

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

На правах рукописи



НЮХЛЯЕВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРОЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ
ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ**

2.6.17 – Материаловедение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Горунов Андрей Игоревич
доктор технических наук, доцент

Казань – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ	13
Глава 1 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ СВАРКИ.....	22
1.1 Особенности сварки концентрированными источниками энергии	22
1.2 Структура и свойства сварного шва при сварке оплавлением.....	24
1.3 Влияние технологических параметров на структуру, свойства и дефекты сварных швов.....	28
1.4 Влияние внешних воздействий на структуру и свойства сварных соединений.....	33
Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБРАЗЦОВ	43
2.1 Методы исследования состава, структуры и свойств сваренных образцов	43
2.2 Технологическое оборудование для лазерной сварки образцов.....	47
2.3 Исследование состава, структуры и свойств сваренных образцов.....	48
Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ.....	49
3.1 Сварка образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с дополнительным воздействием акустическими колебаниями при различных частотах.....	49
3.2 Исследование микроструктуры и химического состава образцов.....	56

3.3 Исследование закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов в металле образцов, полученных различными методами аддитивного производства и сваренных лазерно-акустическим методом	64
Глава 4 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ	69
4.1 Влияние технологической схемы лазерной сварки труб на свойства сварного соединения	69
4.1.1. Отработка режимов сварки на плоских образцах	79
4.1.2. Зависимость свойств сварного соединения от расположения фокуса лазера	82
4.1.3. Зависимость свойств сварного соединения от плазменного факела	84
4.1.4. Зависимость свойств сварного соединения от подготовки поверхности	85
4.1.5. Зависимость свойств сварного соединения от толщины стенки трубы	86
4.1.6 Лазерная сварка образцов 09Г2С	86
4.1.7. Лазерная сварка насосно-компрессорных труб с применением проволоки 09Г2С	88
4.2. Лазерно-акустическая сварка насосно-компрессорных труб	95
4.2.1 Микроструктура и твердость сварного шва	96
4.2.2. Механические свойства образцов	98
4.3 Выращивание элементов труб из проволоки 09Г2С с применением ультразвуковых колебаний	105
4.4 Реализация способа лазерно-акустической сварки разнородных материалов, полученных методами аддитивного производства на примере изделия типа «Баллон»	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день существует большое количество получения сварных соединений с повышенными физико-механическими характеристиками и заданной микроструктурой в сварных швах, полученных методами лазерной сварки. Наиболее востребованы в промышленности газовые СО₂-лазеры, твердотельные неодимовые лазеры и иттербийевые волоконные лазеры, с появлением последних стало возможно создавать сварочные комплексы, оснащенные источниками лазерного излучения до 30 кВт, что позволило осуществлять сварку сварных соединений толщиной 25 мм за один проход. Такие комплексы позволили получать сварные соединения с высокодисперсной структурой в металле сварного шва и значительно снизить зону термического влияния. Волоконные лазеры наиболее популярны в промышленности, так как имеют ряд преимуществ – высокий коэффициент полезного действия, компактность модуля, а использование оптического волокна дает гибкость, при этом легко добавляется мощность за счет диодных модулей. Указанные условия предопределили выбор лазерной сварки как одного из наиболее эффективного метода, позволяющего получать равномерное распределение химических элементов в металле сварного шва, а также однородность микроструктуры.

Однако на сегодняшний день экспериментальных данных, связанных с исследованиями структуры и свойств сварных соединений, по-прежнему мало, что замедляет возможности внедрения технологии лазерной сварки в промышленность. На данный момент на предприятиях используются классические методы сварки труб, такие как дуговая сварка, подразумевающая

введение большого количества тепловой энергии и присадочного материала в зону сварки. Сварка осуществляется с предварительной разделкой кромок с последующим заполнением в несколько проходов. В некоторых случаях сварные швы могут иметь структурную и химическую неоднородности, что в целом оказывает негативное влияние на свойства сварных соединений. Сварной шов имеет большой объем наплавленного металла, который может отличаться от основного по составу. Указанные недостатки могут быть решены путем использования такого источника энергии, как лазер. Применение лазерных технологий для сварки труб позволит увеличить производительность, получить более благоприятную структуру сварных швов, уменьшить зону термического влияния и, как следствие, обеспечить высокий уровень механических свойств. Локальное термическое воздействие в процессе лазерной сварки в зоне сварного соединения позволяет снизить вероятность появления горячих и холодных трещин в сварном шве. При этом управление структурой и свойствами сплавов технологическими параметрами сварки имеет ограничение, в связи с чем актуальной становится задача использования таких внешних воздействий, как акустические колебания для управления структурой и механическими свойствами сплавов.

Разработанные методы лазерной и лазерно-акустической сварки предлагают уникальную технологию соединения труб, обеспечивающих равномерную структуру сварного шва и отсутствие дефектов типа пор и трещин, делая тему данной работы актуальной. Вопросы, связанные с управлением структурой металла в процессе лазерной сварки, изучены достаточно слабо.

Актуальность выбранной темы исследования подтверждена ее выполнением в рамках проекта Российского научного фонда № 23-29-00219, Государственного задания №9.3236.2017/4.6, Госконтракта по постановлению 220 №14.з50.31.0023, Российского научного фонда №19-79-00039, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3745.2019.8 и Российского фонда фундаментальных исследований 16-33-80016 мол_эв_а.

Степень разработанности темы исследования

Свойства сварных соединений на основе экспериментальных и теоретических исследований в области лазерной сварки и технологий обработки материалов изучались такими отечественными и зарубежными учеными, как Б.Е. Патон, Б.Е. Алешин, Е.М. Вышемирский, Г.А. Абильситов, С.А. Астапчик, Г.И. Бровер, А.А. Веденов, В.П. Вейко, Н.В. Грязева, А.Н. Грязев, А.Г. Григорянц, Д.Н. Гуреев, А. Гюменюк, Е.Н. Каблов, А. Карлсон, У. Котояма, М. Ламмерс, В.И. Лысак, А.И. Мисюров, М. Ретмайер, А.И. Рудской, А.А. Попович, Н.Н. Рыкалин, И.Ю. Смурров, Г.А. Туричин, А.А. Углов, И.Н. Шиганов, И.В. Шишковский, М. Шмидт, И.А. Ядройцев и др.

Преимуществами лазерной сварки являются отсутствие мест локальных перегревов, снижение дефектов типа пор и трещин и минимальные структурные изменения материала. Управление структурой и свойствами сварных швов с помощью внешних акустических воздействий позволит сократить время сварки, снизить стоимость, а также избавит от необходимости дополнительной постобработки сварного шва.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение характеристик прочности и пластичности сварных швов при лазерной сварке трубных сталей путем воздействия ультразвуковыми колебаниями в интервале частот от 15 до 100 кГц.

Задачи работы:

- 1) установление закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов, получаемых в процессе лазерной сварки конструкционных трубных сталей с дополнительным воздействием ультразвуковыми колебаниями;
- 2) установка влияния ультразвуковых колебаний на форму сварного шва, зону термического влияния, морфологию и ориентацию зерен, распределение химических элементов, пористость, микротвердость и прочность стали 12Х18Н10Т;
- 3) установление влияния мощности лазерного излучения и частоты ультразвуковых колебаний на структуру, свойства и химический состав металла сварных швов из сплава 09Г2С;

4) разработка технологической схемы лазерно-акустической сварки труб для обеспечения однородной микроструктуры и химического состава в металле сварного шва сплава 09Г2С путем варьирования параметрами сварки с добавлением присадочной проволоки 09Г2С, с применением акустических колебаний.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.6.17 «Материаловедение» ВАК Минобрнауки РФ (технические науки) и подпунктами 1, 3, 4.

1. Разработка новых металлических, неметаллических, гетерогенных и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, медицинской, легкой, текстильной, строительной областей промышленности).

3. Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических, неметаллических, гетерогенных и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, биомедицинскими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой.

4. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических, и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды.

Научная новизна исследования

1. Установлено, что лазерная сварка конструкционных трубных сталей с применением акустических колебаний с частотой 22 – 80 кГц и мощностью

1,5 кВт позволяет получать сварные швы с пониженной химической неоднородностью, уменьшенным в 1,5 – 2 раза размером зерен и неметаллических включений, сниженным количеством газовых пор, увеличенными характеристиками прочности до 20% (п.1 паспорта специальности 2.6.17).

2. Установлено, что применение акустических колебаний с частотой 80 кГц и мощностью 1,5 кВт в процессе лазерной сварки сталей 12Х18Н10Т позволяет снизить химическую неоднородность в объеме сварного шва до 15%, размер пластинчатых включений δ -феррита в 1,5 – 2 раза и увеличить прочность сварных швов при испытаниях на изгиб в 1,5 раза (п.4 паспорта специальности 2.6.17).

3. Установлено, что введение ультразвуковых колебаний с частотой 22 кГц и мощностью 1,5 кВт в зону сварного шва в процессе лазерно-акустической сварки и наплавки стали 09Г2С позволяет увеличить прочность сварных швов при испытаниях на статическое растяжение в 1,3 раза, снизить пористость в 3-5 раз и размер зерен в структуре металла в 3 раза (п.3 паспорта специальности 2.6.17).

4. Теоретически и экспериментально показана возможность получения сварного шва из стали 09Г2С при сварке насосно-компрессорных труб, что достигается лазерной сваркой с дополнительным воздействием ультразвуковыми колебаниями с частотой колебаний 22 кГц и мощностью 1,5 кВт, что позволяет увеличить глубину проплавления основного металла в 2 раза, а ширину ванны расплава снизить в 1,2 раза (п.1 паспорта специальности 2.6.17).

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов с учетом дополнительного воздействия ультразвуковых колебаний в зону плавления. Изучено влияние технологических параметров сварки и ультразвуковых колебаний на химический состав, структуру и свойства сварных швов насосно-компрессорных труб.

Практическая значимость работы: изучение закономерностей образования дендритной структуры сварных швов, способов регулирования размерами зон термического влияния; устранение ликвации за счет ультразвукового воздействия

на зону лазерного плавления; разработка технологической схемы сварки отбракованных, бывших в употреблении насосно-компрессорных труб класса прочности «Д» для нефтяной промышленности с применением излучения волоконного лазера и дополнительных ультразвуковых воздействий. Разработаны программы ЭВМ: Пр. ЭВМ №2020662243 – для управления процессом лазерно-акустической сварки; Пр. ЭВМ №2019619392 – для управления процессом лазерной сварки с присадочной проволокой, кронштейнов с соединением типа «шип-паз», на роботизированном комплексе; Пр. ЭВМ №2019619138 – для управления процессом гибридной лазерной сварки на роботизированном комплексе; Пр. ЭВМ №2019619137 – «Программа лазерной сварки кронштейнов с соединением типа "шип-паз"».

Предложенные в работе технические решения, основанные на фрагментации дельта феррита и снижении пористости в нержавеющей стали из-за введения ультразвуковых колебаний в процессе лазерной сварки позволили увеличить прочностные характеристики сварных швов насосно-компрессорных труб в 1,5 раза. Результаты исследования микроструктуры сварных швов, химического состава и механических свойств сварных швов, полученных методом лазерной сварки с дополнительным акустическим воздействием, и технологическая схема лазерной сварки бывших в употреблении насосно-компрессорных труб для нефтяной промышленности «Разработка и исследование методикистыковки отбракованных коротких НКТ с помощью лазерной сварки (ЛС)» переданы в рамках договора НИОКР компании ООО «ТЕХНОФОРДЖ», а также включены в учебный процесс при проведении производственной и учебной практик на кафедре лазерных и аддитивных технологий Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева.

Методология и методы исследования

Методология: разработка способов и устройств, исследование состава, структуры и свойств сплавов, формулировка гипотез.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием экспериментальных методов исследования. Металлографические исследования

структур производились с помощью оптического универсального инвертированного микроскопа Axiovert-200M. Испытания механических свойств проводились на маятниковом копре Instron 600MPX и разрывной машине Instron 5884 в соответствии с требованиями ГОСТ. Замер твердости производился на микротвердомере НХ-1000ТМ. Контроль внутренних дефектов осуществлялся при помощи компьютерной 3D-томографии NSI X5000. Работы по лазерной сварке труб производились на установке гибридной лазерной сварки LaserWeld 30 R120, оснащенной роботом-манипулятором KUKA KR 120 R2700 extra HA, и иттербийевым волоконным лазером ЛС-30 производства IPG Photonics. Воздействие ультразвуковыми волнами осуществлялось аппаратом U-Sonic. Исследования проводились в лаборатории кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Информационная база исследования

Информационную базу данного исследования составили работы теоретического и экспериментального характера, включающие монографии, научные статьи отечественных и зарубежных исследователей по анализируемой проблематике, профильных научных организаций и предприятий.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования сварных швов свариваемых насосно-компрессорных труб, полученные лазерной сваркой в один и два прохода.
2. Технологическая схема двухпроходной сварки, при которой осуществляется первый (основной) провар труб на всю толщину на высокой мощности, а во втором проходе наплавляется проволока на шов для устранения усадочной ванны.
3. Метод устранения сквозного канала, образующегося в месте начала сварки, при помощи импульса мощностью 10 кВт и длительностью 30 мс.
4. Результаты исследования микроструктуры и химического состава сварных швов из стали 09Г2С и 12Х18Н10Т, полученных методом лазерной сварки.
5. Технологическая схема обработки ультразвуковыми колебаниями образцов в процессе сварки и послойного выращивания методом лазерной наплавки с использованием проволоки.

6. Метод фрагментации пластин δ -феррита за счет введения ультразвуковых колебаний с частотой 80 кГц и мощностью 1,5 кВт в зону сварного шва в процессе лазерной сварки.

7. Результаты исследования структуры и свойств образцов, сваренных при воздействии акустическими колебаниями с мощностью 1,5 кВт и частотой 22, 40, 60, 80 и 100 кГц.

Достоверность полученных результатов и выводов базируется на проведенных экспериментальных исследованиях, согласовании полученных данных между собой и на опубликованных результатах теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева. Изложены в отчетах в рамках договора НИОКР «Разработка и исследование методикистыковки отбракованных коротких НКТ с помощью лазерной сварки». Результаты работы доложены на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (Казань, 2016); V Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», (2019, Москва); международной молодежной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2019); XII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения» (Москва, 2020).

Личный вклад автора заключается в постановке проблемы, выборе направления и методов исследования, получении, научном анализе, обобщении и интерпретации экспериментальных данных. Совместно с научным руководителем д.т.н., доцентом Горуновым А.И. сформулированы цели и задачи исследования. Изложенные в диссертации результаты подтверждаются самостоятельными исследованиями автора для решения ряда важнейших прикладных задач

промышленности, имеющих большое хозяйственное значение, что заключается в создании и внедрении новых способов лазерной и лазерно-акустической сварки труб с целью повышения их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Публикации по теме исследования. Результаты работы отражены в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях, входящих в перечень научных журналов и изданий рекомендованных в ВАК Минобрнауки России по специальности 2.6.17 – Материаловедение, в 2 статьях научных журналах, индексируемых научометрическими базами Web of Science и Scopus, получены 4 сертификата программы ЭВМ, остальные – в статьях и материалах конференции различного уровня.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы из 146 источников. Работа изложена на 132 страницах, включая 70 рисунков и 17 таблиц.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность работы и научная новизна.

В **главе 1** проведен обширный литературный обзор, посвященный методам и оборудованию, используемого для сварки различных материалов и толщин с применением различных источников концентрированной энергии. Изучены преимущества и недостатки лазерной сварки по сравнению с такими методами сварки, как электродуговая, газовая, контактная сварки и сварка под флюсом, а также выявлено преимущество иттербийевых волоконных лазеров по сравнению с CO₂ и твердотельными лазерами.

