

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

На правах рукописи

Жуков Михаил Алексеевич

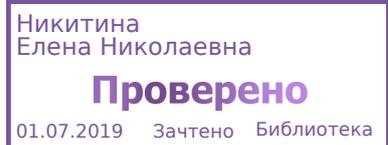
**Теоретические основы бездеформационной сварки
плавлением протяженных соединений в судостроении**

Направление подготовки

15.04.01 «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2019



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет» на кафедре «Машиностроение и металлургия»

Научный руководитель

кандидат технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Машиностроение и металлургия»
Бахматов Павел Вячеславович

Рецензент

кандидат технических наук, доцент,
и.о. заведующего лабораторией
химических и фазовых превращений
в материалах, ведущий научный
сотрудник, ИМиМ ДВО РАН, г.
Комсомольск-на-Амуре
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится 28 июня 2019 года в 9 часов 00 минут на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 221/2.

Автореферат разослан 20 июня 2019 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

А.В. Свиридов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В отечественном судостроении дуговая сварка начала применяться на верфях Дальмашзавода (г. Владивосток) с начала 20 века, придя на смену клепке. Пионером в этом деле стал инженер, ученый, профессор Виктор Петрович Вологдин. В настоящее время для судостроения при изготовлении крупногабаритных секций с протяженными стыками традиционной является автоматическая дуговая сварка под слоем флюса. Ее применение связано с высоким коэффициентом полезного действия, высоким уровнем автоматизации, малым влиянием человеческого фактора на качество сварного соединения. Вместе с тем существует ряд проблем применения этого способа: нестабильное проплавление металла при сварке на весу - необходимы формирующие устройства (подкладки, ползуны); высокий уровень остаточных деформаций особо наблюдаемых в сварных тонколистовых конструкциях.

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 большом объеме в основного металла.

Среди первых отечественных работ посвященных данной проблеме и опубликованных в 30-е годы следует отметить работы И. А. Фридлиндера, Г. В. Бондареко, А. В. Дятлова, Л. А. Гликмана и Д. И. Грекова, Н. О. Окерблома, 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 распределении тепла при сварке разработанной Н. Н. Рыкалиным.

В настоящее время существуют программные комплексы моделирования процесса сварки и оценки напряженного состояния (ANSYS, SYSWELD), основанные на методе конечных элементов. Эти программы сокращают время и ошибки при проектировании технологического процесса (подбор режима сварки, последовательность наложения сварных швов и др.), позволяют оценить уровень напряжений и увидеть деформационную картину.

Решение сложных термомеханических задач неизбежно связано допущениями, например, при расчетах не учитываются фазовые превращения, расчет изотерм производится в установившееся время, наложение шва по своей длине происходит одновременно и др., что снижает вероятность совпадения расчетных моделей, описывающих остаточные напряжения и деформации с реальным свариваемым изделием до 50 %. Поэтому поиск решений по минимизации или полному устранению сварочных деформаций является актуальной задачей современного сварочного производства.

Целью данной работы является объяснение процессов, происходящих в сварном шве при охлаждении, влияющих на образование внутренних остаточных напряжений.

Для реализации цели работы поставлены следующие задачи:

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

- исследование процесса управления термическим циклом объемного низкоскоростного охлаждения с температур фазовых превращений;

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

- исследование возможности применения метода акустической эмиссии для определения длительности процессов фазовых превращений в низкоуглеродистых сталях.

Объект исследования. Процессы, происходящие в металле шва и околошовной зоне при создании сварного соединения.

Предмет исследования. Бездеформационные стыковые сварные соединения, полученные дуговой односторонней однопроводной сваркой под слоем флюса в низкоуглеродистых сталях судостроительного назначения.

Научная новизна:

- применен метод акустической эмиссии для определения продолжительности процессов фазовых превращений при охлаждении металла шва и ЗТВ;

- предложен способ сварки, обеспечивающий снижение уровня деформаций в объеме сварной конструкции.

- установлены зависимость значений деформаций с временными интервалами фазовых превращений, полученных с графиков активности сигнала АЭ.

