

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Москаева Александра Витальевна

Исследование влияния технологических факторов сварки под слоем  
флюса на деформационную картину в сварных соединениях

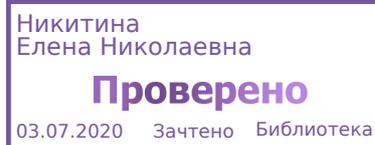
Направление подготовки

15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ

МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2020



Работа выполнена на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Технология сварочного и  
металлургического производства»  
ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре  
государственного университета»,  
**Бахматов Павел Вячеславович**

**Рецензент**

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник ИМиМ ДВО  
РАН, г. Комсомольск-на-Амуре,  
**Жилин Сергей Геннадьевич**

Защита состоится «02» июля 2020 г. в 10:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

Автореферат разослан 26 июня 2020 г.

Секретарь ГЭК  
к.т.н., доцент

**А.В. Свиридов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Автоматическая сварка под слоем флюса является одним из основных способов выполнения сварочных работ в промышленности и строительстве. Обладая рядом важных преимуществ, таких как высокая технологичность, независимость от квалификации исполнителя работ, защищенность сварочной ванны от взаимодействия с окружающей средой, отсутствие потери на угар и разбрызгивание и др., она существенно изменила технологию изготовления сварных конструкций, таких как металлоконструкции, трубы большого диаметра, котлы, резервуары, корпуса судов.

Однако, несмотря на все преимущества данного способа сварки, ярко выраженными недостатками являются деформации и внутренние напряжения. Обеспечение заданной формы и размеров конструкций разного назначения, с учетом происходящих сварочных деформаций является одной из важнейших технологических задач машиностроения. Решение этой задачи значительно усложняется при сварке крупногабаритных конструкций, сравнительно с небольшими толщинами листов перекрытий и большим количеством сварных швов и наплавленного металла, приходящегося на единицу веса. Исправление остаточных деформаций трудоемкий, энергозатратный процесс, связанный с локальным нагревом определенных участков основного металла, так как объемная термообработка крупногабаритных конструкций невозможна. Локальный нагрев не снижает уровень напряжений сварных соединений, а наоборот создает их в большем объеме в основном металле.

Среди первых отечественных работ посвященных данной проблеме и опубликованные в 30-е годы следует отметить работы И.А. Фридендера, Г.В. Бондаренко, А.В. Дятлова, Л.А. Гликмана и Д.И. Грекова, Н.О. Окербома, Е.О. Патона, Н.С. Лейкина, Н.А. Николаева, которые создали основу для создания расчетных методик определения внутренних напряжений и деформаций. Эти методики основываются на теории распределения тепла, при сварке разработанной Н.Н. Рыкалиным.

В настоящее время актуален поиск возможностей снижения деформаций при традиционных способах сварки без использования привычной термообработки. Достигается это либо специальным методом охлаждения, либо аккумулятированием тепла сварочной ванны.

**Цель работы:** исследовать влияние технологических факторов сварки под слоем флюса на деформационную картину сварных соединений, и разработать метод снижения деформаций в процессе сварки.

**Задачи исследования:**

- исследовать технологические факторы образования деформаций в процессе сварки;
- рассмотреть влияние на деформационную картину режимов сварки;
- исследовать влияние на картину деформаций сварки с предварительным и сопутствующим подогревом;

- исследовать влияние на деформационную картину сварки с принудительным охлаждением;

**Достоверность** полученных результатов и выводов основывается на использовании поверенного комплекса контрольноизмерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физикомеханических свойств и макро- и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям.

**Научная новизна.** Впервые опробована технология, совмещающая сварку под флюсом и сопутствующее низкотемпературное охлаждение, позволяющая уменьшить зону термического влияния и снизить внутренние напряжения в сварном шве. При этом наблюдается чередование в дендрите металла шва мягкой прослойки феррита-перлита и твердой закалочной структуры, а также полная рекристаллизация металла первого валика при двухсторонней сварки. Личный вклад автора состоит в постановке задачи исследования, в проведении экспериментальных исследований с последующим анализом и обработкой полученных данных.

**Практическая ценность.** Разработанная методика позволит получать бездеформационные сварные крупногабаритные конструкции, улучшить и упростить технологию сборки.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в трех публикаций, входящих в РИНЦ в сборниках конференций КнАГУ и в одной публикации журнала «ученые записки КнАГУ» входящие в РИНЦ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы. Диссертация содержит 86 страниц, 52 рисунок, 22 таблицы; список литературы, состоящий из 31 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность проведения исследований направленных на изучение влияния технологических факторов сварки под слоем флюса на деформационную картину сварных соединений и установлении факторов снижающих деформации в процессе сварки. Обоснованы цель работы и задачи.

