойств соединений); выявлена возможность увеличения качества сварного соединения, снижения мощности сварки, сварки без разделки кромок стыковых соединений большей толщины, исключение брака и повышение надежности изделий в период эксплуатации.

**Личный вклад автора.** Автор провел опробование технологий; произвел экспериментальные исследования; обработал полученные результаты, а также сформулировал выводы.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– обобщенный анализ динамограмм и изотерм, позволяющий отслеживать напряженное состояние и прогнозировать деформации;

– закономерности изменения структуры и свойств сварного соединения в зависимости от температуры предварительного нагрева и скорости охлаждения;

– технология позволяющая получить более качественное сварное соединение и устраняющая причины деформаций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, предмет и объект исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость, апробация результатов.

В **первой главе** произведен обзор и анализ подходов к вопросу образования деформаций и сварных напряжений, установлены причины возникновения напряжений.

Проблемы при дуговой сварке плавлением включают в себя множество причин образования деформаций. Нет возможности для сварки нагреть равномерно, мгновенно соединяющиеся детали. Дуговая сварка плавлением характерна образованием локальной сварочной ванны при этом она ограничена температурой плавления основного металла. При движении источника тепла, температура от него распределяется по концентрическим линиям (изотермам). Вектор изотермы от сварочной ванны направлен в направлении, обратном движению источника тепла и перпендикулярно оси шва. Таким образом, перед фронтом расплавленной ванны температура незначительно возрастает, поэтому при сварке возникает высокий градиент температур в направлении движения источника тепла.

Дуговая сварка осуществляется под действием тепла от электрической дуги, такой нагрев приводит к мгновенному расплавлению металла. При прекращении действия сварочной дуги, образованная сварочная ванна (объем расплавленного металла) начинает кристаллизоваться с очень большой скоростью. Это происходит из-за отдачи тепла в окружающую среду, оснастку, в переохлажденные детали. Переохлаждение кристаллизующегося металла приводит к образованию закалочных структур. При этом возникают объемные растягивающие напряжения, которые, складываясь с остаточными сварочными напряжениями, приводят к нарушению сплошности металла, т.е. к образованию холодных трещин в шве или около швовой зоне.

В зависимости от скорости охлаждения кристаллизующегося металла сварочной ванны, её структура может варьироваться от феррита-перлитной до мартенситной. Для реальных деталей в сварных соединениях низкоуглеродистых сталей, выполненных дуговой сваркой преобладает бейнитный отпуск

Феррита-перлитные стали как при нагревании до температуры плавления, так и при охлаждении с этой же температуры имеют неравномерный характер коэффициента термического расширения. Т.е. они увеличиваются в объеме не по линейной зависимости. Этот эффект носит название «фазовое превращение», наблюдается в момент перехода структуры феррита-перлитной в аустенит при нагреве, и аустенита в феррита-перлита при охлаждении. При нанесении изотерм характеризующихся температурой начала и температурой конца фазовых превращений на модель сварного соединения (сформированного валика) возможно, определить объем основного металла и металла шва, участвующего в фазовых превращениях. Из наблюдений видно, что объем претерпевающий фазовые превращения основного металла в 4 раза превышает объем основного шва.

Кристаллизация металла шва происходит от линии сплавления к центру, так как основной металл по линии сплавления, имеет меньшую температуру и является центром кристаллизации. Линия сплавления характерна резким переходом от феррита-перлитной структуры в дендроидную, направленную в центр шва и раз ориентированную от исходной, а центр шва по причине охлаждения дендритов и их взаимного прорастание. Таким образом в ходе образования сварного шва происходит

неизбежное формирование структуры неоднородности приводящей к ухудшению механических свойств. Для устранения этого недостатка принято увеличивать площадь поперечного сечения сварного шва усилением и проводить последующую термообработку сварных соединений.