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.

Практическая значимость. Применение разработанной технологии позволяет повысить качество стапельной сборки в судостроительном производстве; понизить трудоемкость сварочных работ; повысить эстетический вид выпускаемой продукции; разработанный способ делает возможным одностороннюю сварку наружной обшивки, что существенно сокращает время изготовления судна; применение керамических сегментированных нагревательных подкладок позволяет осуществлять криволинейные сварные соединения; разработан сварочный стенд для реализации технологии односторонней однопроводной сварки под слоем флюса; разработан лабораторный стенд для исследования комплекса процессов происходящих при нагреве и охлаждении в металлическом образце.

Личный вклад автора. Соискатель активно участвовал в постановке и проведении экспериментов: проводил микроструктурные исследования, механические испытания, обработку и анализ полученных результатов исследования, принимал активное участие в подготовке и написании научных публикаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- обобщенный анализ дилатограммы основного металла и активности сигналов акустической эмиссии и деформации для определения очередности и продолжительности фазовых превращений, а также их влияния на изменение формы сварных образцов.

- анализ микроструктур образцов нагретых сварочной дугой с объяснением образования характерных зон и распределения по ней микротвердости.

- технологические параметры и режимы односторонней однопроходной сварки при получении детали с заданной геометрической точностью;

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были представлены: на 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов», Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г.; 2 Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», Комсомольск-на-Амуре (апрель 2019 г.)

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 1 публикации в издании, входящем в список ВАК, и 2 публикациях в сборниках РИНЦ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, трех приложений. Диссертация содержит 126 страниц, 62 рисунка, 29 таблиц; список литературы, состоящий из 35 наименований, 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, сформулированы цели и задачи работы, используемые методы исследования, показана научная новизна.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. В данной главе рассмотрены процессы, происходящие при сварке под слоем флюса низкоуглеродистых сталей. Рассмотрена схема кристаллизации сварного шва при дуговой сварке под флюсом; фазовые и структурные превращения протекающие, как в кристаллизующемся сварном шве, так и в зоне термического влияния; построение дилатограмм и влияние фазового перехода на образование внутренних превращений. Произведен обзор существующих методов расчета напряженного состояния с помощью программных продуктов.

Во второй главе изложены общие вопросы методики исследований: процессов, происходящих при нагреве сварочной дугой и односторонней однопроходной сварки с управляемым подогревом и охлаждением.

Для исследования способа односторонней однопроходной сварки на керамических подкладках с управляемым подогревом и охлаждением сварные образцы были раскроены из одного листа стали марки 09Г2С при помощи гильотинных ножниц. Размер образцов 100×430×5 мм. Образцы очищены механическим способом и обезжирены на всю ширину сварного стыка. Сборка всех образцов производилась по узлу С4 ГОСТ 8713-79 без зазора на технологических планках (100×40×5 мм) с проставлением двух коротких прихваток, и с разме-

щением плоских керамических подкладок в корневой части сборки. Сварка образцов выполнялась проволокой Св-08А диаметром 4 мм под флюсом АН-348А на автомате АДФ-1250 с ВДУ-1250. Для термообработки использовались керамические электронагреватели марки КЭН Б-60-21-5 размерами 525×105 и установка для местной термообработки сварных швов мощностью 70 кВт модели РТ70-6 с возможностью программируемого нагрева и охлаждения с записью термограмм. Три термопары типа ХА прикреплялись по средней линии одной из свариваемых пластин на равном расстоянии друг от друга, отступая от правого и левого торца пластины 50 мм.

Перед процессом нагрева на стенд (рисунок 1) укладывался слой теплоизоляции Supersil, толщиной 10 мм. На слой теплоизоляции под каждую из свариваемых пластин размещались керамические электронагреватели (рисунок 2).