Анализ литературных источников по сварке показал, что классические методы автоматической сварки трубных сталей достаточно изучены и хорошо зарекомендовали себя на производстве благодаря сочетанию простоты и приемлемого качества сварных швов. Однако эти технологии имеют общие недостатки – введение большого количества тепла в зону сварки создает обширную зону плавления, разделка кромок перед сваркой обеспечивает возможности сваривания образцов больших толщин и увеличения времени процесса. Дополнительное время, оборудование и большие объемы присадочного материала для заполнения проточки в совокупности удорожает процесс создания неразъемного соединения. Существующие технологии классической сварки подразумевают высокие значения тепловложения и погонной энергии, что вызывает формирование грубой крупнозернистой структуры в шве и околошовной зоне, способствует образованию холодных и горячих трещин, снижению ударной вязкости.

С указанными недостатками в настоящее время частично справляются методы лазерной сварки. Применение лазерного излучения в сварке позволяет

увеличить производительность, убрать необходимость в проточке в ряде случаев, тем самым экономить на материалах и времени изготовления продукции. При этом использование дополнительных внешних ультразвуковых воздействий позволяет получать благоприятное сочетание структуры и механических свойств в сварном шве и в окколошовной зоне термического влияния. На основе проведенного анализа определена цель и сформулированы задачи исследования.

В **главе 2** приведено описание методик исследования, применяемого оборудования и материалов. В работе использовались насосно-компрессорные трубы группы прочности «Д» из высокоуглеродистой стали, являющиеся условно свариваемыми. В качестве присадочного материала применялась присадочная сварочная проволока 09Г2С диаметром 1,2 мм. Для изучения влияния разных ультразвуковых колебаний на процесс лазерной сварки использовались листы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Работы по лазерной сварке и наплавке производились при помощи робота-манипулятора KUKA KR 120 R2700 extra HA, с закрепленной на нем оптической сварочной головкой KUGLER, обеспечивающей фокусировку лазерного луча и возможность его колебания за счет встроенного сканатора. В качестве источника излучения используется иттербийевый волоконный лазер серии ЛС, обеспечивающий КПД до 30% при мощности до 30 кВт. Комплекс также оснащен системой подачи проволоки Fronius и подготовки газов WITT KM 20-3. Для контроля внутренних дефектов – пор, трещин – использовался компьютерный промышленный 3D-томограф NSI X5000. Испытания на растяжение сварного соединения выполняли на машине Instron 5884. Для металлографических исследований использовали оптический микроскоп Axiovert-200M. Измерение твердости проводили на автоматическом твердомере НХ-1000ТМ. Воздействие ультразвуковых колебаний осуществлялось при помощи аппаратов U-Sonic с собственной частотой колебаний волноводов 15, 22, 40, 80 и 100 кГц.

В **главе 3** представлена технологическая схема лазерной сварки бывших в употреблении насосно-компрессорных труб для нефтяной промышленности.

В ходе лазерной сварки варьировали такие параметры процесса, как скорость перемещения лазера относительно поверхности образцов, мощность излучения, расход защитного газа, смещение фокусного расстояния, а также скорость подачи присадочной проволоки. Изменение фокусного расстояния позволяло получать изменение площади лазерного сфокусированного пучка. Соответственно менялось значение плотности энергии пучка, приходящееся на квадратный сантиметр площади. Данный параметр оказывает значительное влияние на степень провара. Скорость подачи проволоки позволяла варьировать параметры наплавляемого валика на сварном шве.

При сварке насосно-компрессорных труб было принято решение производить их проточку на торцах для выравнивания окружности и удаления загрязнений. Эта подготовительная операция необходима для достижения хорошей повторяемости свариваемости труб.

Для установления зоны провара металла были: изготовлены линейные сегменты труб из имеющихся заготовок (сегменты прошли механическую зачистку поверхности и обезжиривание); установлены режимы сварки и проварены сегменты; построены графики провара при различных смещениях фокусного расстояния относительно поверхности. Данные эксперименты проводились без применения присадочной проволоки. Выявлялись области, соответствующие провару металла без дефектов. Отсутствие трещин, непровар, поры и свищи выявлялись методом рентгенографии на каждом этапе сварки. Лазерная сварка проводилась в два этапа: на первом осуществлялась сварка трубы лазером, на втором – наплавка проволоки поверх предварительно полученного сварного шва. При этом происходил небольшой отпуск, что оказалось благоприятное влияние на механические свойства шва и околосшовной зоны.

Так как трубы – бывшие в употреблении, толщина стенки зачастую могла оказаться меньше, чем предполагалось после проточки. Толщина стенки труб варьировалась от 4,5 до 5,0 мм. Как следствие, была подобрана мощность лазерного излучения в соответствии с толщиной для каждого случая индивидуально.

Мощность лазерного излучения периодически изменяется, потому что при первом и втором проходах необходимы разная мощность излучения и ее снижение мощности при прогреве трубы во время термического воздействия в процессе сварки.

Использование постоянной мощности лазерного излучения приводило к разогреву детали, нарушению стабильности процесса лазерной сварки на последней четверти диаметра трубы, появлению пор размером более 100 мкм.

Появление пористости в сварном шве объясняется нехваткой присадочного материала, вследствие которой обнаруживались пустоты. Увеличение скорости подачи проволоки в сварочном шве привело к заполнению пустот (пор). Скорость подачи проволоки была увеличена с 2,2 до 3,0 мм/с. Для успешного плавления большего объема присадочного материала также была увеличена мощность. Скорость подачи проволоки для получения сварного шва с минимальным количеством пор составила 3 м/с.

После лазерной сварки трубы разрезались, осуществлялась подготовка микрошлифов, проведение исследований на оптическом и электронном микроскопе и механических испытаний сварного соединения. Сварочный шов первого прохода состоит из расплавленного металла трубы, перемешанного с проволокой. Наблюдается крупная литая структура с большими пластинами, идущими в направлении от основного металла к центру шва. Твердость данной зоны составляет 370-421 HV₍₁₀₎. Слой наплавленной проволоки поверх основного шва состоит только из металла расплавленной проволоки 09Г2С и имеет твердость 280-313 HV₍₁₀₎. Материал трубы, находившийся непосредственно в контакте с ванной расплава, получил недостаточную температуру для перехода в жидкую фазу. Резкий нагрев с длительным воздействием вызвал рост зерна металла в результате отпуска. При этом эти зоны обладают максимальной твердостью в шве и составили 493-547 HV₍₁₀₎. Зона термического влияния также получила сильный нагрев и вследствие упрочнилась до 320-353 HV₍₁₀₎. Твердость основного металла трубы 210-232 HV₍₁₀₎.

Механические испытания показали, что среднее значение предела прочности при разрыве образца основного металла 661,5 МПа, а среднее значение предела прочности при разрыве образцов со швом 637,4 МПа. Значение предела прочности при разрыве образцов со швом составило на 4% меньше, чем значение в образцах без шва.

Отправленные в ООО «ТЕХНОФОРДЖ» три трубы были исследованы сотрудниками «ТЕХНОФОРДЖ» на герметичность: одна сторона трубы заваривалась, ко второй пристыковывалась установка, заполнявшая трубу техническим маслом и накачивавшая давление. Были проведены две тестовые закачки. В первой трубе выдержали 300 атм, во второй было создано давление в 700 атм. Сварное соединение трех труб такое давление выдержало, что говорит о высокой стойкости сварных соединений к подобным нагрузкам. В качестве эксперимента сваренные в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева насосно-компрессорные трубы были установлены в скважины и по сегодняшний день продолжают работу.

В главе 4 показаны результаты исследования, связанные с улучшением механических характеристик сварного соединения при термообработке и воздействии ультразвуковых колебаний.

В процессе формирования наплавочного валика в нижней части наблюдается сужение и валик вытягивается. Данный эффект вызван ультразвуковыми колебаниями, оказывающими значительное влияние при увеличении их частоты с 15 до 22 кГц. При этом достигается вытягивание сварочной ванны на всю глубину свариваемой заготовки при тех же параметрах сварки. При этом ширина сварочной ванны снижается в 1,2 раза.

Предел прочности таких образцов остается соответствующим основному металлу, по которому происходит разрушение при растяжении.

Микроструктура представляет собой зерна феррита и перлита. При этом на поверхности сварного шва обнаруживаются небольшие участки мартенсита и верхнего бейнита. Образцы подвергали термической обработке – закалке и отпуску.

Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 760 °С и с последующим охлаждением на воздухе, приводит к гомогенизации структуры металла. При этом размер зерен снижается относительно исходного состояния металла.

Закалка в воду обеспечивает появление игл верхнего бейнита. При этом значения твердости возрастают в три раза относительно исходного состояния образцов без термообработки.

Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 920 °С и последующим охлаждением на воздухе, приводит к появлению крупных перлитных зерен. Предполагается, что после такой обработки на двухфазную структуру образцы материалов, изготовленные прямым лазерным выращиванием из проволоки, будут иметь повышенный предел выносливости; одновременно примерно в 3–3,5 раза увеличится число циклов до разрушения в области малоцикловой усталости.

Исходные данные для выращивания образцов с боковой подачей проволоки аддитивным методом: материал проволоки 09Г2С; толщина проволоки 1,2 мм; материал подложки Сталь 40; размер подложки 100x200x20 мм; температура окружающей среды при проведении эксперимента 26 °С. Далее исследовался характер разрушения компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки 09Г2С, используемой в процессе лазерной сварки, с использованием ультразвука и без.

Предел прочности и пластичность образцов, полученных с применением ультразвуковой обработки, повышаются практически в 1,5 раза. В данном случае такой эффект можно объяснить ориентированной структурой в поверхностных слоях полученных образцов. Тонкая пластинчатая структура формируется в результате ультразвукового воздействия.

Ультразвуковая обработка образцов позволила сформировать в поверхности образцов слой толщиной 50 мкм, который оказывает значительное сопротивление

разрушению. В призматических образцах зарождение трещин начинается с поверхности. В данном случае ультразвуковая обработка позволяет задавать ориентировку зерен, поэтому необходимо учитывать направление приложения растягивающей нагрузки и осуществлять ультразвуковую обработку целенаправленно для заданной ориентации либо по различным направлениям одновременно.

В главе 4 также исследуется влияние ультразвуковых колебаний с различной частотой на формирование сварного шва в стали 12Х18Н10Т. Звуковые колебания вводились в широком диапазоне частот: 15 (ниже ультразвука), 22, 40, 80 и 100 кГц.

Форма сварных швов во всех случаях одинакова с некоторыми изменениями геометрических размеров, однако структура и размеры сварного шва значительно меняются при воздействии акустического поля на звуковой частоте 15 кГц. Небольшое увеличение твердости в центральной части сварного шва наблюдается без воздействия акустической вибрации. Применение акустических колебаний с частотой 15 кГц во время лазерной сварки приводит к увеличению твердости. Это можно объяснить неравномерной локализацией участков аустенита и феррита. В то же время явно выражены вытянутые чередующиеся светлые и темные полосы различного травления. Верхняя и нижняя части шва выступают из поверхности заготовки примерно на 1000 мкм, что в три раза больше, чем на образцах без наложенных акустических колебаний. Все это приводит к значительному уменьшению ширины шва по сравнению с шириной на других частотах.

Применение акустической вибрации с частотой 40 кГц дает такой же эффект, как и применение акустических колебаний с частотой 15 кГц, однако темные и светлые полосы стали тоньше, а их число значительно увеличилось. Наиболее равномерное распределение твердости в сварном шве наблюдается при воздействии акустических колебаний с частотой 80 кГц. В то же время увеличение частоты колебаний до 100 кГц приводит к снижению равногого распределения твердости в центральной части сварного шва. Анализ среднего

значения твердости сварных швов по всей площади показывает уменьшение разброса твердости с увеличением частоты акустических колебаний.

Наличие пор обнаруживается в образцах, сваренных лазерной сваркой без акустических воздействий. Применение акустических колебаний приводит к значительному уменьшению количества пор и их размеров. Но самое интересное, что при 80 кГц поры не обнаруживаются. Для проверки воспроизводимости результатов эксперименты повторялись три раза, результаты томографии повторили отсутствие обнаруживаемых пор при 80 кГц.

Введение звуковых колебаний с частотой 15 кГц приводит к образованию темных (феррит + бейнит) и светлых (аустенит) полос различного травления. Ширина составляет около 50 и 100 мкм для темных и светлых полос соответственно. Сварной шов, полученный под действием акустических колебаний 40 кГц, имеет светлые и темные полосы 20 и 50 мкм соответственно. В сварном шве вдоль плавления имеется протяженный участок с крупными зернами. Максимальная ширина этой зоны составляет 210 мкм у сварного шва, полученного без дополнительного воздействия акустических колебаний. У сварного соединения с колебаниями 22 кГц эта зона составляет 170. Шов с дополнительным воздействием ультразвуковых колебаний 80 кГц – ширина этой области плохо просматривается и составляет 20–70 мкм. При воздействии акустических колебаний с частотой 100 кГц структура шва однородна и четких границ между структурными зонами не обнаруживается.

При детальном изучении микроструктуры металла, полученного в результате сварки с применением акустических колебаний, можно видеть, что в микроструктуре сварного шва наблюдается пластина δ-феррита, размер пластины составляет до 50 мкм. Воздействие акустических колебаний с частотой 15 кГц на ванну жидкого расплава при лазерной сварке существенно влияет на формирование структуры. Светлые и темные полосы, упомянутые ранее при микроанализе, представляют собой области аустенита и феррита + бейнита соответственно. Воздействие акустических колебаний с частотой 22 кГц и мощностью 1,5 кВт на ванну жидкого расплава во время лазерной сварки

приводит к фрагментации пластин δ -феррита, величина которых составляет 5-10 мкм, что в 10 раз меньше, чем пластина δ -феррита, полученная сваркой без использования ультразвука. Приложение акустических колебаний 100 кГц к ванне расплава при лазерной сварке позволяет получить участки высокодисперсного игольчатого феррита на фоне аустенитной матрицы.

Важным вопросом является то, как изменения микроструктуры сварного шва, вызванные ультразвуковой обработкой, влияют на его механические свойства. Испытание на трехточечный изгиб показало, что все испытанные образцы имели хорошие пластические характеристики. Однако все образцы, сваренные с применением ультразвуковых колебаний, показали хорошую стойкость к разрушению при изгибе. Максимальное значение прочности достигается при сварке образцов на частотах 80 и 40 кГц, однако величина смещения образца, сваренного на частоте 80 кГц, имеет максимальное значение относительно других образцов. Снижение пластичности образца, сваренного при 40 и 100 кГц относительно образца, сваренного при 80 кГц, можно объяснить наличием пор и трещин. Напряжения и смещения образцов, сваренных с ультразвуковыми колебаниями частотой 80 кГц, соответственно в 1,3 и 1,5 раза выше по сравнению с образцом, сваренным без обработки ультразвуком. Предположительно, повышение пластичности и прочности связано с отмеченным снижением пористости, фрагментацией пластин δ -феррита и снижением химической неоднородности в сварном шве.

Глава 1 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ СВАРКИ

Задача данного исследования – разработка технологической схемы гибридной сварки труб для нефтяной отрасли. Наряду с этим возникает актуальная задача изучения механических свойств металлов, полученных методами лазерной сварки, наплавки. Особый интерес вызывают вопросы, связанные с изучением свойств и структуры образцов, выращиваемых из проволоки с дополнительным воздействием ультразвуковых колебаний.