В динамике формирования сварного шва происходит приращение элементарных объёмов металла, сокращающегося в объеме и суммирование величины внутренних напряжений. Вплоть до окончания сварки фазовые превращения идут в замкнутом пространстве основного металла и закристаллизовавшегося сварного шва и связаны с резким уменьшением объема металла, участвующего в фазовом превращении. Также идет постоянный прирост объема металла шва, вовлеченного в фазовые превращения со скоростью, равной скорости сварки, вызывающий сжимающие напряжения по длине сварного шва, что влечет за собой видимые продольные деформации. Этот факт может быть причиной образования продольных и поперечных трещин, деформации станут наблюдаемые.

**Во второй главе** приведена методика экспериментальных исследований. В исследованиях участвуют: традиционная сварка (двухсторонней на весу), сварка односторонняя односторонняя на керамических подкладках без подогрева; сварка на керамических подкладках односторонняя односторонняя с программируемым нагревом соединения (рисунок 1).

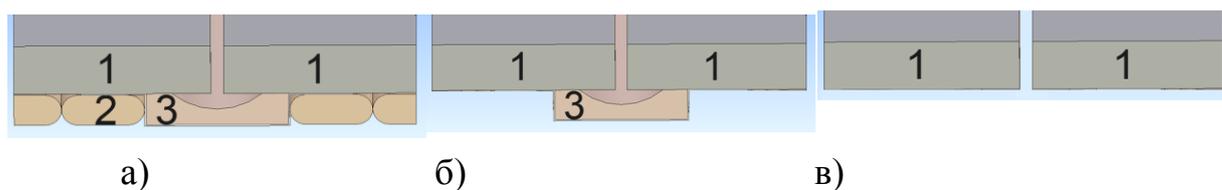


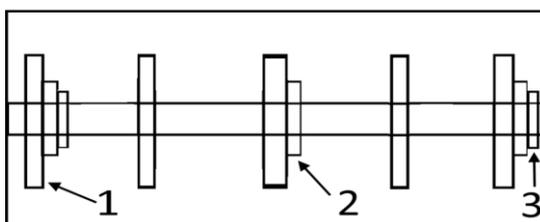
Рисунок 1 – Соединение под сварку:

а – односторонняя сварка с подогревом; б – односторонняя сварка без подогрева; в – двухсторонняя сварка на весу

Образцы имели размер 400x250x5 мм. Соединения собирались на технологических планках с проставлением двух коротких прихваток с обратной стороны шва. Сборка образцов производилась по узлу С4 (на плоских керамических подкладках) и С7 ГОСТ 8713-79. Для сварки использован сварочный автомат, АДФ-1250 и сварочный выпрямитель ВДУ-1250. В ходе опытов получали, прожег или не провар. Отработанные режимы позволили перейти к подготовленным образцам маркировки стали сплава 09Г2С.

Для термообработки использовалась установка для местной термообработки сварных швов мощностью 70 кВт модели РТ70-6. В качестве нагревательных элементов использованы керамические электронагреватели марки КЭН Б-60-21-5 и размерами 525×105. Для фактического измерения температуры с свариваемых деталей использовались термопары типа ХА. Для подключения термоэлектрических преобразователей (термопар) к измерительным приборам использовались компенсационные провода типа ХА.

Для проведения механических испытаний из сварных соединений при помощи гильотинных ножниц вырезаны образцы по схеме, приведенной на рисунке 2.



1 - образцы для испытания на статическое растяжение ; 2 - образец для определения ударной вязкости; 3 - образцы для замеров твердости и изучения микро- и макроструктуры.

Рисунок 2 - Схема мест вырезки образцов

Проведены следующие испытания: испытание на статическое растяжение; испытание на ударную вязкость; испытание на статический изгиб; исследования микро- и макроструктуры.

Испытания на статическое растяжение выполнялись на универсальной электромеханической машине Instron 3382. При испытаниях на ударную вязкость использовался маятниковый копер марки JB-300B. Для измерения твердости использовался твердомер HR-150A.

Для измерения деформаций построена кривая отображающая деформацию образца, на поверхности образца нанесли сетку с размером ячейки 50×50мм. Измерение деформации осуществляли от измерительной базы, располагающейся над образцом параллельно основанию, фиксировались размеры от базы до узлов ячеек. Графические изображения получены в программе Excel.