Рисунок 1 - Экспериментальный стенд для сварки с предварительным и сопутствующим подогревом

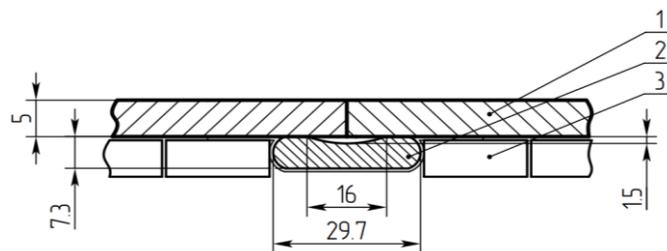


Рисунок 2 - Собранный под сварку образец (1) с приклеенной керамической подкладкой (2) установленный на керамический электронагреватель (3)

Нагрев пластин производился по программе до заданной температуры, при этом каждая пластина накрывалась слоем теплоизоляции, оставляя зазор для осуществления сварки. Далее пластины накрывались верхним слоем теплоизоляции. При достижении необходимой температуры нагрева убирался верхний слой теплоизоляции и производился процесс сварки. После сварки вместе с флюсом образец накрывался теплоизолятором и включалось программируемое охлаждение до заданной температуры. Выдержка при установленной температуре пропусклась во избежание роста зерна в сварном соединении и зонах термического цикла.

При исследовании было получено шесть образцов на разных режимах сварки и термообработки, все режимы представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Режимы сварки и термообработки

Номер образца	Сила тока $I_{св}$, А	Напряжение на дуге U , В	Скорость сварки $V_{св}$, см/мин	Температура предварительного нагрева, °С	Скорость охлаждения, °С/час
1	250	24	21	400	150
2	200	24	50	600	150
3	280	24	30	400	150
4	300	24	25	450	150
5	325	24	25	450	150
6	350	24	23	450	150

Для исследования *процессов происходящих при дуговой сварке плавлением*, и влияние их на остаточные напряжения и деформации был разработан стенд (рисунок 3) для определения значений деформаций, распределения полей

термического цикла и определения интервала начала и конца фазовых превращений с помощью метода акустической эмиссии. Стенд состоит из закрепленной пластины размером $100 \times 100 \times 5$ мм из стали марки 09Г2С зачищенной с обеих сторон механическим способом. Сверху пластины установлены 4 индикатора типа ИЧ, для определения значений деформаций при нагреве и охлаждении. Над пластиной зафиксирована сварочная горелка. Для регистрации акустической эмиссии (АЭ) в процессе нагрева пластины сварочной дугой использовались акустико-эмиссионные комплексы: АКЕМ и АЕPro V2.0. Для осуществления горения дуги использовалась установка для аргонодуговой сварки FALTIG-400 AC/DC. Для определения температур начала и конца фазовых превращений при охлаждении стали 09Г2С использовался дилатометр DIL 402РС. Нагрев сварочной дугой проводили на пяти образцах на разных значениях силы тока: 100 А, 150 А, 200 А, 250 А, 300 А.



Рисунок 3 - Стенд для исследования деформаций и определения фазовых превращений с применением АЭ

В третьей главе представлены результаты исследований процессов происходящий при дуговой сварке плавлением, и влияния их на остаточные напряжения и деформации. При рассмотрении совместных графиков распределения активности сигналов АЭ (рисунок 4) и дилатограмм основного металла была сделана попытка объяснить зональность графиков сигналов АЭ процессами, происходящими в структуре металла при охлаждении. Предположили, что первая зона (I) в графиках распределения сигналов АЭ характерна образованию аустенитного зерна из жидкой фазы сварочной ванны. При этом наблюдается увеличение интенсивности сигналов до максимального уровня. Вторая зона (II), имеет наибольшую временную протяженность предположительно участок соответствует времени существования аустенитной фазы в металле шва. Третий участок (III) активности характеризуется отсутствием стабилизации сигналов относительно предыдущей фазы, что объясняется появлением феррита в аустенитных зернах. Четвертая зона (IV) связана с образованием феррито-перлитной смеси. Пятый переход (V) имеет равномерное затухание активности сигналов АЭ до полного их исчезновения. Пятой зоне соответствуют процессы диффузии, релаксации напряжений и распределения дислокаций. Результаты измерений временных интервалов приведены в таблице 2.