**В первой главе** являющейся обзорной проведен анализ литературных данных направленных на определение, что является деформацией, на способы их устранения, а также влияние деформаций при сварке под слоем флюса.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментов, которые показывают деформационную картину сварного соединения. Данный

эксперимент основывался на подборе оптимальных параметров режима сварки.

После выяснения оптимальных режимов сварки на малых образцах сваривали образец с более протяженным стыком размерами 1300×350×5 мм. Для обеспечения равномерности вылета электрода сварное соединение после наложения первого валика было выправлено.

Процедура сварки приводит к существенному деформированию свариваемого образца как после первого прохода, так и после второго прохода. Наблюдаемая после охлаждения деформация имеет седловидную форму с максимальным прогибом 70 мм после первого прохода и 80 мм после наложения второго валика (рисунок 1).

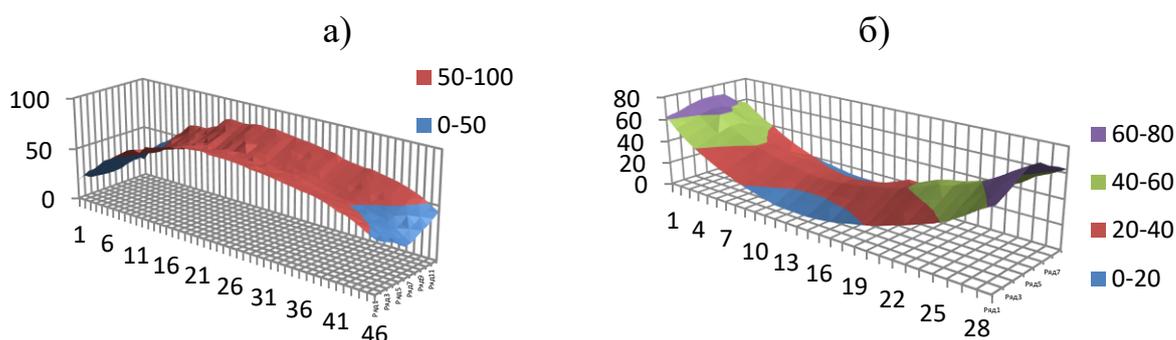


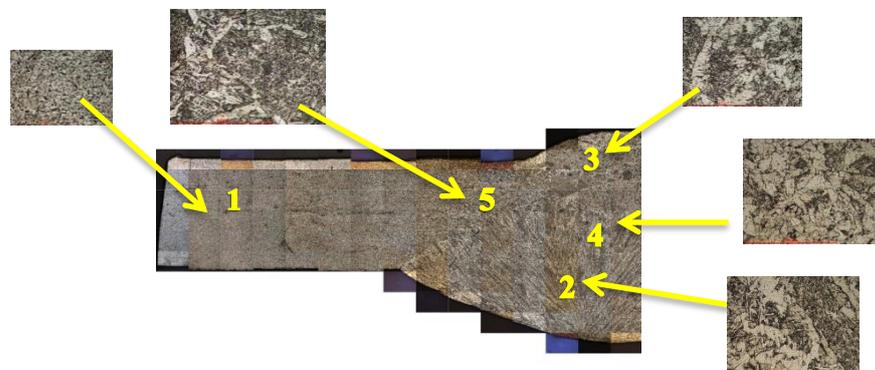
Рисунок 1 – Картина сварочных деформаций после наложения валиков:  
а – первого валика; б – второго валика

В динамике деформирования в процессе сварки наблюдалось следующее явление: при достижении половины длины сварного шва деталь выгибалась к сварочной головке, тем самым уменьшая величину вылета электрода, что в свою очередь повлекло образованию прожога в ряде участков, даже после оперативного вмешательства подъема сварочной головки.

В ходе охлаждения деформация сменила знак на противоположный. Кроме продольной деформации наблюдается и поперечная деформация, отображающаяся в форме домика, что дает сложный характер общей картины деформирования образца (то есть изменение геометрии происходит в трех плоскостях).