Рисунок 3 - Схема измерительной системы

Технология сварки узла С4 на керамических подкладках с подогревом. К образцам перед сваркой прикреплялись три термодпары. На стол укладывался слой теплоизоляции. Затем под каждую из свариваемых пластин размещались керамические электронагреватели. Далее каждая из пластин накрывалась слоем теплоизоляции, оставляя зазор для сварного соединения. Затем пластины накрывались последним слоем теплоизоляции.

Производился нагрев пластин по программе, до заданной температуры. После нагрева убирался верхний слой теплоизоляции и производился процесс сварки. После сварки вместе с флюсом образец накрывался теплоизолятором и включалось программируемое охлаждение до заданной температуры.

**В третьей главе** приведены результаты трех сварных соединений участвующих в исследованиях.

*Результаты испытаний узла С7 (двухсторонняя сварка).* Результаты испытаний образцов на ударную вязкость, замеров твердости, испытания на статическое растяжение приведены на рисунке 5.

Результаты измерения деформаций после образования сварных соединений первого и второго проходов представлены на рисунке 4. Как видно по графику деформации после сварки второго прохода деформация не только осталась, но изменила знак на противоположный. Значение максимального прогиба возросло в 2,5 раза.

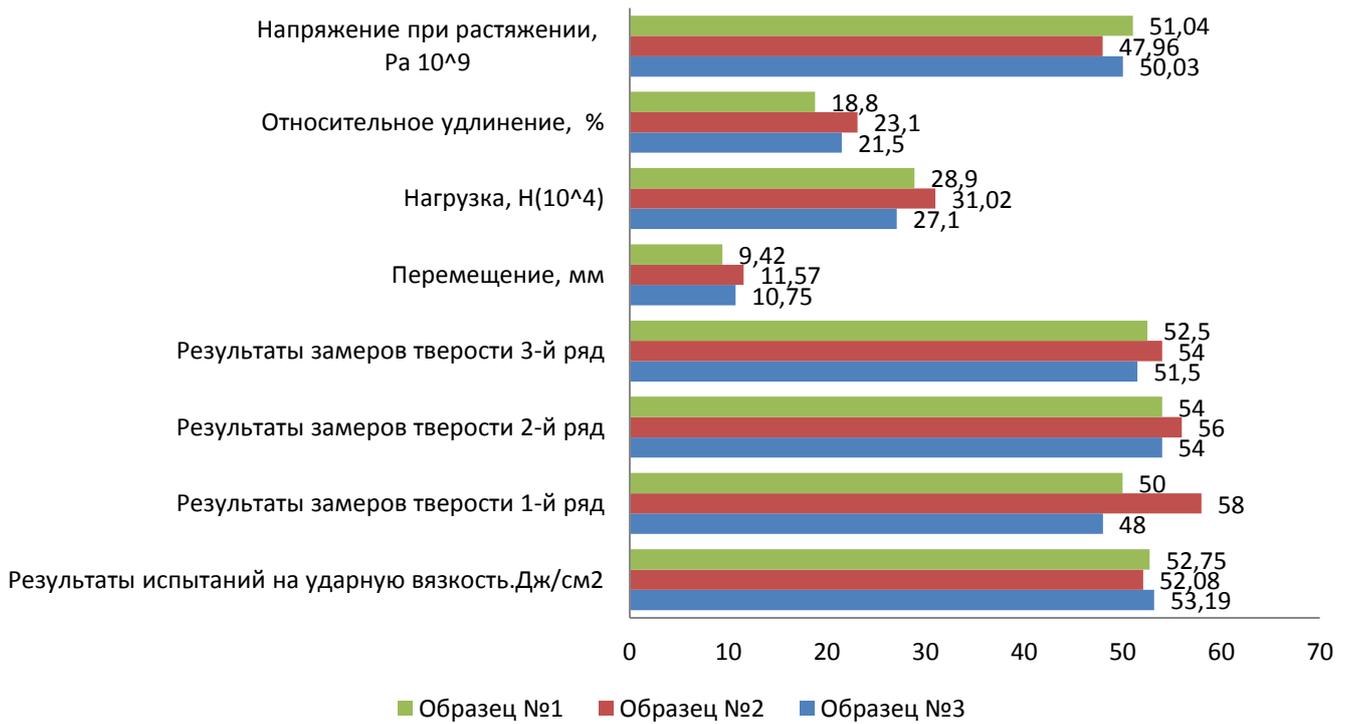


Рисунок 5 – Результаты испытаний образцов

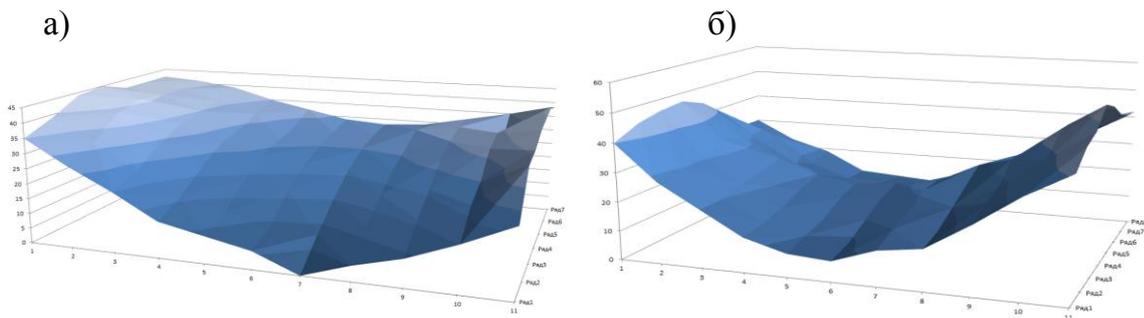


Рисунок 4 - Деформация образца:  
а - после первого; б - второго прохода



Рисунок 6 – Исследование микро структуры  
Карта образца №1

При анализе изображений микроструктуры выявлено, что второй валик является отжигающим для первого, при наложении второго валика происходит полная рекристаллизация первого валика, измельчение и уменьшение зерна до размеров зерна основного металла.

Механические свойства на всем протяжении сварного соединения стабильны, и соответствуют свойствам основного металла.

Применение двусторонней двухпроходной сварки не лишена недостатков, к этим недостаткам относятся необходимость кантовки изделия. Даже оптимальные режимы сварки, при двусторонней сварке не снижают уровень напряженного состояния и деформации, обнаруженные деформации достаточно существенны.

Результаты испытаний узла С4 (односторонняя сварка на керамических подкладках) на ударную вязкость, замеров твердости, испытания на статическое растяжение приведены на рисунке 7.