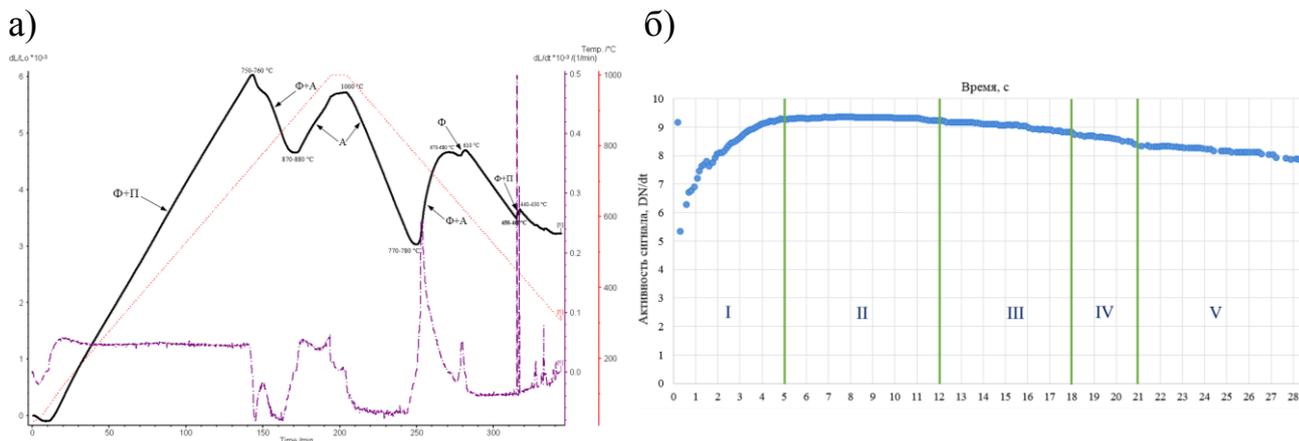


Рисунок 4 - Дилатодиаграмма стали 09Г2С (а) и распределение активности сигналов АЭ на выделенных участках, образец № 4 (б)

Таблица 2 - Время активности сигналов АЭ

Образец	Зона интенсивного роста активности сигналов АЭ, с	Зона равномерно активных сигналов АЭ, с	Зона пологого спада сигналов АЭ, с	Зона уменьшения амплитуды сигналов АЭ, с
1	1	-	6	10
2	1	4	2	2
3	1	5	6	3
4	5	7	6	3
5	4	9	4	4

Совместное рассмотрение дилатодиаграммы и структуры металла сварного соединения объясняет существование различных зон (рисунок 5). Первая зона - основной металл (феррито-перлитная смесь) - металл не претерпевает фазовых превращений и вынесен за ЗТВ. Вторая зона мелкого зерна (феррито-перлитная смесь претерпевающая при нагреве образование аустенита) ограниченная температурами 750 - 880 °С и пребывающая при этой температуре короткое время. Третья зона крупного зерна ограничена линией сплавления 1540 °С и температурой 880 °С, претерпевает следующие фазовые превращения: феррит+перлит, феррит+аустенит, аустенит и обратно и в момент превращения феррит+аустенит имеет большее время существования. Четвертая зона - металл шва ограничен линией сплавления и перегревается выше 1540 °С, претерпевающий фазовые превращения: феррит+перлит, жидкость, жидкость+аустенит, аустенит, феррит+аустенит, феррит, феррит+перлит.