1.1 Особенности сварки концентрированными источниками энергии

Лазерная сварка зарекомендовала себя в качестве важного промышленного процесса производства для соединения различных металлических и неметаллических материалов, благодаря повышению эффективности и сокращению издержек в широком спектре отраслей промышленности. Один из основных примеров – автомобильная промышленность [1 – 15].

При лазерной сварке плавление производится за счет тепла, полученного в результате воздействия, концентрированного когерентного светового пучка, падающего на поверхность заготовки или образца [16 – 18]. Лазерный луч может быть сфокусирован в маленькую точку на поверхности, что приводит к высокой концентрации энергии, при этом часть энергии поглощается, а часть преобразуется в тепло. Увеличение интенсивности лазерного луча ведет к увеличению плотности энергии, материал нагревается до точки плавления, тем самым происходит сварка плавлением [19 – 22]. Несмотря на то, что большую роль в лазерной сварке играет мощность излучения, взаимодействие между лучом

и заготовкой, в основном, зависят от плотности мощности пучка (мощность на единицу площади) [23, 24]. В зависимости от воздействия плотности мощности лазерного излучения на свариваемую поверхность существуют два различных режима сварки: режим расплава поверхности и режим глубокого проникновения (сквозного проникновения) [25 – 27].

Сварка оплавлением (рисунок 1.1) заключается в поглощении энергии лазерного луча поверхностью материала и, как следствие, в переносе энергии в материал механизмами теплопроводимости [28 – 30]. Обычно этот режим сварки связан с низкой плотностью энергии пятна: 1000 кВт/мм², т.е. малая интенсивность пучка или большой диаметр пятна. Сварные швы, полученные способом оплавления поверхности, характеризуются низкой глубиной провара к ширине. Данный режим применяется там, где требуется сварка с ограниченным проникновением [31 – 34]. Этот режим оптимальный для соединения тонких пластин (например, 0,025-1,5 мм), точных сварных швов при низкой мощности или для соединения толстостенных секций до 3 мм, при более высокой мощности [35 – 37].

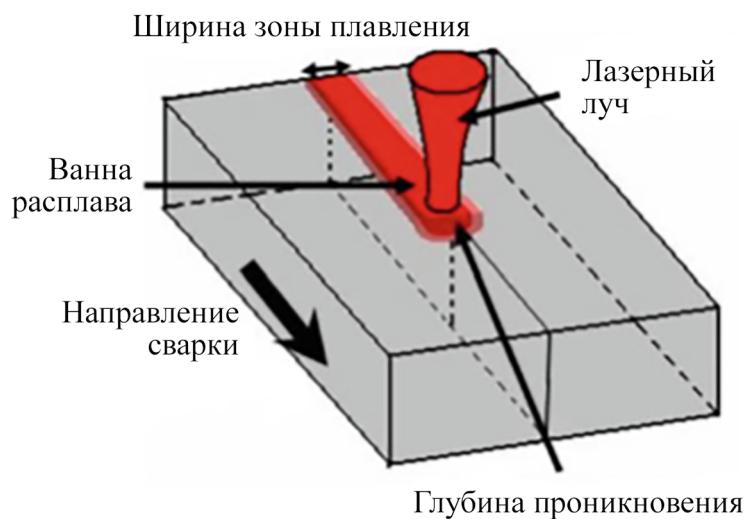


Рисунок 1.1 – Схема сварки оплавлением

Для глубокой сварки требуется очень высокая плотность мощности приблизительно в 1 МВт на квадратный сантиметр. В этом случае лазерный луч не просто расплавляет металл, а переводит его в состояние пара [38].

Отходящий пар оказывает давление на расплав и частично вытесняет его. Зона расплавления заготовки увеличивается. Формируется узкое глубокое отверстие, заполненное паром, – паровой капилляр, называемый также замочной скважиной (англ. keyhole). Стенки парового капилляра состоят из расплава металла. При перемещении лазерного луча по месту сварки паровой капилляр движется вместе с ним через заготовку [39 – 41]. Расплав металла обтекает паровой капилляр и застывает в задней его части. Так образуется тонкий, глубокий сварной шов с равномерной структурой. Глубина сварного шва может превышать ширину более чем в 10 раз, достигая значения до 25 миллиметров. Лазер многократно отражается от стенок парового капилляра, состоящих из расплава [42, 43]. При этом расплав почти полностью поглощает луч и КПД процесса сварки повышается. При использовании лазеров пар в замочной скважине ионизируется. В данном случае образуется плазма, что приводит к поступлению дополнительной энергии в заготовку [44, 45]. Поэтому глубокая сварка характеризуется высоким КПД и значительной скоростью сваривания. Высокая скорость обработки способствует ограничению размеров зоны теплового воздействия и защите детали от деформации. Данная технология применяется в случаях, требующих глубокого проплавления или одновременного сваривания нескольких слоев материала [46, 47].

1.2 Структура и свойства сварного шва при сварке оплавлением

При глубокой сварке с проникновением пучок фокусируется для генерации высокой плотности энергии на поверхности обрабатываемой детали, достаточной для парообразования материала. Узкий и глубокий паровой канал, или замочная скважина, формируется путем многократного внутреннего отражения луча. Принцип глубокой сварки представлен на рисунке 1.2. Замочная скважина, окруженная расплавленным материалом, остается стабильной в процессе сварки за счет равновесия открывающих сил, возникающих от воздействия на материал и образования плазмы, и сил, вызванных поверхностным натяжением и

гидростатическим давлением ванны расплава [48]. Сварной шов формируется за счет перемещения луча относительно обрабатываемой детали. Расплавленный металл, окружающий паровой канал, притягивается поверхностным натяжением или капиллярными силами и заполняет полость задней кромки сварочной ванны. Чтобы сохранить это равновесие, определяются практические минимальные и максимальные скорости для сварки методом замочной скважины: превышение скорости – к захлопыванию замочной скважины, а низкие скорости – к широкому сварному шву с дефектами провисания. В результате достигается узкий сварной шов, характеризуемый большим отношением глубины к ширине. В сварке с полным проплавом зона термического влияния (ЗТВ) мала и сварной шов параллелен, в то время как в сварке с оплавлением поверхности он напоминает шов классической сварки. Сварка паровым каналом отлично подходит для сварки, где требуется глубокое проплавление, и этот режим наиболее часто используется в лазерной сварке.

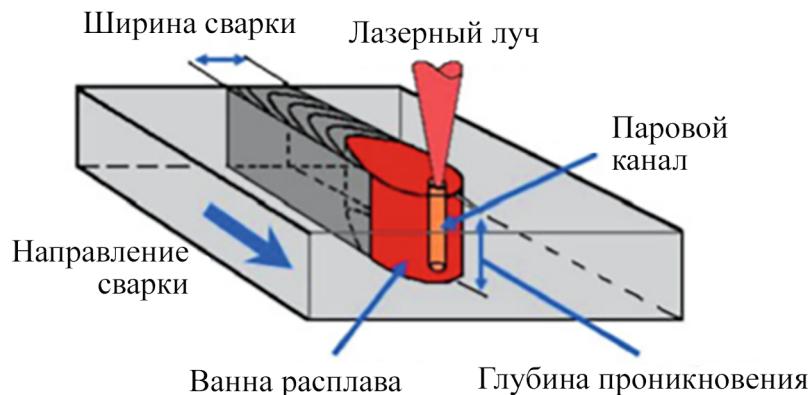


Рисунок 1.2 – Схема глубокой сварки

Сканирующая сварка позволяет создавать высокопроизводительные гибкие установки, осуществляющие серийную сварку быстрее, точнее и экономически эффективнее, чем обычные сварочные системы.

При сканирующей сварке луч направляется подвижными зеркалами. Ведение луча осуществляется за счет изменения углового положения зеркал. Возникает поле обработки, позволяющее выполнять высокодинамичную и точную сварку. Размер поля зависит от рабочего расстояния и угла отклонения.

Скорость обработки и диаметр фокуса на заготовке зависят от проецирующих характеристик оптики, угла падения луча, материала и качества лазерного луча. Перемещение дополнительной системы линз позволяет предельно динамично смещать фокус в направлении Z для комплексной обработки трехмерных деталей без перемещения обрабатывающей головки или заготовки. Благодаря очень быстрым перемещениям вспомогательное время сводится практически к нулю, лазерное устройство занято обработкой почти на 100 % от доступного производственного времени.

Кроме прочих возможностей, сканирующую оптику можно закрепить на роботе для перемещения ее над заготовкой во время сварки. Это «летящее» движения стало основой понятия «Welding-on-the-fly»: робот и сканирующая оптика взаимно синхронизируют свои движения в режиме реального времени. Применение робота значительно увеличивает рабочую зону и позволяет осуществлять полноценную трехмерную обработку деталей.

Сварка лазерным лучом имеет много преимуществ по сравнению с другими процессами сварки, а также представляет некоторые ограничения. Некоторые ключевые *преимущества*:

- основная характеристика лазерного луча – его высокая энергия в фокусе, что делает доступными швы высокой точности и чистоты, обладающие высокой глубиной проникновения. Наличие высокомощностных лазеров позволяет осуществлять высокоскоростную сварку, сохраняя глубину проникновения, в одиночных сварных швах. При высоких скоростях сварки возможно получение качественного сварного шва без подготовки кромок даже при сварке тонких материалов;

- в результате фокусирования высокой энергии в точку, подводимого тепла во время лазерной сварки меньше, по сравнению с обычными процессами сварки, что обеспечивает узкую зону термического влияния. Это условие делает процесс подходящим для соединения чувствительных к нагреванию компонентов, таких как электронные устройства. Поскольку происходит малое поступление тепла, термическое искажение заготовки сводится к минимуму, что несет за собой ненадобность в постобработке;

- лазерная сварка не является контактным процессом сварки и в сочетании с тем, что ее легко автоматизировать, делает этот процесс очень гибким, обеспечивая высокую доступность к обрабатываемой детали, по сравнению с другими сварочными процессами – точечной и дуговой сварками. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что один лазер может совместно использоваться на нескольких рабочих установках, что повышает производительность. Высокая скорость сварки, гибкость и повторяемость делают процесс лазерной сварки подходящим для производственных процессов с большими объемами, например в автомобильной промышленности;
- широкий спектр материалов и технологий, позволяющих сваривать даже разнородные материалы;
- универсальность – главное преимущество лазерной сварки из-за ее пригодности при сварке больших конструкций, а также микросварных швов в микроэлектронной промышленности.

Однако лазерная сварка также имеет и некоторые *недостатки*:

- лазерное оборудование, а также рабочие станции лазерной сварки требуют высоких инвестиционных затрат. Лазерные источники высокой мощности являются дорогостоящими и требуют условий безопасности, таких как водонепроницаемость установки лазерного излучения, что увеличивает конечные затраты;
- несмотря на то, что новые лазерные источники имеют более высокую эффективность преобразования энергии по сравнению со старыми источниками, (30% диодной накачки против 4% неодимовых лазеров), потребление энергии высоко по сравнению с другими методами сварки;
- небольшой размер сфокусированного пятна лазерного луча ограничивает допуск лазерной сварки к совместному позиционированию. Совместная подгонка и, следовательно, фиксация, имеют решающее значение для лазерной сварки. В некоторых случаях должен быть добавлен присадочный материал для обеспечения адекватного сварного шва;

- высокая скорость охлаждения лазерных сварных швов, связанных с высокой скоростью сварки, может привести к образованию трещин или хрупких фаз.

1.3 Влияние технологических параметров на структуру, свойства и дефекты сварных швов

Лазерная сварка требует оптимизации различных технологических параметров. В дополнение к типу лазера процесс лазерной сварки зависит от различных параметров – обработки факторов геометрии и экранирующих условий газа. Оптимизация этих параметров сварки определяет условие сварки для каждого приложения в соответствии с определенными правилами или стандартами.

Основные параметры сварки, влияющие на процесс лазерной сварки, – мощность лазера, скорость сварки и плотность энергии на поверхности заготовки – зависят друг от друга, т.е. с высокой плотностью энергии обеспечивают более высокую скорость сварки, сохраняя мощность лазера постоянной, и оказывают влияние на геометрию сварного шва и глубину проникновения. Увеличение мощности лазера приводит к повышенной глубине проникновения.

Увеличение проникновения также может быть достигнуто посредством уменьшения скорости сварки. Первоначально (от 100 до 60 мм/с) глубина проникновения быстро возрастает, уменьшая скорость сварки, тем не менее, при более низких скоростях сварки проникновение не увеличивается с тем же высоким темпом. В этом случае энергия от лазерного луча поглощается расплавленным металлом, происходит поглощение окружающим материалом за счет теплопроводимости. В результате сварной шов шире, а глубина проникновения практически не увеличивается.

С другой стороны, плотность энергии определяется диаметром светового пятна на обрабатываемой детали. При постоянной мощности лазера плотность

энергии выше при меньшем диаметре луча на заготовку и глубина проникновения увеличивается. В волоконных лазерах диаметр пятна на обрабатываемой детали зависит от диаметра волокна, длины фокусировки оптических компонентов системы сварки и рабочего расстояния.

Наклон лазерного луча относительно заготовки также является критическим фактором для процесса лазерной сварки. Следует принимать во внимание, что в лазерной сварке диаметр пятна лазерного луча на поверхности заготовки, как правило, достаточно мал (0,2-0,6 мм), так что минимальные отклонения в позиционировании луча могут привести к сварке с дефектами, такими как отсутствие провара или даже отсутствие сплавления.

Процесс лазерной сварки чувствителен и определяется качеством поверхности кромок свариваемых материалов, которая зависит от подготовки материала, отделки кромок листов и зазоров между листами, а также от расположения, т.е. относительного положения между лазерным лучом и заготовкой. Если поверхности свариваемых заготовок имеют большую неоднородность, то в таком случае даже оптимальные параметры сварки могут привести к формированию сварного шва с различными дефектами, влияющими на воспроизводимость процесса сварки. Качество краев, в основном зависящее от качества резания, оказывает влияние на геометрию сварного шва – получаем выточку, вогнутость корня, провисание или непровар.

Позиционирование листов также является важным фактором в лазерной сварке. Из-за небольшого размера пятна лазерного луча лазерная сварка характеризуется низкой устойчивостью к зазорам, особенно встыковых швах или Т-образных соединениях. Для этих или аналогичных геометрий, когда корень отверстия увеличивается, уменьшается плавление материала и наблюдаются дефекты – подрезание, провисание или даже отсутствие сплавления, если размер разрыва слишком велик. Несмотря на это, чувствительность лазерной сварки к разрывам зависит от ее скорости, диаметра луча и качества пучка. Как правило, при увеличении толщины материала устойчивость к зазорам также увеличивается и эффект подрезания свариваемых поверхностей становится менее выраженным,

чем в тонких материалах. Для получения качественной сварки материалов толщиной до 13 мм допуск зазора должен быть не более 3% от толщины материала.

В различных способах применения лазерной сварки (особенно при использовании достаточно высокой мощности лазера) ионизация пара с поверхности заготовки может привести к генерации плазмы, которая поглощает лазерное излучение и может повлиять на стабильность замочной скважины. Чтобы избежать образования плазмы, используется защитный газ для удаления пара из пучка падающего луча. Кроме того, для сварки активных материалов, таких как титан (в расплавленном состоянии титан сильно реагирует с кислородом, в результате чего происходит окисление металла и, следовательно, потеря свойств материала) использование защитного газа необходимо для избежания окисления сварного шва. Это также относится и к случаям, где необходимо высокое качество сварных швов, сварка специфических компонентов (ядерных и аэрокосмического назначения). В обоих случаях тип газа, относительное положение экранирования направления сварки и угла факела являются основными факторами, влияющими на процесс лазерной сварки. Наиболее распространенные защитные газы, используемые для лазерной сварки, – аргон, гелий (смесь He, Ar), азот и углекислый газ. Как правило, аргон – наиболее часто используемый защитный газ из-за его высокого соотношения между качеством сварки и стоимостью. Гелий дороже аргона, поэтому он используется в работах, где требуется высокое качество, главным образом, для сварки алюминия и титана. Кроме того, чтобы сварить аустенитную нержавеющую сталь и избежать образования пористости, достаточно использовать низкие скорости сварки.