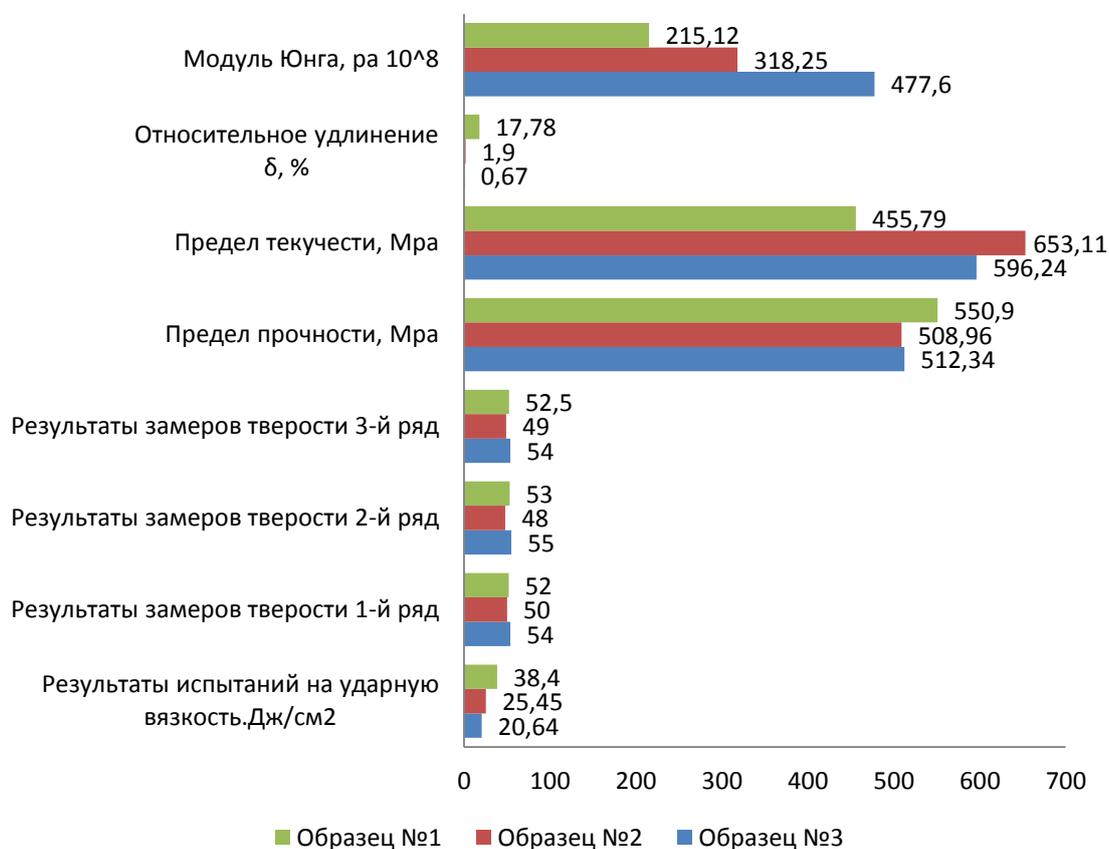


Рисунок 7 - Результаты испытаний узла С4

Так как показателем прочности сварного соединения при испытании на статическое растяжение является место разрыва образца то можно сделать вывод о том, что прочность образцов не удовлетворительная, поскольку образцы порвались в зоне основного металла. Значение механических свойств, выявленных при статическом растяжении близок значению механических свойств основного металла, но не соответствует ему.

Распределение твердости как по сечению всех сварных образцов, так и по поверхности с лицевой и обратной стороны шва имеет достаточно равномерный характер и колеблется в пределах 10 единиц HRA.

Результаты испытаний узла С4 (односторонняя сварка на керамических подкладках с предварительным нагревом) на ударную вязкость, замеров твердости, испытания на статическое растяжение представлены на рисунке 7