При анализе микроструктуры видно, что отсутствует непровар, то есть обеспечено взаимное перекрытие валиков. Структура первого и второго валиков имеет разную морфологию: в структуре второго валика наблюдаются дендриты с игольчатой структурой бейнита отпуска, направлена от линии сплавления поверхности образованной усилением сварного шва и к его поперечной оси. В структуре первого валика наблюдаем отпускную структуру феррито-перлитной смеси, имеющей зерно равное по размеру с основным металлом (рисунок 2). Это явление

характеризуется следующим механизмом: в момент нагрева и кристаллизации второго валика происходит, нагрев до температуры аустенизации металла первого валика во всем его объеме и медленное охлаждение до образования феррито-перлитной смеси среднего размера зерна.



1- основной металл; 2 - первый валик шва; 3 - второй валик шва;  
4 - перекрытие валиков; 5 - зона термического влияния

Рисунок 2– Микроструктура поперечного сечения сварного соединения контрольного образца

Испытания на ударную вязкость проводились на двух образцах, вдоль сварного шва и поперек. В обоих случаях показания ударной вязкости превосходили показания из справочников в два раза, что говорит нам о высокой способности материала поглощать механическую энергию в процессе деформации.

Испытаниям на ударную вязкость подвергался образец выпиленный вдоль шва, тем самым в испытаниях участвовал исключительно наплавленный металл (металл шва). Результаты испытаний на ударную вязкость Охлаждённые до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  образца показывают увеличение ударной вязкости относительно разрушенных при комнатной температуре.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментов по применению предварительного и сопутствующего подогрева на изменение деформационной картины сварного соединения.

Для исследования деформационной картины сварки с предварительным и сопутствующим подогревом одностороннего сварного соединения были изготовлены образцы из листа стали 09Г2С размерами 1500 x 160 x 5 мм. Образцы отчищены от загрязнений, ржавчины, следов влаги, маслянистых пятен на 40 мм от края пластин на всю длину стыка. Детали собирались на технологических планках без зазора по соединению С4 ГОСТ 8713-79 на плоских керамических подкладках. Нагрев вели керамическими электронагревателями с управлением нагревом и охлаждением, специально разработанным устройством с термопарой типа ХА. Для теплоизоляции соединения использован Supersil.

До процесса сварки осуществлялся нагрев образца до температуры, заданной программой. По окончанию нагрева верхний слой теплоизоляции

убирался и осуществлялся процесс сварки. По окончании сварки сварное соединение накрывалось совместно с флюсом теплоизоляционным слоем и образец охлаждался до заданной температуры по программе. Сразу после нагрева до заданной температуры производился процесс сварки, выдержка при установленной температуре пропускалась во избежание роста зерна в сварном соединении и зонах термического влияния.

Геометрические параметры полученного сварного соединения измерены в пяти точках при помощи УШС-3. Выявлено, что сварное соединение соответствует ГОСТ 8713-79 соединению С4.

Испытания на ударную вязкость проводились на копре ХР-05.

После сварки невооруженным глазом видна разница деформационной картины между образцом сваренным традиционным методом и образцом сваренным с предварительным и сопутствующим подогревом (рисунок 3).



Рисунок 3 – Сравнение деформационной картины:

а – двусторонняя сварка под слоем флюса; б – односторонняя сварка под слоем флюса с предварительным и сопутствующим подогревом

Показания ударной вязкости превосходили показания из справочников в два раза, что говорит о высокой способности материала поглощать механическую энергию в процессе деформации.

Измерение микротвердости по средней линии сечения сварного соединения начиная с середины сварного шва до зоны основного металла производились на микротвердомере SHIMADZU HNV -2 (Япония). Нагрузка 200 гр.

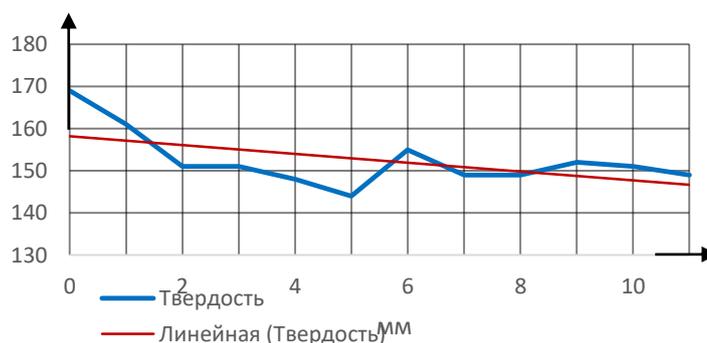


Рисунок 4 - Графики распределения микротвердости по сечению шва

Микротвердость во всех зонах термического влияния равномерная, скачков значений не наблюдалось также, как и зон разупрочнения.