Процесс лазерной сварки, включающий в себя быстрый нагрев и охлаждение, создает деформации и остаточные напряжения в сварных конструкциях. В изделиях с требованием высокой точности, сваренных лазером, деформацию сварного шва и остаточные напряжения необходимо учитывать заранее. В частности, для сварных конструкций из тонкого металла

тепловая деформация и остаточное напряжение оказывают сильное влияние на точность этой структуры, усталостную прочность, потерю силы устойчивости и т.д.

Образование пористости тесно связано со стабильностью замочной скважины и колебанием сварочной ванны в лазерной сварке. Присадочная проволока увеличила нестабильность замочной скважины и сварочной ванны (рисунок 1.3), поэтому в дальнейшем увеличилось количество газовых полостей в сварном шве. Подбор подходящего зазора для стыкового соединения обеспечивает естественный проход для потока жидкого металла, который может ослабить и даже полностью устраниТЬ воздействие присадочной проволоки на формирование замочной скважины. Зазор также обеспечивает проход для выхода пузырей (рисунок 1.4). Таким образом, этот метод значительно уменьшает образование пористости в сварочной ванне. Кроме того, при сварке тонких образцов, если мощности лазера достаточно для формирования замочной скважины со стабильным проникновением через всю толщину, практически невозможно получить сварной шов без пористости из-за закрытия замочной скважины.

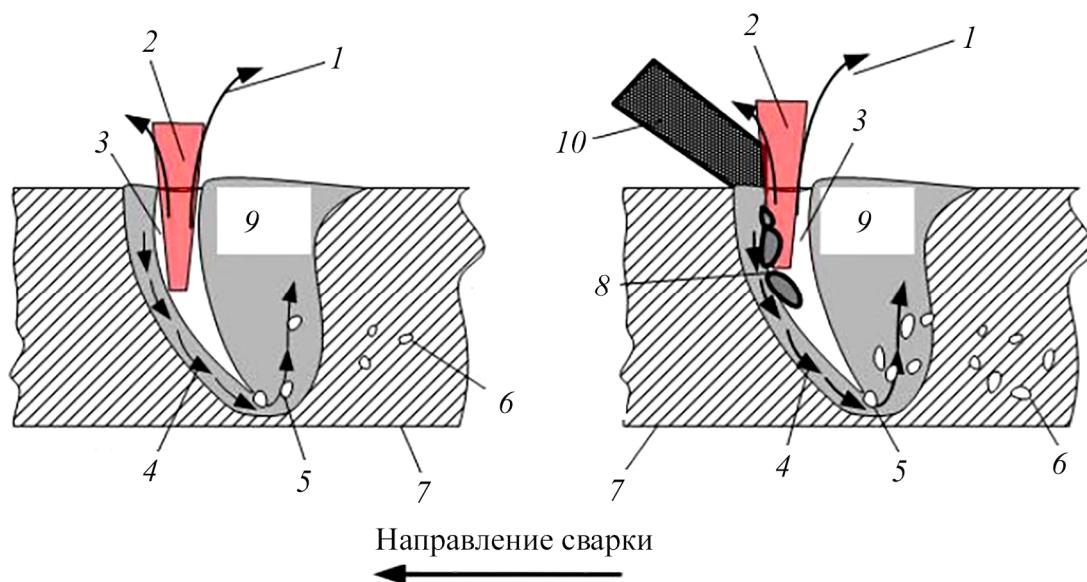


Рисунок 1.3 – Увеличение пористости: 1 – струя металлического пара; 2 – лазерный луч; 3 – сквозное проплавление; 4 – металлический поток; 5 – пузыри; 6 – поры; 7 и 9 – основной металл; 8 – прожог сварного шва; 10 – электрод

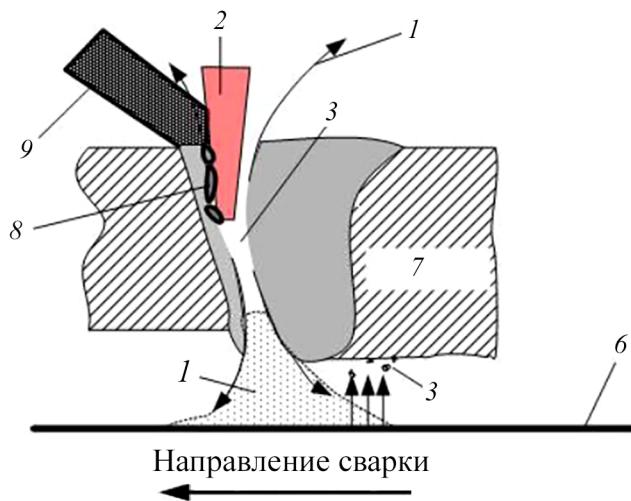


Рисунок 1.4 – Сварка с присадочной проволокой с полным проплавлением:
 1 – струя металлического пара; 2 – лазерный луч; 3 – сквозное проплавление;
 7 – основной металл; 8 – прожог сварного шва; 9 – электрод

Все чаще промышленные лазеры находят применение в производстве, хотя пористость представляет собой серьезную проблему в лазерной сварке высокой мощности, так как это ухудшает механические свойства, в частности, прочность на разрыв и относительное удлинение при растяжении.

Пористость может быть вызвана несколькими причинами: водород, который может быть растворен в основном металле, в присадочной проволоке, в оксидной пленке или может находиться во влажной окружающей среде; нестабильность в замочной скважине; испарение легирующих элементов с низкой температурой кипения; крекинг может иметь место в зоне сварки или в зоне термического влияния. В первом случае образование трещин связано с потерей легирующих элементов или грубого отвердевания микроструктуры, в то время как во втором случае причина заключается в ликвации легирующих элементов с более низкой температурой плавления (алюминий может привести к образованию микротрещин).

При сварке на всю глубину в соединениях «внахлест» проблема стекания металла обусловлена низкой вязкостью расплавленного металла шва, что вызывает дефекты на корневой поверхности сварных швов. Эти дефекты наблюдаются при сварке листов глубиной от 2 мм.

1.4 Влияние внешних воздействий на структуру и свойства сварных соединений

Первые работы по применению лазеров для сварки, опубликованные после 1960-х годов, были направлены на присоединение стыковых и торцевых соединений тонких материалов, где основной задачей было присоединение малых компонентов для электронной промышленности. К 1970 году развитие источников мультикиловаттного СО₂-лазера дало возможность осуществлять глубокую сварку с проплавлением, позволив появиться на свет новым промышленным применением лазерной сварки. Наиболее значительный рост в области сварочных работ лазером, произошедший в течение последних нескольких десятилетий, обусловлен определенными факторами: развитие и доступность перспективных технологий, включающих в себя улучшенное понимание процесса; прогресс в лазерных источниках и системах, а также постоянное развитие и прогресс в технологии лазерной сварки лучом макро- и микрокомпонентов. С развитием лазерных систем высокой мощности лазерная сварка получила возможность соединять толстые секции с более высокой скоростью обработки и улучшением качества сварного шва. В частности, достижения в области твердотельных лазерных технологий дают возможность доставлять луч волоконно-оптическим методом, что обеспечивает более высокую гибкость для использования 3D-сварки.

Преимущества лазерной сварки в сравнении с другими методами указаны в таблице 1.1.

Одно из основных *преимуществ* лазерной сварки – ее пригодность для сварки широкого спектра материалов, металлических или неметаллических, однако теплофизические свойства материалов обеспечивают различное качество сварки. Металлические материалы наиболее изученные для лазерной сварки. Как правило, все традиционно свариваемые металлы также свариваются лазером. Стали с низким содержанием углерода, которые наиболее часто используются во многих отраслях промышленности, обладают по-настоящему хорошей лазерной свариваемостью.

Таблица 1.1 – Методы лазерной сварки

Конкурирующие методы	Преимущества лазерной сварки
Газовая сварка	Быстрее газовой сварки на порядок, с низким уровнем искажений; нет необходимости в присадочном металле; однопроходная двусторонняя сварка
Сварка флюсом	Быстрее обычной сварки; низкий уровень искажений, нет необходимости потока или наполнителя
Контактная сварка	Бесконтактная; необходимо устранить любые посторонние частицы; может быть использована в недоступных местах; более быстрые темпы сварки
Электронный луч	Не должна быть выполнена в вакууме; более короткие циклы; отсутствие сварных швов магнитных материалов; не требуется радиационная защита

В нержавеющей стали проблемы сварки могут быть связаны с изменением состава металла шва из-за сильного испарения легирующих элементов из сварочной ванны. Эти парообразования могут способствовать образованию интерметаллических соединений или отдельных металлографических фаз, влияющих на коррозию и механические свойства нержавеющих сталей. Аустенитные нержавеющие стали обладают высокой свариваемостью, в то время как мартенситные и ферритные нержавеющие стали, имеющие ограниченную свариваемость, в некоторых случаях требуют дополнительной обработки, такой как, например, термическая обработка до или после сварки.

Дефекты в лазерных сварных соединениях аналогичны тем, которые выполнены другими методами сварки плавлением, – пористость, растрескивание и проблема текучести расплавленной ванны. Эти проблемы непосредственно затрагивают механические свойства сварных швов. Для защиты ванны расплава от кислорода в воздухе, как и в других процессах сварки плавлением, для лазерной сварки алюминия необходим защитный газ. Наиболее распространенные – аргон, гелий или их смесь.

О влиянии скорости сварки на структуру сварного шва из разнородных металлов нержавеющей стали рассказано авторами работы [49]. При одинаковой

мощности лазерного излучения сварной шов с большой мощностью и высокой скоростью сварки имел меньшую ширину шва и более узкую центральную кристаллическую зону. Также разные параметры сварки вызывают разные области теплового воздействия. На краю расплавленной ванны температурный градиент маломощной и медленной скорости сварки был меньше, чем при высокой скорости и мощности сварки, поэтому ширина граничных слоев была больше, что уменьшало неоднородность микроструктуры вблизи линии сплавления. Более высокая прочность на растяжение и ударная вязкость сварного шва были получены при относительно малой мощности и низкой скорости сварки.

Похожая работа по сварке разнородных листов нержавеющей стали была проведена в исследовании [50], где исследовалось влияние термической обработки сварного шва после проведения лазерной сварки. В металле сварного шва была получена микроструктура, подобная металлу сварного шва супераустенитной нержавеющей стали AISI 904L. В металле шва наблюдались крупнозернистые столбчатые дендритные структуры, обусловленные влиянием термической обработки. Из-за укрупнения зерен аустенита под действием термической обработки пластичность и ударная вязкость всех образцов увеличились, в результате чего произошло снижение значений твердости на $\sim 15\%$ в области металла шва, зоны термического влияния и основного металла.

При мощной лазерной сварке толстых профилей возникает несколько общих проблем – подрезы на верхней поверхности сварного шва, образование хрупких фаз из-за чрезмерно высокой скорости охлаждения и изначально низкая способность перекрывать зазоры [51]. В последнее время технология гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛДС) привлекла значительное внимание своими многочисленными преимуществами [52 – 54]. Одним из наиболее важных вопросов при лазерной сварке толстых профилей является образование пористости. Фактически ГЛДС сочетает в себе преимущества лазерной сварки, включая высокую эффективность, глубокое проплавление и более высокую скорость перемещения, с преимуществами дуговой сварки, такими как высокая

способность перекрывать зазоры и возможность изменять химический состав сварного шва с помощью присадочной проволоки. Пористость считается скрытым дефектом сварки при лазерной сварке с глубоким проплавлением, который может негативно повлиять на целостность соединения. Тип пористости в лазерных сварных швах чаще представляет собой пористость, вызванную замочной скважиной. Было показано, что после завершения лазерного излучения, если скорость затвердевания расплавленной ванны в верхней части замочной скважины превышает скорость обратного заполнения жидким металлом в той же части, пористость обнаруживается в средней и прикорневой частях замочной скважины [55]. Было предпринято много усилий, чтобы смягчить и удалить поры, вызванные замочной скважиной [56, 57]. Все предложенные методы основывались на продлении скорости затвердевания или уменьшении объема расплавленной ванны в верхней части замочной скважины [58 – 61].

Остаточные напряжения в изготовленных конструкциях или компонентах – это напряжения, существующие в объекте без приложения каких-либо услуг или других внешних нагрузок. Практически многие процессы производства и изготовления – резка, сварка, термообработка, механическая обработка и т.д. – могут приводить к возникновению остаточных напряжений в производственном объекте. Как правило, растягивающие остаточные напряжения вредны и существует множество задокументированных причин, по которым эти напряжения были преобладающим фактором, способствующим усталости и другим разрушениям конструкции, когда рабочие напряжения накладывались на уже существующие остаточные напряжения. Технология сварки широко используется для сборки металлических деталей из-за высокой производительности и гибкости. Вследствие быстрого нагрева и охлаждения в процессе сварки неизбежно возникают большие остаточные напряжения в инженерных конструкциях, часто приближающиеся к пределу текучести материала [62, 63].

Применение нержавеющей стали в строительной отрасли увеличивается из-за ее исключительной коррозионной стойкости, долговечности, эстетики и

превосходных механических свойств [64]. Однако дорогие материалы и высокая начальная стоимость приводят к критической эффективности конструкции. Хотя нержавеющая сталь не имеет четко определенного предела текучести и обладает значительным деформационным упрочнением [65, 66], расчетные положения основаны, прежде всего, на предположениях об идеальном упругопластическом материале, аналогичном углеродистой стали, что облегчает использование нового материала инженером-конструктором. Однако из-за низкой эффективности текущего метода проектирования это приводит к увеличению стоимости конструкции, что ограничивает применение нержавеющей стали в строительстве.

Ультразвуковая вибрация, играющая важную роль в процессах затвердевания и кристаллизации сварочной ванны в процессе сварки, способствует измельчению зерна и текучести расплава, а также уменьшает количество дефектов пористости и ликвационных трещин. Из-за этого механические свойства сварных соединений значительно улучшаются при использовании ультразвуковой вибрации. Некоторые соответствующие результаты предыдущих исследований продемонстрировали преимущества ультразвуковой вибрации в процессе сварки.

В работе [67] изучена микроструктура магниевых сплавов, сваренных дуговой сваркой с применением ультразвука и без него, и подробно рассмотрены механизмы измельчения зерна в процессе сварки. Измельчение зерна сварных соединений улучшается с увеличением амплитуды ультразвука. Нинг и другие изготовили некоторые детали из Fe-Cr из нержавеющей стали с помощью нового аддитивного метода производства (нанесение методом лазерного плавления с использованием ультразвуковой вибрации) [68]. Точно также размер зерна уменьшается, а свойства при растяжении увеличиваются при использовании ультразвуковой вибрации. Кроме того, значительно уменьшаются такие дефекты сварки, как пористость и трещины.