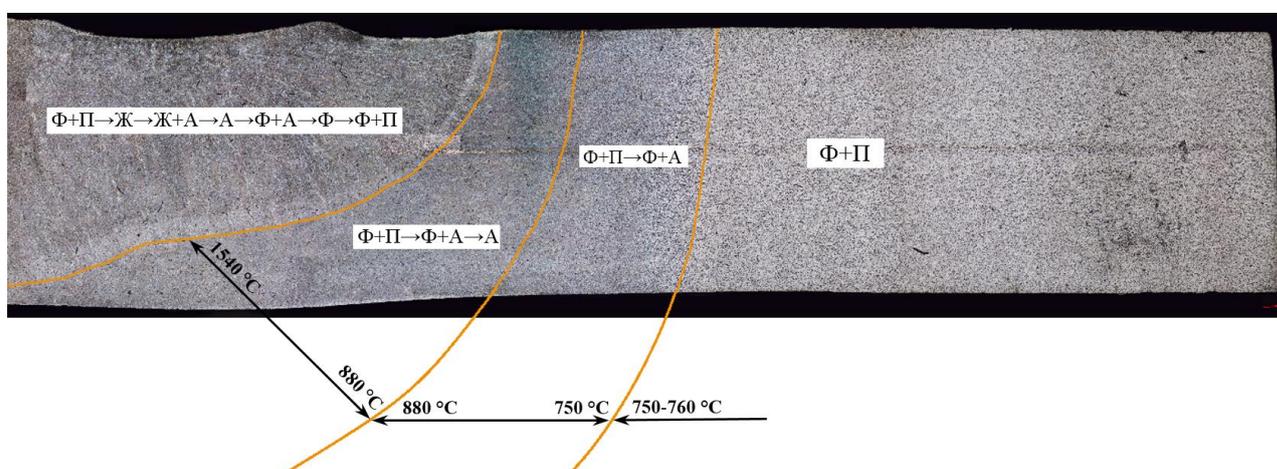


Рисунок 5 - Фазовые переходы в металле шва и ЗТВ

Общий анализ временных интервалов фазовых превращений, полученных по измерениям активности сигналов АЭ и деформирования сварных образцов, позволил графически увидеть влияние каждого из фазовых переходов при охлаждении образца на деформационную картину (рисунок 6). Максимальное значение деформаций наблюдается во время образования и существования жидкой фазы в сварном шве. В процессе аустенизации происходит интенсивное уменьшение объема металла шва, приводящее к резкому изменению знака значений деформаций на противоположный.

Размеры характерных областей микроструктуры каждого образца приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Размеры зон термического влияния

Образец	Длина ЗТВ с лицевой стороны шва, мм	Длина ЗТВ со стороны корня шва, мм	Площадь зоны сварочной ванны, мм ²	Площадь зоны крупного зерна, мм ²	Площадь зоны мелкого зерна, мм ²	Общая площадь ЗТВ, мм ²
1	3,8	0,8	1,19	8,5	7,8	16,3
2	3,2	4,4	6,1	19,1	16,7	35,8
3	2,4	4,8	5,2	18,0	9,1	27,1
4	2,3	7,7	10,8	19,3	8,6	27,9
5	3,9	12,3	23,6	32,2	15,4	47,6

При охлаждении аустенитная фаза существует в металле шва и зоне крупного зерна, суммарный объем которых превышает объем зоны термического влияния. В ходе охлаждения эта зона претерпевает сжатие максимально образуя стабильные растягивающие напряжения. При последующем охлаждении происходят другие фазовые превращения, вызывающие увеличение общего объема металла и образование сжимающих напряжений в объеме ЗТВ, причем этот процесс разнесен во времени.