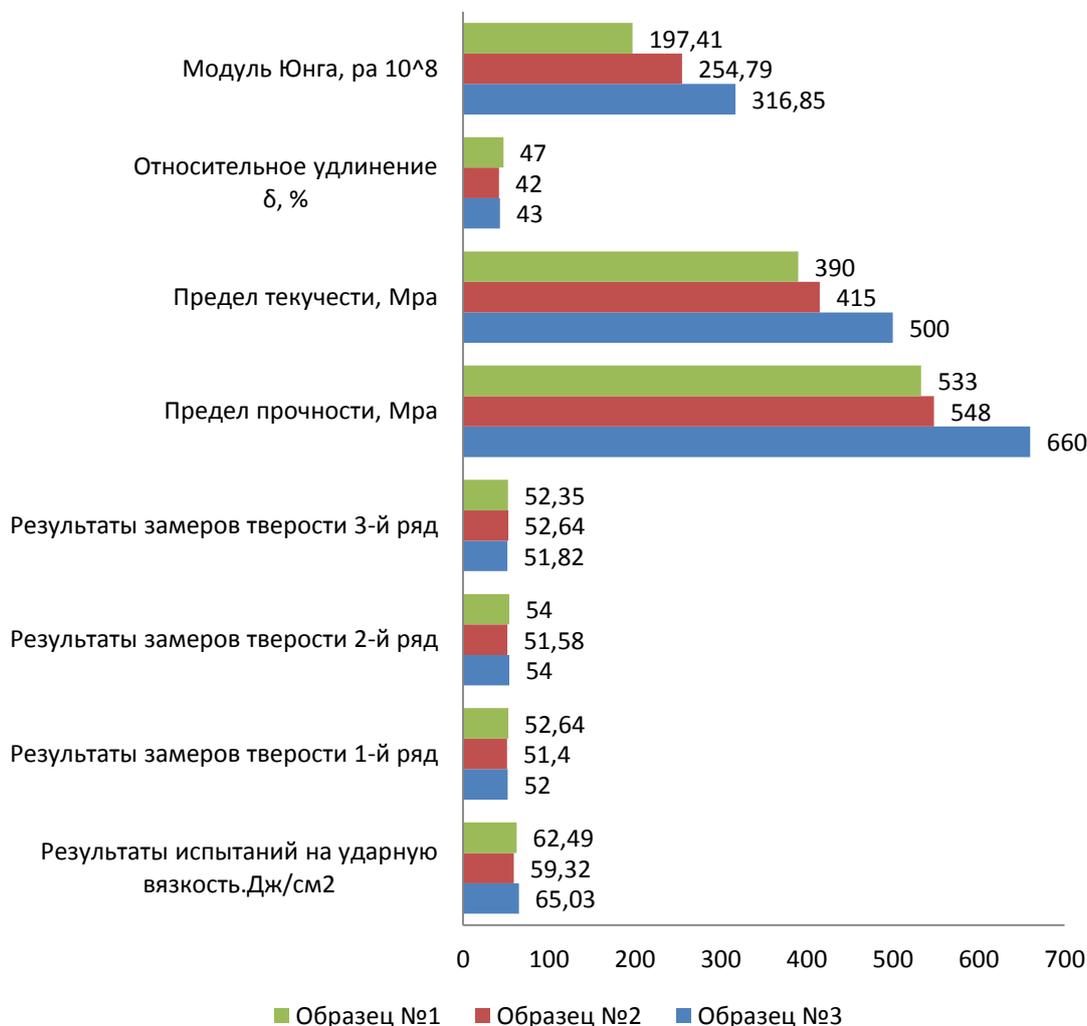


Рисунок 8 - Результаты испытаний узла С4( с подогревом)

Полученные сварные соединения, по механическим свойствам, не уступают основному металлу и имеют минимальные значения деформаций, что обусловлено низким уровнем остаточных внутренних напряжений. При сравнении показателей предела прочности, предела текучести, предела пропорциональности и относительного удлинения с данными по ГОСТ 19281-73 на сталь 09Г2С подавляющее большинство показателей имеют значения соответствующие данным в ГОСТе. По данным полученным путем замера твердости значения исследуемых образцов, соответствуют установленным для проката стали 09Г2С.

В четвертой главе на основе исследований проведённых в работе построена линейная диаграмма и отображена на рисунке 9.