Зона термического влияния исследуемого образца характеризуется четырьмя зонами: зона наплавленного металла, зона рекристаллизации, зона перегрева, зона основного металла.

Термический цикл исследуемого образца характеризуется четырьмя зонами: зона наплавленного металла (I), зона рекристаллизации (II), зона перегрева (III), зона основного металла (IV) (рисунок 5).

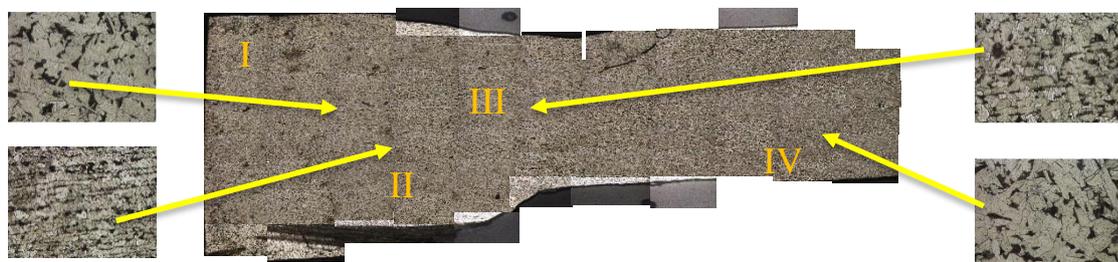


Рисунок 5 - Микроструктура сварных швов

Физико-механические свойства материала в значительной степени определяются состоянием и структурной организацией внутренних границ раздела.

**В четвертой главе** представлен способ устранения деформаций и снижения внутренних напряжений, уменьшением зоны термического влияния принудительным охлаждением, для того чтобы прировнять объем концентрации напряжений в зоне термического влияния к объему напряжений, находящихся в сварном соединении.

Методика эксперимента была следующая: из листа стали Ст3 были вырезаны образцы, размерами 810×150×4 мм. Кромки очищены от краски и ржавчин с обеих сторон на всю длину сварного стыка. Заготовки собирались без зазора и разделки кромок, по двум типам соединений С7 и С4 по ГОСТ 8713-79 на технологические планки (100 × 70 × 4 мм, 09Г2С) с проставлением прихваток (10-50 мм).

В качестве хладагента использовался сухой лед. Режимы сварки для первого прохода: ток равнялся 150А., напряжение 24 В., скорость 28 м/ч.

Второй проход был выполнен с другой стороны образца. Подготовка стыка происходила аналогично первого прохода. Ток на втором проходе превышал ток первого прохода на 60 А. Сварка начиналась с выводных планок.

Для сварки одностороннего соединения использовались следующие параметры сварки: ток равнялся 250А., напряжение 24 В., скорость 28 м/ч.

После того как с образцов была снята деформационная картина, из металла шва были вырезаны образцы для просмотра внутреннего строения микроструктуры, для проведения испытаний на ударную вязкость, для изучения механических свойств полученного соединения.

Геометрия шва оказалась в пределах параметров ГОСТ 8713. Внешних дефектов, такие как трещины и поры, не наблюдалось.

После первого прохода с деталью произошли пластические деформации (рисунок 6 а). Деталь приняла седлообразную форму, выгнувшись к сварочной головке. Изгиб в середине сварного соединения составляет 14 мм, что значительно меньше, чем деформации, происходившие с металлом при сварке без принудительно охлаждения, но выше чем при сварке с предварительным подогревом.

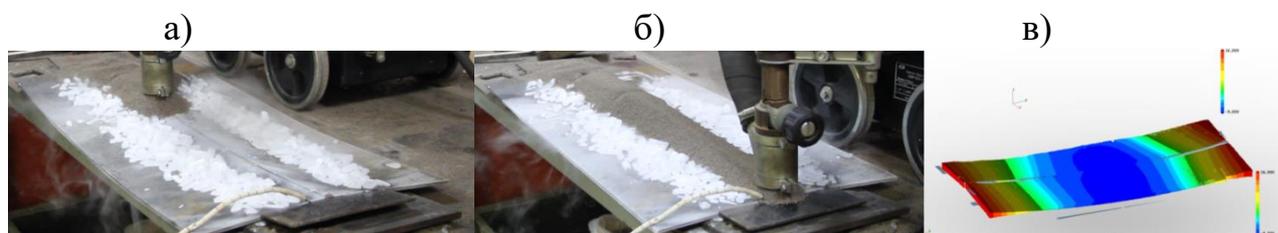


Рисунок 6 – Двусторонняя сварки под слоем флюсом:  
а - начало сварки второго прохода; б - окончание сварки второго прохода;  
в - деформационная картина двустороннего соединения, измеренная  
манипулятором МСАх+

В процессе сварки второго прохода, пластина начала изменять свою форму в обратную сторону (рисунок 6 б). Дойдя до середины пластина с резким щелчком выровнялась. Температура околошовной зоны в момент сварки возросла до 150 °С.