В работе [69] изучены стыковое соединение листов сплава AZ31B Mg, сваренных лазерной сваркой с применением ультразвуковой вибрации и без нее, и механизм влияния энергии ультразвука на сварочные характеристики сплава

AZ31B Mg. Исследованы изменения прочностных свойств, микроструктуры, дефекта пористости и фазового состава. Сварные соединения лазерной сварки с ультразвуковой вибрацией обладают высокими прочностными характеристиками и мелкой зернистостью. Кроме того, подробно обсуждались характеристики течения расплава и измельчения зерен в сварочной ванне. В процессе ультразвуковой вибрационной лазерной сварки интенсивность течения расплава и способность к растеканию увеличиваются. Распределение легирующих элементов в ЗП становится равномерным и получается добротный бездефектный шов. В условиях ультразвуковой вибрационной лазерной сварки пористость шва уменьшается, а средняя площадь зерна в центре шва уменьшается в два раза. Средняя площадь зерна уменьшается на 41,6 % по сравнению с условиями лазерной сварки. Прочностные свойства сварных соединений значительно повышаются за счет эффекта измельчения зерна.

Введение внешних полей – акустического, вибрационного, электромагнитного и теплового – при сварке может контролировать поведение плавления и затвердевания расплавленной ванны и уменьшить дефекты по типу: несмешанные зоны, выделенные фазы и неравномерное распределение элементов [70]. Как сочетание акустических и вибрационных полей, мощное ультразвуковое излучение имеет множество специфических эффектов – акустические потоки, тепловые и механические эффекты. Эти эффекты будут влиять на поведение конвекции расплавленной ванны, на ее затвердевание и диффузию элементов [71]. Таким образом, ультразвуковая вибрация может быть использована для улучшения микроструктуры и свойств разнородного сварного соединения [72]. Ультразвуковая вибрация широко используется для облегчения сварки плавлением.

Известны следующие способы использования ультразвуковой вибрации для облегчения сварки плавлением: 1) ультразвук передается в сварочную ванну через дуговое пространство, называемое ультразвуковым инертным вольфрамовым газом (U-TIG). Сан и другие [73] выполнили U-TIG сварку нержавеющей стали 304, результаты показали, что глубина проплавления металла шва явно

увеличилась; 2) ультразвуковая энергия вводится в расплавленную ванну с помощью вибрирующего присадочного металла или ультразвукового зонда. В работе [74] уточнена микроструктура затвердевания и улучшены механические свойства сварного соединения ферритовой нержавеющей стали. Чаще всего ультразвук распространяется в расплавленную ванну через неблагородные металлы. В. Чен и соавторы [75, 76] выполнили процесс дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа с ультразвуковой обработкой чистого алюминия и алюминиевого сплава путем вибрации основных металлов, и получили металлы сварного шва с измельченными зернами и меньшим количеством пор. Дж. Ванг и соавторы [77] предположили, что добавление ультразвуковой вибрации основным металлом – эффективный способ улучшения механических свойств сварного соединения при мокрой сварке под водой. А. Краевский и соавторы в работе [78] проанализировали влияние всей ультразвуковой вибрации волновода из алюминиевого сплава на микроструктуру РМ и окколошовную зону на различных фазах вибрационной волны. Дж. С. Ким [79] исследовал ультразвуковую импульсную лазерную сварку алюминиевых сплавов за счет полной вибрации основных металлов и обнаружил, что дефекты сварки, такие как поры и трещины, подавляются.

В работе [80] при тех же параметрах сварки лазерная сварка с ультразвуковой вибрацией значительно улучшила сварочные свойства сплава AZ31B Mg: пористость составляет всего 0,9%; прочность на растяжение может достигать 87% по сравнению с основным металлом; ширина столбчатых кристаллов уменьшается, а равноосная структура зерен в центральной области увеличивается, эффект измельчения зерна очевиден.

Ультразвуковая вибрация может влиять на конвекцию и затвердевание расплавленной ванны из-за специфических эффектов кавитации и акустического течения. Таким образом, ультразвуковые колебания широко используются во многих областях [81 – 83] – литье, сварка, наплавка и аддитивное производство. Dai W. исследовал влияние волн ультразвуковой эмиссии на свариваемость алюминиевого сплава 7075-T6 в процессе дуговой сварки вольфрамовым

электродом [84], им были построены зависимости между углом падения волны ультразвуковой эмиссии и термическими циклами. Цуй Ю и соавторы, применившие ультразвуковую вибрацию при электродуговой сварке супераустенитной нержавеющей стали [85], наблюдали, что ширина несмешиваемой зоны в сварном шве уменьшалась за счет высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний. В работе [86] авторы провели ультразвуковую сварку вольфрамовым электродом в среде инертного газа ((U-TIG)) стали AISI 304, их результаты показали, что глубина проплавления была увеличена до 300 % при сварке, выполненной с помощью (U-TIG) сварки, по сравнению с обычной сваркой TIG. Лей Ю и другие исследовали влияние ультразвука на микроструктуру и механические свойства соединений SiCp/6061Al, полученных плазменной дуговой сваркой с различными частотами колебания [87]. Краевский А. и соавторы проанализировали влияние ультразвуковой вибрации на микроструктуру в сварном шве и околошовной зоне при различных фазах вибрационной волны [88]. Падхи Г. и соавторы провели сварку трением с перемешиванием, усиленную ультразвуковой вибрацией для изучения влияния ультразвуковой вибрации на локальное изменение микроструктуры Al 6061-T6 [89]. Юань Т. и другие изучали влияние ультразвукового воздействия на измельчение зерна в дуговых сварных швах магниевых сплавов, а ультразвуковую вибрацию реализовывали погружением ультразвукового зонда в сварочную ванну для ее перемешивания на расстоянии за дугой [90].

Однако современные методы сварки применялись только для дуговой сварки с ультразвуковой вибрацией, сварки трением с перемешиванием и сварки пайкой, импульсная лазерная сварка с ультразвуковой вибрацией использовалась редко. Кроме того, исследования в основном были сосредоточены на влиянии ультразвуковой вибрации на форму сварного шва, морфологию зерен, трещины, пористость и механические свойства. В статье [91] специфические эффекты кавитации и акустического течения в сварочном расплаве, вызванные ультразвуковой вибрацией, авторами использовались для изменения поведения конвекции и затвердевания расплавленной ванны и устранения дефектов при

сварке разнородных материалов. Ультразвуковая вибрация была введена для облегчения импульсной лазерной сварки разнородных материалов Hastelloy C-276 и аустенитной нержавеющей стали 304.

Лазерная сварка имеет такие преимущества, как высокая производительность, высокая скорость, низкие тепловложение и деформация. При сварке таких материалов, как алюминий, происходит образование пор в сварных соединениях и потеря легирующих элементов при лазерной сварке алюминиевых сплавов. Гибридная сварка Laser-MIG, сочетающая в себе преимущества как лазерной, так и MIG-сварки, может улучшить стабильность сварки, внешний вид сварного шва и эффективность использования энергии лазерного луча. Однако большое влияние на прочность сварных соединений оказывают такие дефекты, как кристаллизационное растрескивание, высокая пористость, крупный размер зерна и высокие остаточные напряжения в сварных швах [92 – 96]. Для улучшения механических свойств соединений во время сварки были опробованы многие методы внешнего воздействия, такие как электромагнитное перемешивание и ультразвуковая вибрация. В процессе сварки внешняя энергия, каким-либо образом вводимая в ванну расплава [97], вызывает в ней ряд микро- и макроскопических эффектов, которые могут повлиять на микроструктуру и механические свойства сварных соединений. Ультразвуковая технология в сварке широко применяется из-за ее низкой стоимости [98, 99]. Ультразвуковая волна в расплавленной ванне вызывает кавитацию, акустическое течение, перегрев и явление резонанса [100 – 102]. Эти эффекты улучшают механические свойства сварных швов за счет уменьшения пористости и измельчения зерен [103 – 105]. Многие исследователи добились определенных успехов, используя технологию ультразвуковой обработки. В работе [106] исследовали эффективность дегазации ультразвуковой вибрацией путем измерения плотности отливок из алюминиевых сплавов. Было обнаружено, что ультразвуковая вибрация может уменьшить пористость. Исследование [107] показало, что ультразвуковая вибрация улучшила морфологию и распределение частиц второй фазы, а также повысила усталостные характеристики сварных соединений до 96,13% основного металла. Авторы

исследования [108] воздействовали ультразвуковой вибрацией с различными уровнями мощности на нижнюю часть заготовки по вертикали во время сварки TIG сплавов Mg/Ti. Экспериментальные исследования показали, что микроструктура соединения и коррозионная стойкость были улучшены при использовании ультразвука соответствующей мощности. Авторы работы [109], использовавшие мощный ультразвуковой лазер для создания покрытия из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, а также для исследования эволюции микроструктуры и механических свойств зоны плакирования и зоны сплавления, показали, что с увеличением выходной мощности ультразвука происходит измельчение микроструктуры покрытия, заметно улучшается распределение элементов покрытия, что способствует повышению микротвердости и износостойкости.

Однако большинство исследований посвящено изучению влияния на процессы сварки ультразвука при частоте колебаний 20 – 40 кГц. При этом ультразвуковой диапазон не ограничивается указанными частотами и необходимо изучать широкий спектр акустического воздействия. Связано это с тем, что ультразвуковая волна при переходе через твердожидкую фазу снижает свою интенсивность, меняет направление или частично поглощается средой. При этом форма свариваемых заготовок может иметь сложную геометрию. Например, сварка труб, бывших в употреблении, имеет дополнительные трудности в связи с их различными толщиной и профилем. Таким образом, актуальной становится задача осуществления лазерной сварки труб, бывших в употреблении, методом лазерной сварки с применением акустических колебаний в широком диапазоне частот.

Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБРАЗЦОВ

В главе 2 описаны методики исследования, применяемое оборудование и материалы, представлена методика для лазерной и лазерно-акустической сварки труб из стали 09Г2С и 12Х18Н10Т, обоснован выбор объектов исследования, представлены оборудование для лазерно-акустической сварки труб в диапазоне частот от 20 до 100 кГц, а также методика и оборудование для определения химического состава и механических свойств сваренных образцов [135 – 137, 141].

2.1 Методы исследования состава, структур и свойств сваренных образцов

Сварка производилась с помощью волоконного лазера мощностью до 30 кВт, с длиной волны излучения 1064 нм. Для проведения лазерной сварки было разработано специальное прижимное устройство, которое осуществляло плотное прижимание свариваемых частей труб друг к другу.

На рисунке 2.1 показана принципиальная схема ориентировки лазерного луча относительно оси симметрии свариваемых труб. Свариваемые поверхности были зачищены механическим методом.

Для проведения сварочных работ был выбран базовый комплект номенклатуры насосно-компрессорных труб с различными видами, условиями эксплуатации и методами подготовки торцов, изготовленных по ГОСТ 633-80 и ГОСТ Р 52203-2004, наружным диаметром 73мм и толщиной стенок 5,5 мм.

Фактическое среднестатистическое отклонение формы в поперечном сечении по наружному диаметру (овальность) составляло 0,42 мм (таблица 2.3).

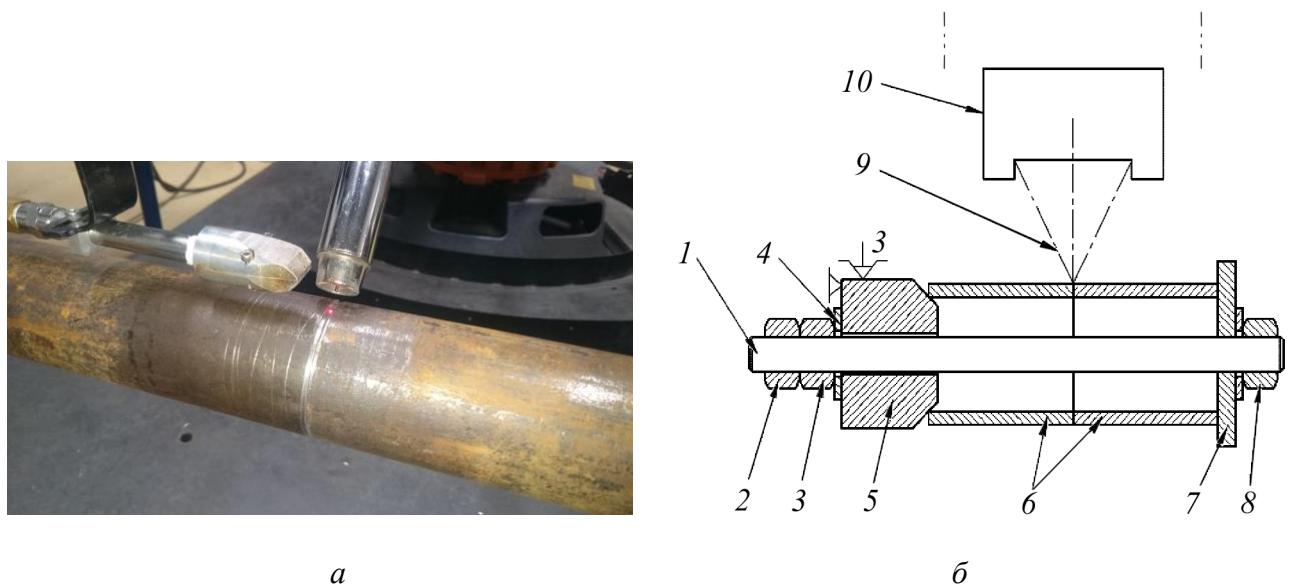


Рисунок 2.1. – Приспособление для лазерной сварки труб:

а – общий вид; *б* – схема сборочная схема; 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – контр-гайка; 4 – шайба; 5 – конусный упор; 6 –стыкуемые трубы; 7 – зажимная шайба; 8 – зажимная гайка; 9 – схема фокусировки лазера; 10 – лазерная сварочная голова Kugler

Таблица 2.1 – Химический состав трубной стали, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,26-0,35	0,17-0,37	1,4-1,8	До 0,3	До 0,35	До 0,035	До 0,3	До 0,3	≈96

Таблица 2.2 – Параметры, варьируемые в процессе сварки

Параметр	Значения
Скорость сварки, м/с	1-11
Мощность лазерного излучения, кВт	0,5-9
Расход защитного газа, л/мин	1-6
Смещение фокусного расстояния, мм	1-6
Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	0,1-4
Угол наклона лазерного излучения по отношению к поверхности металла, град	0-90
Качество подготовки поверхности (шероховатость), Ra, мкм	2

Таблица 2.3 – Биение внутреннего диаметра

Номер образца	Торец D_{\max}		Среднее отклонение по абсолютному значению
	правый	левый	
1	0,11	0,078	0,089
2	0,069	0,058	0,07
3	0,158	0,09	0,14
4	0,055	0,08	0,063
5	0,09	0,09	0,089

В процессе лазерной сварки варьировали такие параметры процесса, как скорость сварки, мощность излучения, расход защитного газа, смещение фокусного расстояния и скорость подачи присадочной проволоки. Изменение фокусного расстояния позволяло получать изменение площади лазерного сфокусированного пучка. Соответственно менялось значение плотности энергии пучка, приходящееся на квадратный сантиметр площади. Данный параметр оказывает значительное влияние на степень провара. Скорость подачи проволоки позволяла варьировать параметры наплавляемого валика на сварном шве.