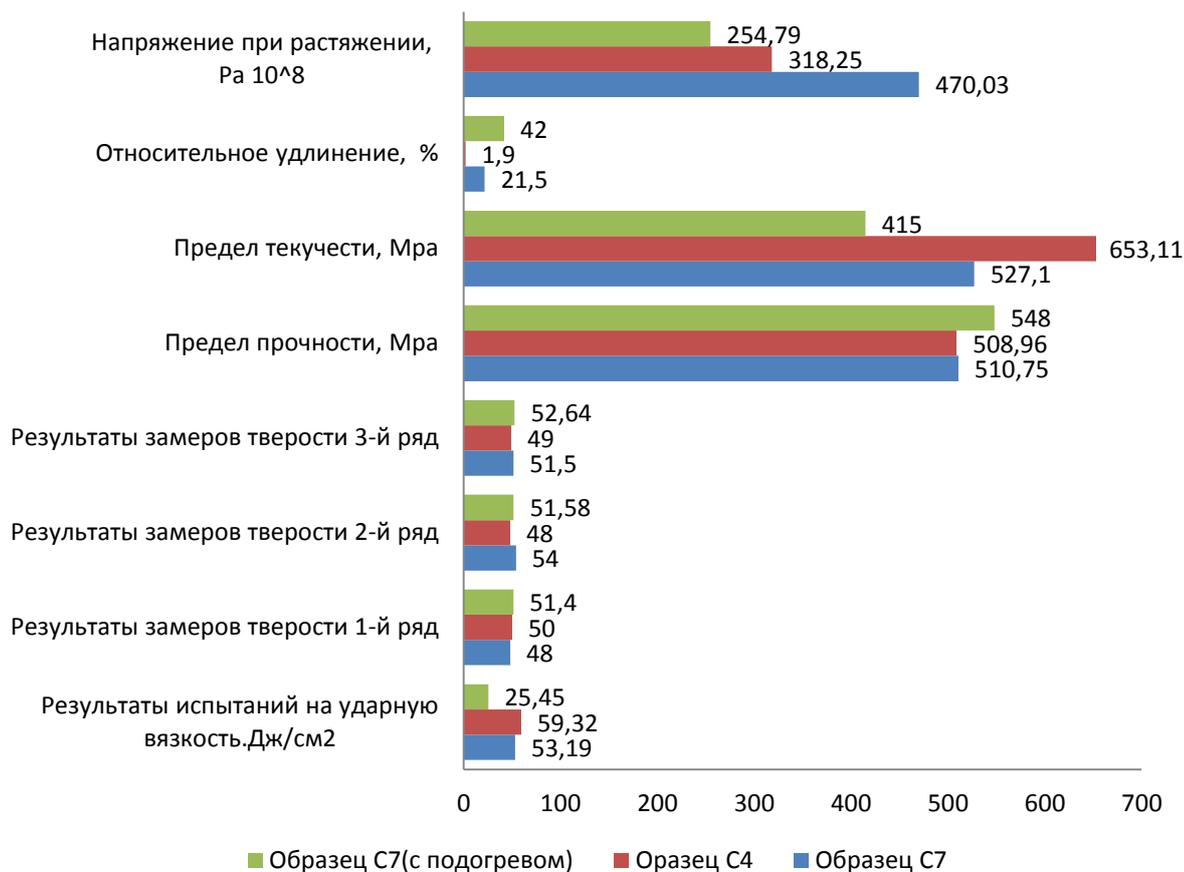


Рисунок – 9 Результаты испытаний.