После окончания процесса сварки образец деформировало в ту же сторону что и при первом проходе, но прогиб пластины составил уже 25 мм.

На данных снятых с манипулятора МАСХ можно увидеть, что деформации произошли одинаковые на двух пластинах и деталь приняла седлообразную форму (рисунок 6 в).

Геометрия шва однопроходного соединения находится в пределах параметров ГОСТ 8713-79. За счет увеличения энергии вводимой в зону шва появились незначительные подрезы, а из-за того, что некоторые гранулы льда попали под слой флюса, в трех местах наблюдаются поры.

Однопроходное соединение имеет зигзагообразной формы. До середины сварного соединения металл не деформировался, а после прохождения больше половины пути, металл стал выгибаться в сторону сварочной головки.

Деформации в одностороннем соединении имеют совершенно другой вид, нежели при сварке двухстороннего образца, хотя по размеру искривлений они находятся на одном уровне. В первом случае деформационный прогиб произошел в центре сварного соединения и был одинаков для обеих пластин. В однопроходной сварке можно заметить, что пластины деформировало по-разному, и размер изгиба первой пластины на 4 мм выше прогиба второй (рисунок 7 б).

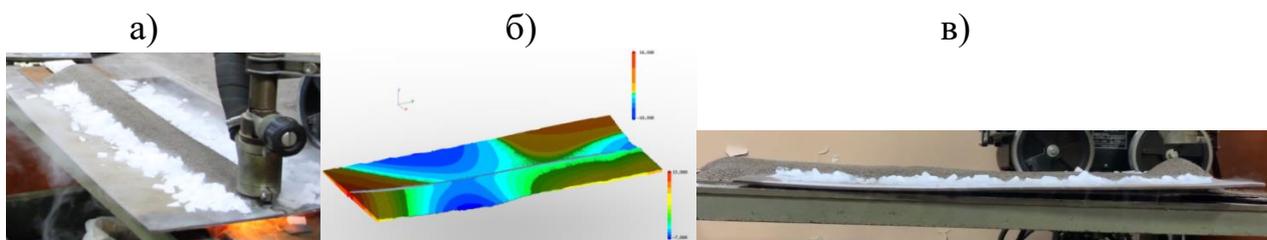


Рисунок 7 – Односторонняя сварка под слоем флюса:  
 а - окончание сварки однопроходного соединения;  
 б - деформационная картина одностороннего соединения;  
 в – деформация пластины после однопроходной сварки

После сварки металл образцов остался холодным. Тепло распространялось от начала сварного соединения и уходило треугольной формой. Данный эффект произошел из-за того, что относительно окончания сварки в начальных точках сухой лед успел сублимировать и достиг той температуры, которая снижает эффект сублимации.

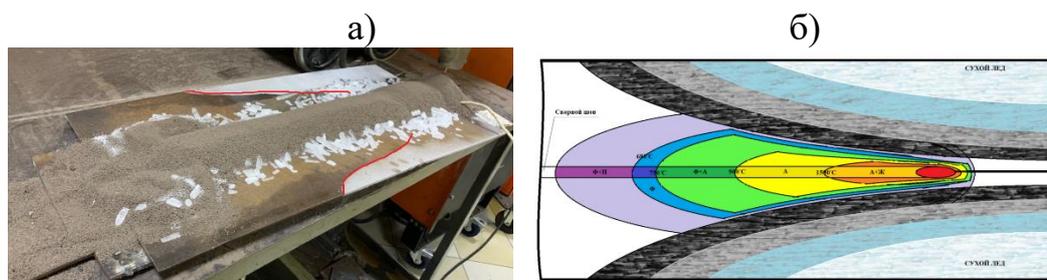


Рисунок 8 - Температурные изотермические линии в момент сварки с сухим льдом: а – практическое видение распространение температур;  
 б – теоретическое видение распространение температур

В ходе эксперимента можно сделать вывод, что способ уменьшения зоны термического влияния до суммарно равной зоны сварного соединения по средству принудительного охлаждения сухим льдом несколько устраняет сварные деформации. Но данный способ мало изучен и требует глубокого изучения процессов, происходящих в сварном соединении во время сварки. Стоит также учитывать, что в момент распространения тепла, тепловые потоки отражаются от края пластины и возвращаются обратно, тем самым ускоряя сублимацию сухого льда.