Расход защитного газа был фиксирован и составил 25 л/мин. Торцы стыкуемых элементов трубы подготавливались по требуемым параметрам. Для испытания на растяжение из сваренных труб вырезались образцы. Для растяжения использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 5884, роботизированная установка лазерной сварки, оснащенная волоконным лазером IPG Photonics (США) и роботом KUKA (Германия) для сварки образцов модулем гибридной лазерной сварки LaserWeld 30R120. Сварку осуществляли волоконным лазером мощностью до 30 кВт и длиной волны излучения 1064 нм. Для лазерной сварки использовалась лазерная оптическая головка для сварки KUGLER. Лазерная фокусирующая головка с линейным сканированием LK-690F состоит из муфты для волокна с возможностью настройки, двух параболических зеркал с водяным охлаждением, крутящим моментом, кодовым угломером и блоком управления двигателя для линейного сканирования, узла корпуса с монтажным фланцем, модуля защитного стекла и

модуля кросс-джета (аэродинамическое окно). Лазерная фокусирующая головка LK-690F содержит два параболических зеркала с водяным охлаждением: одно предназначено для коллимации выходящего из волокна лазерного луча (расходящегося), второе – для фокусировки уже коллимированного луча от первого зеркала на изделие. Важно, чтобы оба зеркала имели водяное охлаждение для предотвращения их повреждения или разрушения.

Лазерная головка, предназначенная для использования в установке для сварки, включает в себя следующие элементы:

- волоконный коннектор, совместимый по стандарту с используемым в рабочем оптоволокне (розетка);
- коллимирующую и фокусирующую оптическую систему, использующую отражающие оптические элементы (зеркала) и обеспечивающую оптическое увеличение (отношение фокального расстояния фокусатора к фокальному расстоянию коллимирующего зеркала);
- наличие системы воздушной защиты оптических элементов от продуктов испарения и брызг металла.

Головка рассчитана на максимальную мощность – 30 кВт. Предусмотрено однокоординатное сканирование луча. Для сварки гибридным способом дополнительно использовался сварочный полуавтомат TransPulsSynergic 9000 (MIG/MAG).

После сварки поверхности образцов сначала шлифовали, затем полировали. Химическое травление микрошлифов осуществляли реактивом следующего состава: HF – 5%; HNO₃ – 10%; H₂O – 55%; глицерин – 30%. Образцы погружали в реагент на 3 с, затем промывали дистиллированной водой. Для измерения микротвердости и исследования структуры поверхности образцов использовали твердомер Tukon 2500 (Германия). Во всех экспериментах в качестве защитного газа использовался аргон при расходе 25 л/мин. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и элементный анализ проводили на рабочей станции Auriga Cross Beam (Carl Zeiss, Германия), томографию образцов – на рентгеновском комплексе North Star Imaging X5000 Industrial (США).

2.2 Технологическое оборудование для лазерной сварки образцов

Исследовали образцы из стали 12Х18Н10Т и 09Г2С, имеющие размеры 100x10x3 мм. Во всех экспериментах использовалась роботизированная установка лазерной сварки, оснащенная волоконным лазером IPG Photonics (США) и роботом KUKA (Германия).

Сварка осуществлялась волоконным лазером мощностью до 30 кВт и длиной волны излучения 1064 нм. На рисунке 2.2 показано изображение экспериментальной установки с указанием ориентаций лазерного луча относительно оси симметрии свариваемых труб и ультразвукового волновода относительно свариваемой детали.

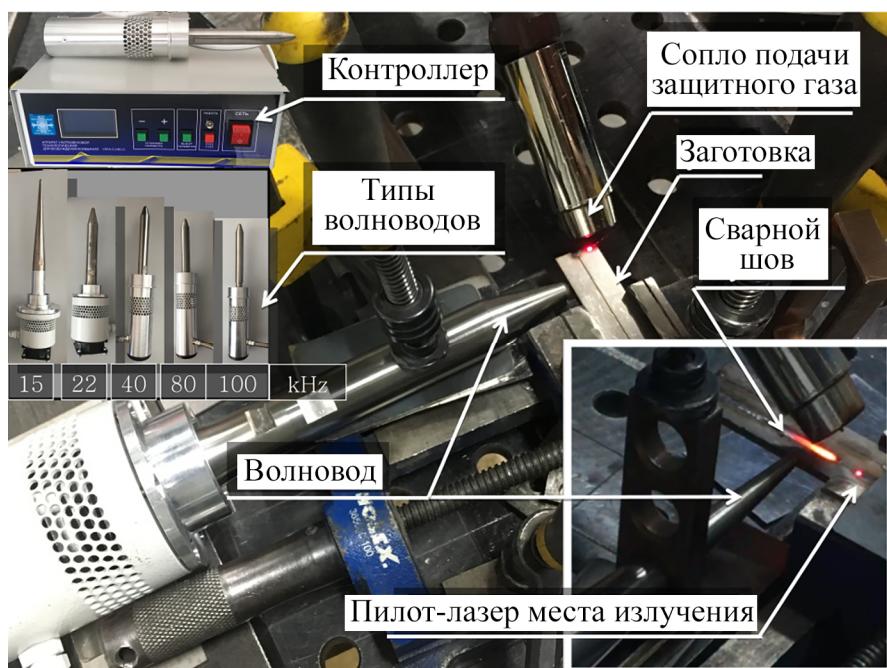


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка для лазерной акустической сварки

В таблице 2.4 дан химический состав стали, в таблице 2.5 – используемые параметры сварки. Акустическая система предназначена для контактного воздействия ультразвуковых колебаний высокой интенсивности на различные физические объекты с целью изменения свойств или структуры поверхности или внутренних слоев. Акустическая система состоит из электронного генератора с автоматической подстройкой резонансной частоты и стабилизацией установленной амплитуды колебаний, регулятора мощности и таймера,

пьезоэлектрической колебательной системы с монтажным фланцем и рабочего инструмента (сонотрод) в виде усеченного конуса.

Таблица 2.4 – Химический состав стали 12Х18Н10Т, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,12	0,8	2	10	до 0,02	до 0,035	18	до 0,3	остаток

Таблица 2.5 – Параметры лазерной сварки

Параметр	Значение
Скорость сварки, мм/с	11
Мощность лазера, кВт	0.5
Расход защитного газа (аргона), л/мин	25
Угол наклона лазерного луча относительно поверхности металла, град	90
Шероховатость свариваемых поверхностей, Ra, мкм	2
Мощность акустического источника, кВт	1,5
Частота акустических колебаний, кГц	15, 22, 40, 80, 100

2.3 Исследование состава, структуры и свойств сваренных образцов

После сварки поверхности образцов сначала шлифовали, затем полировали. Химическое травление шлифов проводили следующей смесью: HF – 15 см³; HNO₃ – 35 см³; H₂O – 200 см³; глицерин – 100 см³. Для измерения микротвердости и структуры поверхности образцов использовали твердомер Тukon 2500 (Германия). Во всех экспериментах в качестве защитного газа использовался аргон при расходе 25 л/мин. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и элементный анализ проводили на рабочей станции Auriga Cross Beam (Carl Zeiss, Германия). Томографические снимки получены на промышленной рентгеновской системе North Star Imaging X5000 (США).

Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

В главе 3 исследованы основные особенности лазерно-акустической сварки (ЛАС) образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Установлено, что микроструктура и качество сварных швов сильно зависят от частоты применяемых акустических волн, которые были выбраны на звуковом (15 кГц) и ультразвуковом (22, 40, 80 и 100 кГц) уровнях. Воздействие на расплав акустических колебаний с частотой 80 кГц обеспечивает получение сварных соединений с однородной структурой и однородным химическим составом в сечении. Выраженное смещение металла из зоны плавления и сильно неоднородная структура шва, наблюдаемые на частоте 15 кГц, объясняются сонокапиллярным эффектом [137, 138, 143 – 145].

3.1 Сварка образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с дополнительным воздействием акустическими колебаниями при различных частотах

Качественная сварка без дефектов сварного шва с однородным химическим составом до сих пор остается большой и растущей потребностью в промышленности. Ввиду узкой зоны сварки и стабильности протекающих процессов одним из ключевых путей решения проблемы является использование сфокусированного лазерного излучения [117, 118]. Правильный выбор присадочных материалов, инструментов и оборудования, а также подходящая подготовка образцов и параметры сварки могут обеспечить надежное соединение. Дополнительное повышение качества расплава может быть достигнуто

применением ультразвуковых колебаний, влияющих на конвекцию расплава и последующий процесс затвердевания за счет специфического воздействия кавитационных и акустических течений [119 – 121]. Следовательно, ультразвуковые колебания широко используются во многих областях обработки металлов и сплавов, таких как литье, гальваника и наплавка. Применение ультразвука используется при дуговой и лазерной сварках. Однако все исследования проводятся на фиксированной частоте в относительно узком диапазоне 20-40 кГц [122, 123]. Можно предположить, что конкретное воздействие звуковых и ультразвуковых волн сильно зависит от их частот [123 – 125]. Кроме того, предыдущие исследования в основном были о влиянии ультразвуковых колебаний на форму сварного шва, морфологию зерен, трещины, пористость и механические свойства соединения.

Цель данной главы – исследование влияний обработки ультразвуком и наложенной частоты акустических волн на лазерную сварку аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. В процессе лазерной сварки вводили звуковые колебания в широком диапазоне с частотами 15 (ниже ультразвука), 22, 40, 80, 100 кГц [126 – 130]. Исследовано влияние ультразвуковых колебаний на форму шва, несмешанную зону, морфологию и ориентацию зерен, вторичные фазы, макро- и микрораспределение элементов, микротвердость [131, 132].

На рисунке 3.1 представлена микроструктура базового горячекатаного образца, состоящая из α - и γ -фаз, также наблюдаются двойники [133 – 138].

При лазерной сварке была выбрана величина расфокусировки +10 мм, чтобы избежать вскипания, испарения металла и разбрызгивания капель расплава. Такая фокусировка обеспечивала необходимый диаметр лазерного пятна без значительных потерь мощности.

На рисунке 3.2 представлены изображения поперечных сечений сварных швов, полученные при различных акустических воздействиях. Форма швов во всех случаях одинакова с некоторыми изменениями геометрических размеров. Однако структура шва и его размеры существенно изменяются при наложении акустического поля с частотой звука 15 кГц (рисунок 3.2, б).

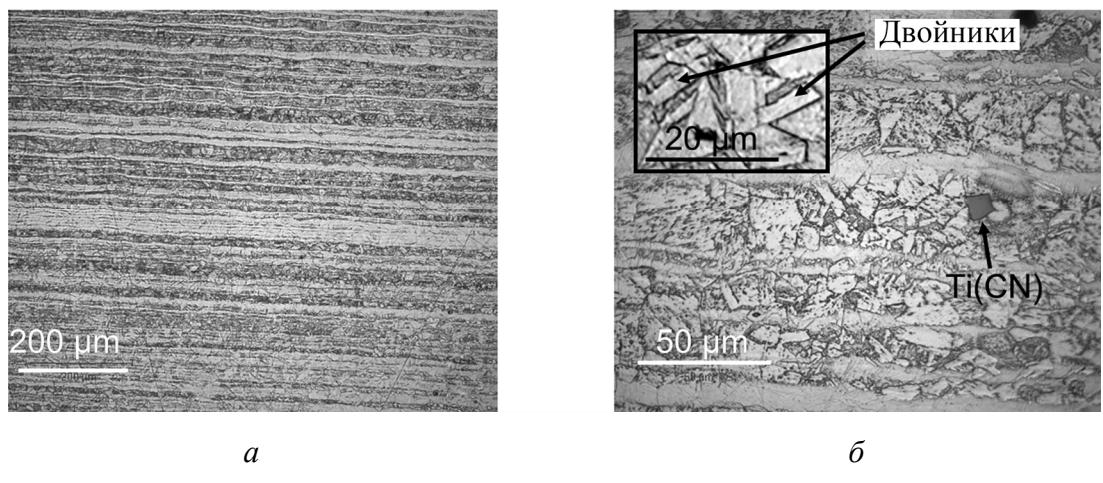


Рисунок 3.1 – Морфология основного металла из стали 12Х18Н10Т при различном увеличении, полученная на СЭМ: *а* – микроструктура; *б* – двойники в нержавеющей стали

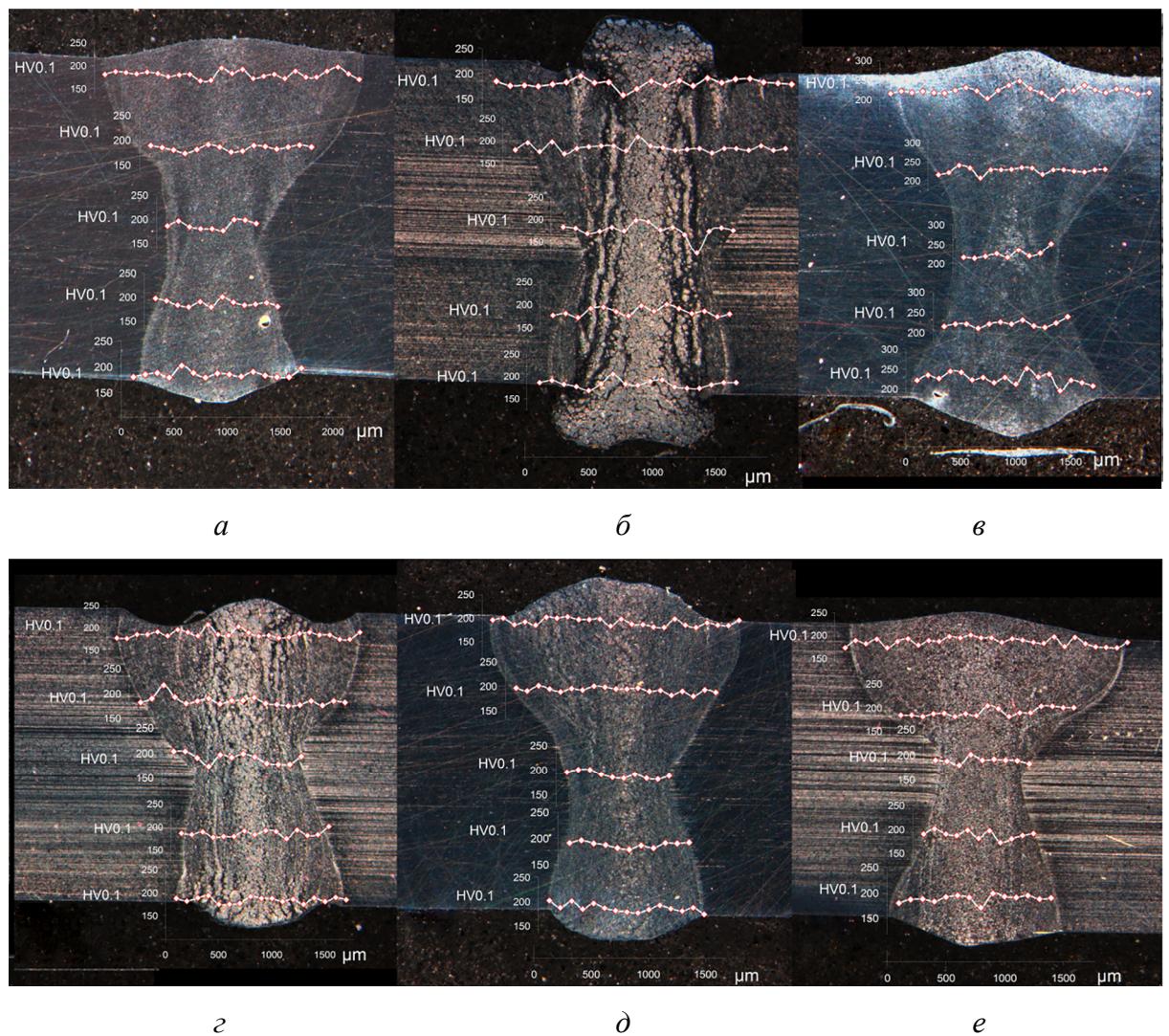


Рисунок 3.2 – Изображения сечений швов и распределения микротвердости при разной глубине шва: *а* – без акустического воздействия и разных частотах наложенных акустических волн: *б* – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *д* – 80 кГц; *е* – 100 кГц

На рисунке 3.2 также показано распределение микротвердости поперек шва на различной глубине образцов. Все опыты повторялись три раза. Наблюдается увеличение твердости в центральной части шва, полученное при отсутствии наложения акустических колебаний (рисунок 3.2, *а*).