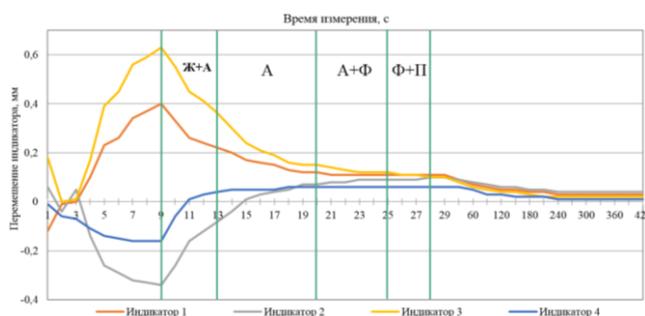


Рисунок 6 - График деформаций с зонами фазовых превращений, образец № 4, 250 А

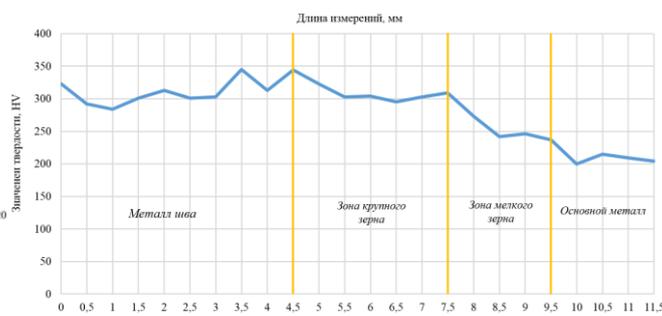


Рисунок 7 - График распределения микротвердости по сечению шва, образец № 4, 250 А

Из средних значений микротвердости (таблица 4) видно, твердость в металле шва в 1,5 раза выше относительно основного металла для всех образцов.

Таблица 4 - Средние значения микротвердости

Образец	Значение микротвердости, НВ			
	Металл шва	Зона крупного зерна	Зона мелкого зерна	Основной металл
1	389	380	311	216
2	329	353	296	207
3	326	344	254	215
4	311	306	250	207
5	324	315	258	202

Для определения фрактальной размерности, по которой оценивалась развитость границ зерен построены гистограммы для каждой зоны сварного соединения образцов (рисунок 8).

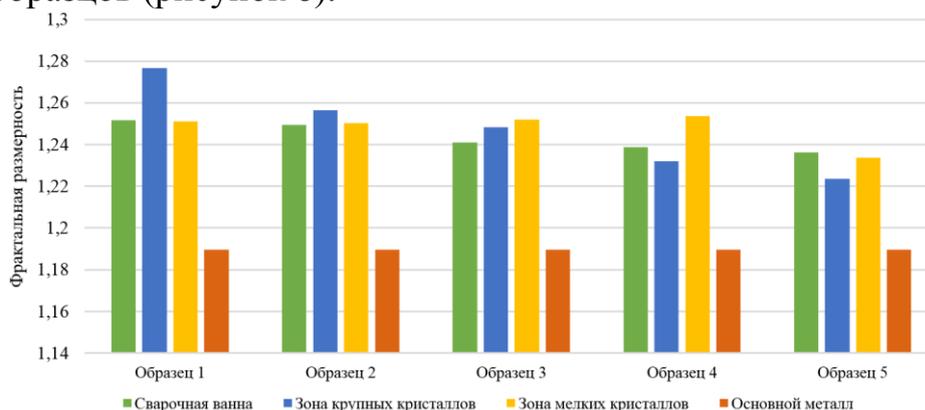


Рисунок 8 - Гистограммы распределения фрактальной размерности зерен

Из гистограммы видно, что первый образец в зонах металла шва и зоны крупного зерна имеет наибольшее значение фрактальной размерности. В каждом последующем образце в этих зонах значение фрактальной размерности уменьшается. В зоне мелкого зерна и основном металле во всех образцах фрактальная размерность практически одинакова разброс составляет 0,02 единицы.

Из исследования можно сделать вывод, что с увеличением развитости границ зерна, оцениваемой фрактальной размерностью, увеличиваются механические свойства, в данном случае микротвердость.

В четвертой главе представлены результаты апробации односторонней однопроходной сварки с предварительным и сопутствующим подогревом. Получены сварные соединения с полным формированием обратного валика по всей длине, соответствующие геометрическим параметрам соединению С4 по ГОСТ 8713-74. Максимальный прогиб составил 3,5 мм.