При более близком рассмотрении сварных соединений под увеличением в 100 раз (рисунок 9), можно увидеть, что у двухстороннего и одностороннего сварного соединения ЗТВ практически отсутствует. В двух швах присутствует непровар, это обусловлено тем, что были неправильно подобраны параметры при сварке.

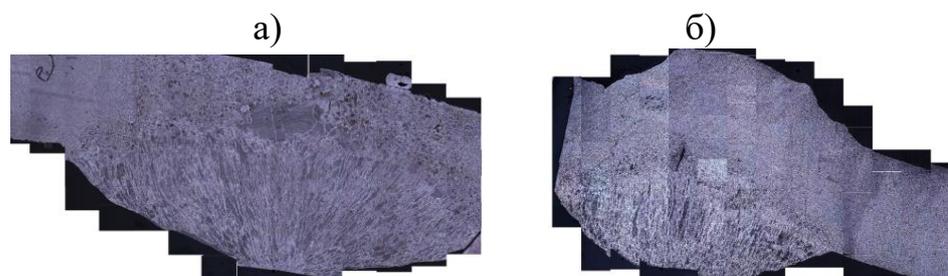


Рисунок 9 – Микроструктура сварных соединений выполненных сваркой с применением сухого льда: а – одностороннее соединение, б – двустороннее соединение

В одностороннем соединении также, первичное зерно дендритной формы и в этом зерне образовались попеременно ферритно-перлитная структура и пластинчатый тростит. Феррито-перлитная структура служит демпфером для игольчатой структуры пластинчатого троостита, который вызывает остаточные напряжения из-за большего изменения объема при фазовых превращениях.

Значения ударной вязкости в обоих случаях превосходят справочные данные. При силе удара 150 Дж односторонний образец сломался по шву при силе 34 Дж, а двухсторонний только погнулся. Это говорит о том, что металл стал пластичным.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ В РАБОТЕ:

1. Сварка под флюсом до сих пор имеет широкое применение в различных областях, где изготавливаются крупногабаритные тонколистовые конструкции, и имеет ряд проблем: деформирование конструкций и необходимость эмпирического подбора режимов сварки для каждого конкретного соединения при отработке технологии.

2. Решение проблемы деформирования возможно, как управлением энергетическими параметрами режима сварки, так и внешним температурным воздействием, сопутствующим сварке. Управление параметрами режимов сварки не всегда возможно, так как нет обратной связи между источником питания сварки и нагреваемой деталью. В этом случае становятся актуальными варианты контроля и управления скоростью охлаждения.

3. Комбинация предварительного и сопутствующего подогревов совместно с управлением скоростью охлаждения (достигая минимума скорости охлаждения) позволяет провести фазовые превращения по всей длине сварного шва одновременно, способствует снижению остаточных напряжений, а вместе с ними и сварочных деформаций.

4. Критическая скорость охлаждения, получаемая при использовании сухого льда на поверхности соединяемых деталей, минимизирует зону термического влияния, а вместе с ней и объем металла,

претерпевающего фазовые превращения, что приводит к появлению чередующихся закалочных и мягких структур в сварном шве и снижает остаточные напряжения и деформации.

5. Получены положительные результаты предупреждения и минимизации сварочных напряжений и деформаций с применением высоко и низкотемпературных внешних воздействий, сопутствующих сварке, но на образцах с ограниченными габаритами. Требуется проведение дополнительных исследований на крупногабаритных деталях.

#### **Публикации по теме диссертации:**

1 Москаева, А.В Опыт применения флюса ok flux 10.71 и проволоки 12-22 для сварки двухсторонних стыковых соединений низкоуглеродистой стали 3/ А.В. Москаева, Е.А. Старцев, П.В. Бахматов, Г.И. Усанов// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре – 2019. - №III-1(39) – С. 81-95.

2 Москаева, А.В, Поиск путей бездеформационной сварки тонколистовых крупногабаритных стыковых соединений из низкоуглеродистой стали/ А.В. Москаева, А.О. Фледербахер, П.В. Бахматов// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре – 2019. - №III-1(39) – С. 227-230.