Применение акустических колебаний частотой 15 кГц при лазерной сварке приводит к увеличению разброса значений твердости. Это можно объяснить локализацией участков аустенита и феррита. При этом четко выражены вытянутые чередующиеся светлые и темные участки разного травления вдоль шва и повышенный выброс металла сверху и снизу поверхности образца. Верхняя и нижняя части шва выступают за поверхность заготовки примерно на 1000 мкм, что в три раза больше, чем у шва, полученного без наложенных акустических колебаний [133]. Все это приводит к значительному уменьшению ширины шва по сравнению с шириной на других частотах (рисунок 3.3). Предположительно это можно объяснить сонокапиллярным эффектом, представляющим собой существенное повышенное проникновение жидкости в капилляр, щель или трещину под действием приложенного акустического поля [134]. Явление наблюдается и в жидких металлах [134]. Степень проявления сонокапиллярного эффекта для данной жидкости/расплава зависит от акустической частоты. Можно предположить, что 15 кГц является «резонансной» частотой, благоприятной для проявления данного эффекта в случае расплавления нержавеющей стали 12Х18Н10Т [135].

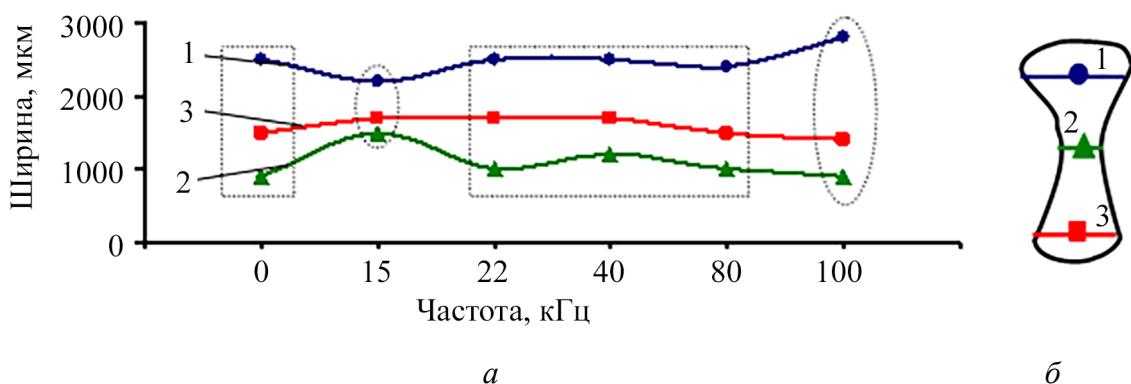


Рисунок 3.3 – Ширина шва: *а* – в разных местах; *б* – в зависимости от частоты приложенного звука

На рисунке 3.3 видно, что приложение акустических колебаний частотой 22 кГц приводит к увеличению значения твердости шва в его центральной зоне и увеличению средней твердости шва. Применение акустических колебаний частотой 40 кГц дает такой же эффект, как и применение акустических колебаний частотой 15 кГц [136 – 138].

Темные и светлые полосы с разным травлением стали тоньше, а их количество значительно увеличилось (см. рисунок 3.2, *г*). Наиболее равномерное распределение твердости в шве соответствует условиям, когда сварку ведут с применением акустических колебаний частотой 80 кГц (см. рисунок 3.2, *д*). В то же время увеличение частоты вибрации до 100 кГц приводит к снижению однородности твердости в центральной части шва (см. рисунок 3.2, *е*). Анализ среднего значения твердости сварных швов по всей площади показывает уменьшение колебаний твердости с увеличением частоты акустических колебаний (рисунок 3.4).

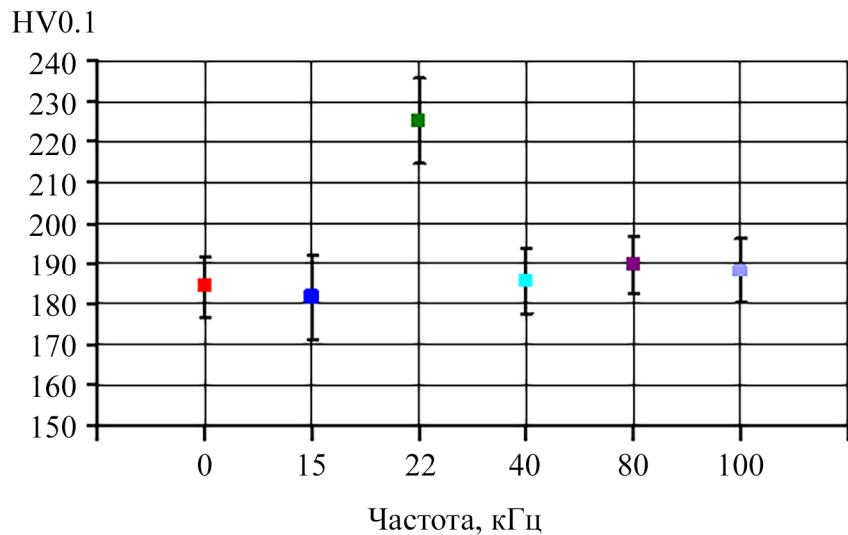


Рисунок 3.4 – Средняя микротвердость по Виккерсу сварных соединений для различных звуковых частот

На рис. 3.5 представлены результаты рентгеновской томографии сварных швов, полученные при различных акустических условиях. Для контроля использовалась промышленная рентгеновская система North Star Imaging X 5000 (США). Пространственное разрешение системы составляет 100 мкм. На этом и

всех последующих рисунках показаны изображения среднего сечения заготовок толщиной 3 мм. При сварке без воздействия акустических волн наблюдается появление пор при данном режиме сварки (рисунок 3.5, *a*). Пористая структура шва, полученного при лазерной сварке без ультразвуковой обработки, стабильно воспроизводима (рисунок 3.6), хотя расположение пор и их размеры изменяются хаотично. Применение акустических волн приводит к значительному уменьшению количества пор и их размеров (рисунок 3.5, *б-е*). При частоте приложенного ультразвука 80 кГц поры не появляются (рисунок 3.5, *д*) [137, 138].

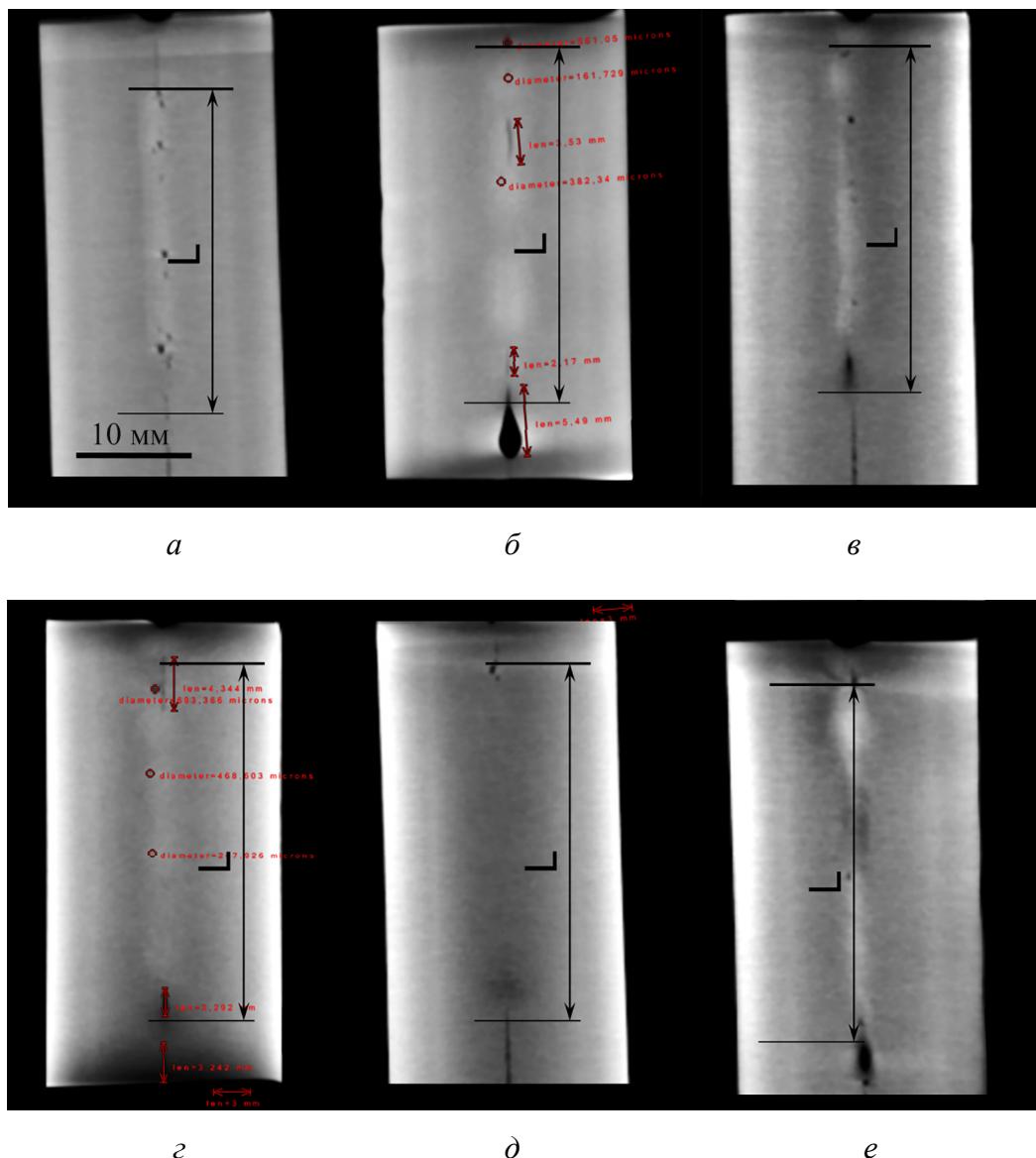


Рисунок 3.5 – Рентгенограммы сварных соединений:

a – без акустического воздействия и разных частот наложенных акустических волн:
б – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *д* – 80 кГц; *е* – 100 кГц

Для проверки воспроизводимости результатов эксперименты повторяли трижды. Результаты рентгенографии показаны на рисунке 3.7 и свидетельствуют об отсутствии пор на частоте 80 кГц.

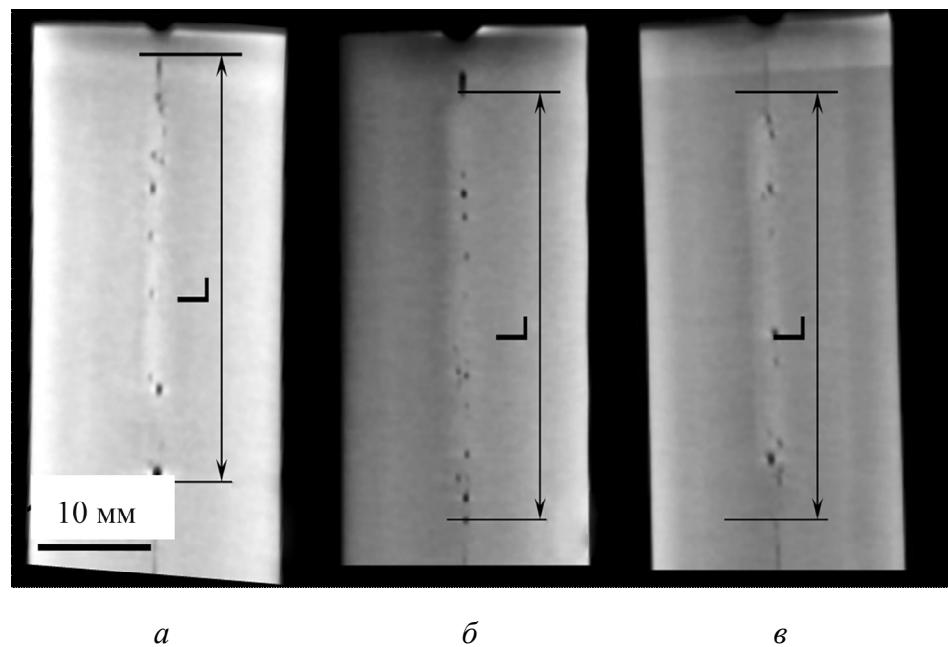


Рисунок 3.6 – Рентгеновская томография сварных соединений, полученная в трех разных сечениях без наложенных акустических волн:
а – верхнее; *б* – центральное; *в* – нижнее

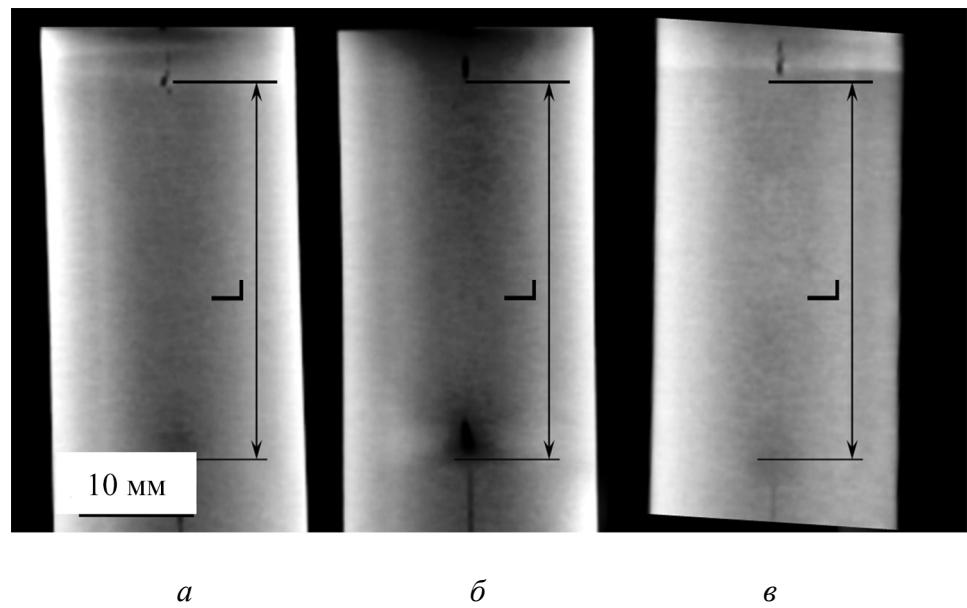


Рисунок 3.7 – Рентгеновская томография лазерных сварных швов, полученных в трех разных сечениях с наложенным ультразвуком 80 кГц:
а – верхнее; *б* – центральное; *в* – нижнее

Рентгенологическое исследование остальных поперечных сечений аналогично показанным на рисунках 3.5 – 3.7 для среднего сечения заготовок: большое количество пор без ультразвука, гораздо меньше пор с применением ультразвука и поры не обнаруживаются на частоте 80 кГц [137, 138].