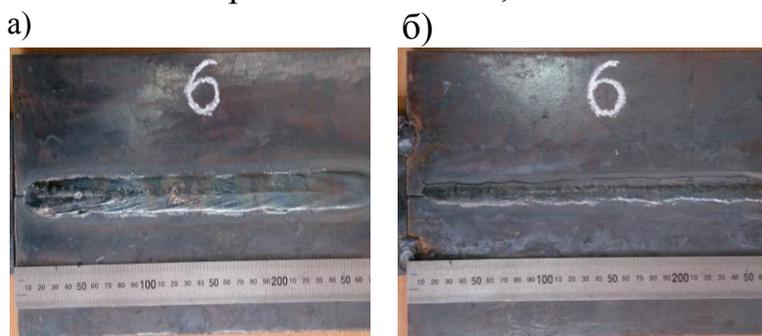


Рисунок 9 - Внешний вид образца 6 с лицевой (а) и обратной (б) стороны шва.

Особенностью разработанной технологии является равномерный предварительный нагрев до температуры 400 - 450 °С. Под действием дуги ЗТВ перегревалась до 750 - 880 °С. Укрытие изоляционным материалом позволило удерживать эту температуру до конца формирования валика. Остывание стыка производилось под термоизоляцией с контролем скорости охлаждения 150 °С в час. При этом происходил самоотпуск.

Для исследования механических свойств и микроструктуры были выбраны образцы с полным формированием обратной стороны шва. Результат испы-

тания образцов на статическое растяжение показал, что все образцы разрушились в зоне основного металла.

При измерении микротвердости по сечению шва было выявлено, что распределение микротвердости во всех зонах термического цикла, равномерное, скачков значений не наблюдалось также, как и зон разупрочнения (рисунок 10).

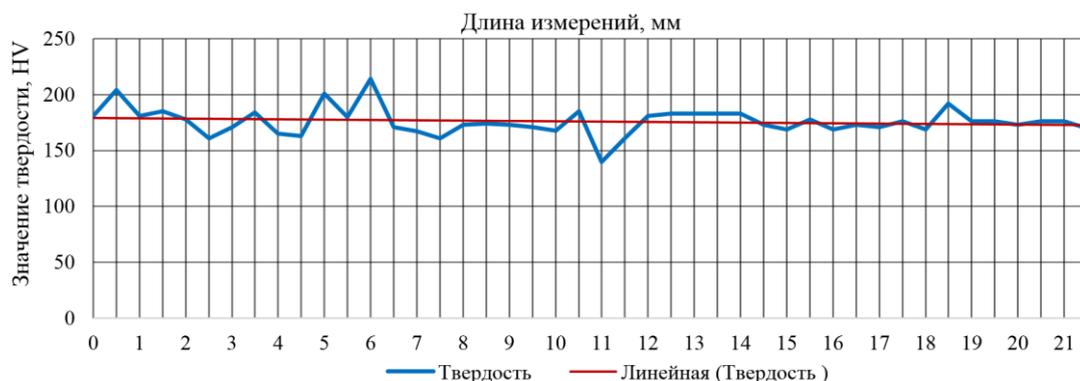


Рисунок 10 - График распределения микротвердости по сечению шва образца № 6

Микроструктура исследуемых образцов показала, что сварные швы имеют структуру отпуска феррито-перлитного класса (рисунок 11).

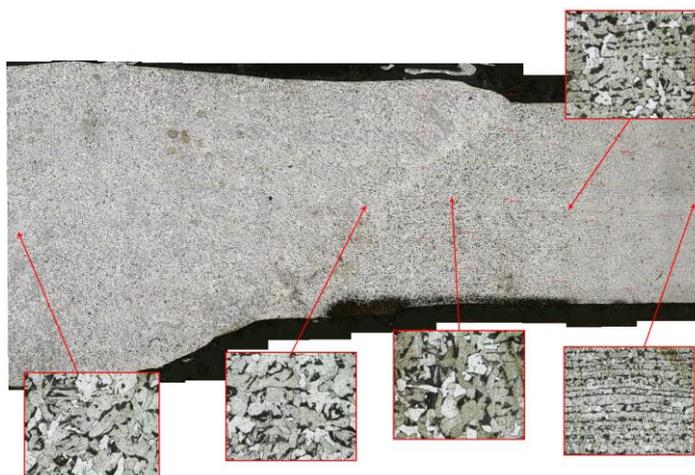


Рисунок 11 - Микроструктура образца № 6

Из гистограмм распределения фрактальной размерности (рисунок 12) видно, что в большинстве образцов от наплавленного металла до зоны рекристаллизации идет увеличение фрактальной размерности и далее спад значений до зоны основного металла. Это говорит о развитости границ в зоне рекристаллизации, что соответствует значениям более высокой твердости в этой зоне.