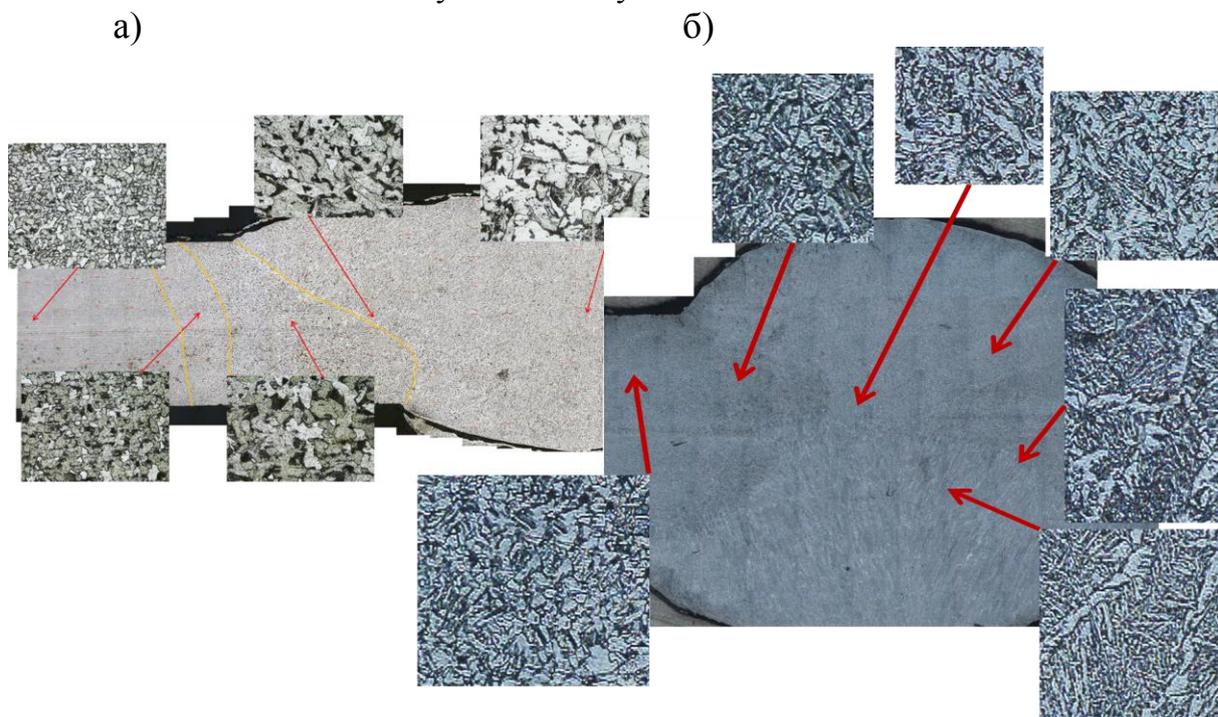


Рисунок 10 – Микроструктура.  
а) С4(с предварительным подогревом); б) С7

Вывод: Традиционные технологии сварки крупногабаритных корпусных судовых стальных конструкций обуславливают двустороннюю сварку на весу, требующую дополнительных операций кантовки, строжки, зачистки, что в целом повышает трудоемкость и себестоимость изделия. Применение двусторонней двухпроходной сварки не лишена недостатков, хоть и второй валик является отжигающим для первого но напряжение меняет знак на противоположный и увеличиваются в 2,5 раза. Современные методы снятия сварочных напряжений либо малоэффективны в крупногабаритных конструкциях, либо борются не с причиной а с образовавшейся деформацией.

Анализ картины деформирования сварных соединений при сварке показал существенное снижение уровня деформаций при односторонней однопроходной сварке на подогреваемых керамических подкладках относительно двухсторонних сварных соединений на весу. Данный способ сварки позволяет создавать более геометрически точные сварные конструкции и не прибегать к дополнительным технологическим операциям по правке конструкции и исправлению структуры посредством отпуска.

Способ создания сварного соединения по узлу С4 с предварительным нагревом расширяет возможности традиционного для судостроения способа автоматической сварки под слоем флюса. При односторонней однопроходной сварке в отношении энергозатрат, не требуется дорогостоящего оборудования, связанного с общей термообработкой и высокой квалификации специалистов, так же нет необходимости разделки кромок при сварке деталей больших толщин. Эффективность исследуемого способа отражается в отсутствии дополнительных операций по правке сварных соединений.

#### **Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

1 Исследование влияния подогрева и контролируемого режима охлаждения при сварке стальных корпусных конструкций на структуру и свойства сварных соединений /Бахматов П.В., Тишкова Е.Е., Бажин В.И.// Сварка и диагностика. 2015. № 6. С. 51-54.

2 Винокуров, В. А. Теория сварочных деформация и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. - М. : Машиностроение, 1984. - 280 с.

3 К вопросу оценки напряженного состояния сварных соединений /Бахматов П.В., Тишкова Е.Е., Бажин В.И. //Контроль. Диагностика. 2016. №3. С.9-13.

4 Попов, А. А. Справочник термиста. Изотермические и термокинематические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А. А. Попов, Л. Е. Попова. - М. : Книга по требованию, 2012. - 430 с.  
(апреля 2014 г.) : материалы и доклады, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, 2014. – 132-137 с.

5 Пат. 2557041 Российская федерация, МПК В 23 К 9/035, В 23 К 9/32. Способ сварки плавлением стальных конструкций и устройство для его реализации / Бахматов П. В. Тишкова Е. Е. Муравьев В. И. Мелкоступов К. А. Фролов А. В.; заявитель и патентообладатель Комсомольск-на-Амуре «КНАГТУ». - № 2014104339/02; заявл. 07.02.2014 ; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20. - 6 с. : ил.