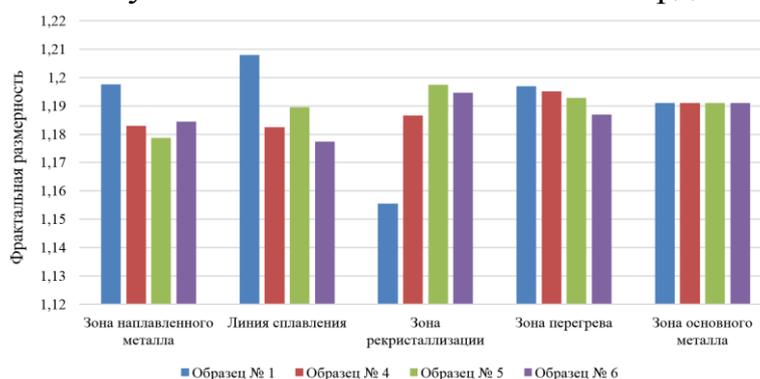


Рисунок 12 - Гистограммы распределения фрактальной размерности зерен

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

При рассмотрении совместных графиков распределения активности сигналов АЭ и дилатограммы основного металла было выявлено, что при переходе металла из одной фазы в другую активность сигналов АЭ изменяется. Это позволяет выделить временные интервалы фазовых состояний.

Общий анализ временных интервалов фазовых превращений, полученных при анализе и распределении активности сигналов АЭ и деформирования сварных образцов, позволил графически увидеть влияние каждого из фазовых переходов при охлаждении образца на деформационную картину.

При охлаждении аустенитная фаза существует в металле шва и зоне крупного зерна, суммарный объем которых превышает объем зоны термического влияния. В ходе охлаждения эта зона претерпевает сжатие, образуя стабильные растягивающие напряжения. При последующем охлаждении происходят другие фазовые превращения, вызывающие увеличение общего объема металла и образование сжимающих напряжений в объеме ЗТВ, причем этот процесс разнесен по времени.

Этот эффект негативен, но может быть применен как метод устранения внутренних напряжений и деформаций при сварке протяженных стыков следующим образом: металл шва должен быть охлажден до температуры 880 °С, а ЗТВ сохранять эту температуру. При этом весь формируемый металл шва будет сохранять аустенитную структуру, имеющую сжимающие напряжения, компенсирующие деформации расширением металла при нагреве. Медленное охлаждение позволит пройти всем последующим фазовым превращениям во всем объеме сформированного металла шва и ЗТВ.

Данная гипотеза была подтверждена при апробации автоматической сварки под слоем флюса с управляемым подогревом и охлаждением. Этим способом сварки были получены соединения, удовлетворяющие по механическим свойствам требованиям предъявляемым к основному металлу и имеющие минимальные значения деформаций, что обусловлено низким уровнем остаточных внутренних напряжений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1 Бахматов, П. В. Односторонняя однопроводная сварка на керамических подкладках с предварительным и сопутствующим подогревом / П. В. Бахматов, Е. Е. Тишкова, М. А. Жуков, И. В. Маниленко // Сварочное производство. - 2019. - № 8.

2 Жуков, М. А. Бездеформационный способ сварки плавлением / М. А. Жуков, П. В. Бахматов // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. - Комсомольск-на-Амуре ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. - С. 400-403.

3 Жуков, М. А. Процессы, происходящие при сварке под слоем флюса низкоуглеродистых сталей / М. А. Жуков, П. В. Бахматов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных Комсомольск-на-Амуре, 8-12 апреля 2019 г. - Комсомольск-на-Амуре ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019.