3.2 Исследование микроструктуры и химического состава образцов

Более детальное исследование может дать оптическая микроскопия с большим увеличением. На рисунке 3.8 представлено детальное исследование основных структурных зон исследуемых сварных швов. На рисунке 3.8, *а* видно, что при лазерной сварке без ультразвуковой обработки процесса в структуре шва присутствуют темные и светлые зоны разного травления с разной зернистостью (области отмечены красными пунктирными линиями),

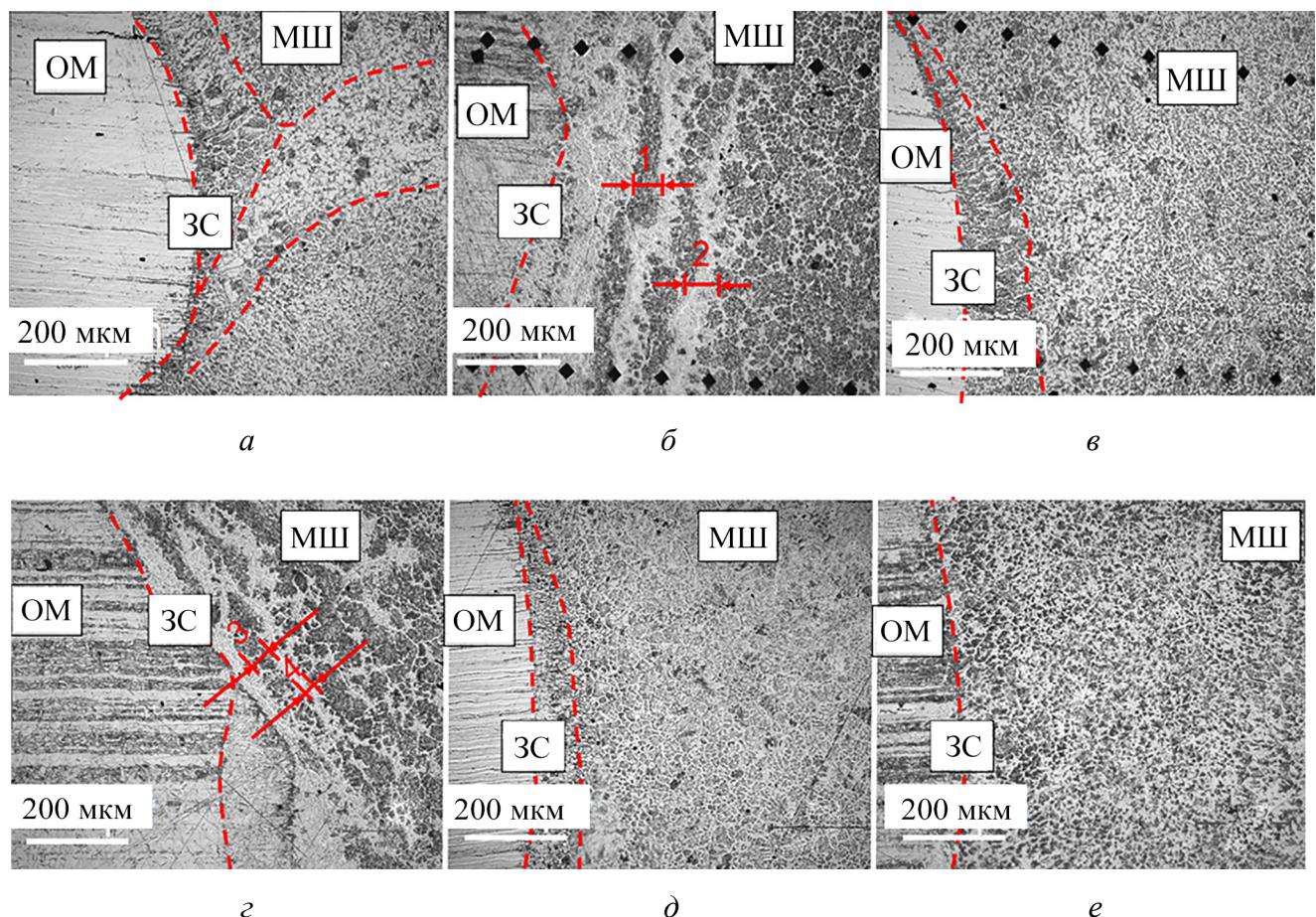


Рисунок 3.8 – Микроструктура зоны сплавления (3С) между основным металлом (ОМ) и металлом шва (МШ): *а* – без акустического воздействия и разных частот акустических волн: *б* – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *д* – 80 кГц; *е* – 100 кГц

На рисунке 3.8, *б* видно, что введение звуковых колебаний с частотой 15 кГц приводит к образованию темных (феррит + бейнит) и светлых (аустенит) полос разного травления. Ширина темных и светлых полос около 50 и 100 мкм соответственно. Для швов, сваренных с применением акустических колебаний частотой 40 кГц, светлые и темные полосы сужаются – 20 и 50 мкм соответственно (рисунок 3.8, *г*). На рисунке видно, что вдоль сплавления в шве имеется протяженный участок с крупными зернами. Максимальная ширина этой зоны составляет 210 мкм для шва, полученного без дополнительного воздействия акустическими колебаниями. Для шва с частотой колебаний 22 кГц эта зона составляет 170 мкм (рисунок 3.8, *в*). Для лазерного сварного шва с дополнительным воздействием ультразвуковых колебаний частотой 80 кГц ширина этой области плохо выявляется и составляет 20–70 мкм (рисунок 3.8, *д*). Когда в процессе сварки вводятся акустические колебания частотой 100 кГц, структура шва однородна и отдельные структурные зоны не обнаруживаются (рисунок 3.8, *е*).

Рассмотрим подробно микроструктуру металла, полученного в результате сварки с применением акустических колебаний различной частоты (рисунок 3.9).

На рисунке 3.9, *а* видно, что в микроструктуре сварного шва обнаруживается решетчатый δ -феррит, а размер пластин составляет до 50 мкм. Воздействие акустических колебаний частотой 15 кГц на ванну жидкого расплава при лазерной сварке оказывает существенное влияние на формирование структуры. На рисунке 4.9, *б* видно, что светлые и темные полосы, упомянутые ранее в микроанализе, представляют собой области аустенита и феррита + бенита соответственно. В данном случае это подтверждается исследованиями микротвердости. Светлые и темные участки обладают меньшей твердостью (рисунок 4.9, *б*). Применение акустических колебаний частотой 22 кГц в ванне жидкого расплава при лазерной сварке значительно разрушает и дробит пластинчатый δ -феррит (рисунок 3.9, *б*). Как видно из рисунка, величина реечного δ -феррита составляет 5–10 мкм, что в 10 раз меньше, чем у реечного δ -феррита, полученного сваркой без применения ультразвука. На рисунке 3.9, *г* видно, что

приложение акустических колебаний мощностью 40 кГц приводит к появлению высокодисперсного игольчатого феррита, обнаруживаются небольшие участки бейнита. При этом твердость темных участков также повышена по отношению к аустенитной матрице. Применение акустических колебаний частотой 80 кГц существенно разрушает конструкцию (рисунок 3.9, *д*). В структуре обнаруживается скелетный δ -феррит, видный по всей длине шва. Применение акустических колебаний частотой 100 кГц к ванне расплава при лазерной сварке позволяет получить участки высокодисперсного игольчатого феррита на фоне аустенитной матрицы (рисунок 3.9, *е*) [137, 138].

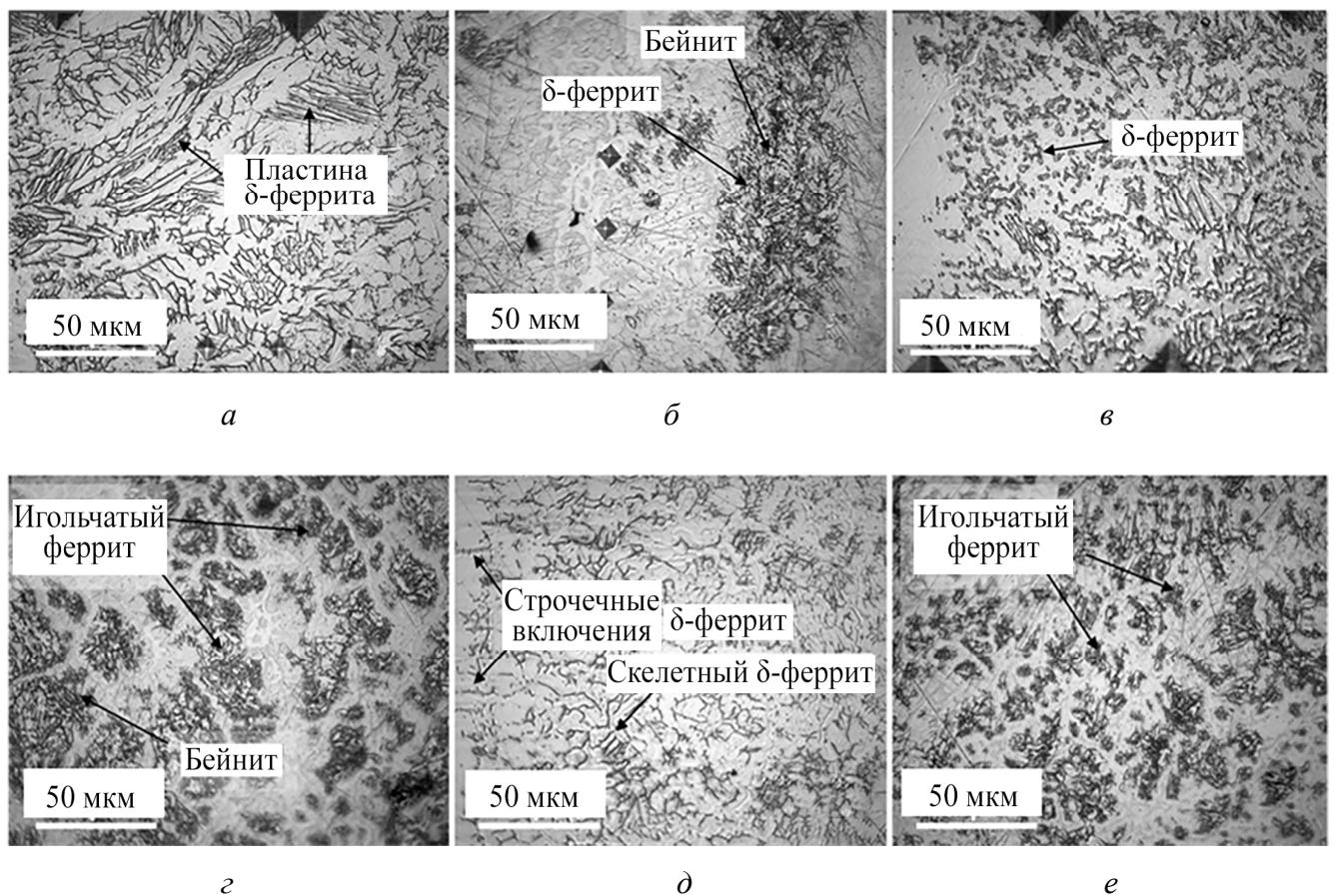


Рисунок 3.9 – Микроструктура сварного сплава, полученного:

- а* – без применения акустических колебаний и при разных частотах акустических колебаний:
б – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *д* – 80 кГц; *е* – 100 кГц

Для установления влияния фаз на размеры и распределение твердости сварных швов рассмотрим отдельно влияние фаз, образующихся при акустической обработке сварных швов. На рисунке 3.10, *а* видно, что в исходном металле

присутствуют включения карбидов TiN и TiC, твердость которых в 10–12 раз превышает твердость экструзии α -фазы. Также видно, что твердость пластинчатого феррита выше, чем матрицы (рисунок 3.10, *б*). Высокая твердость бейнита по отношению к аустенитной матрице обеспечивает неоднородность свойств в металле, свариваемом при введении акустических колебаний частотой 15 кГц (рисунок 3.10, *г*). Обнаружены также крупные карбиды Ti (C, N) (рисунок 3.10, *в*). В сварных соединениях, полученных лазерной сваркой при воздействии акустических колебаний частотой 100 кГц, обнаружены дисперсные карбиды глобулярной формы (рисунок 3.10, *е*). Можно предположить, что вводимые в зону расплава металла акустические колебания приводят к измельчению карбидов типа Ti(C,N) [137, 138].

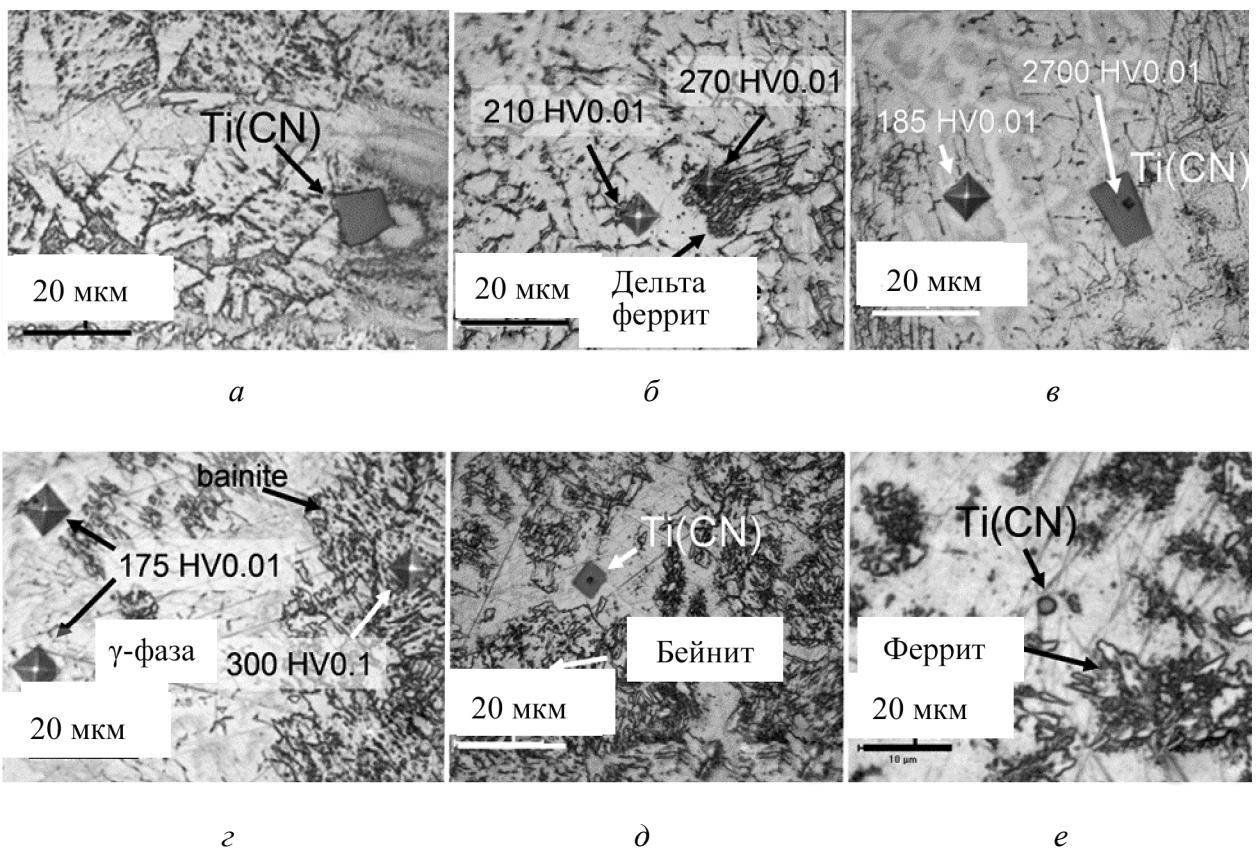


Рисунок 3.10 – Основной металл разной фазовой твердости: *а* – из стали 12Х18Н10Т, *б* – металл шва без акустики; *в*, *г* – 15 кГц; *д* – 40 кГц; *е* – 100 кГц

Анализ пористости показал, что в швах, полученных лазерной сваркой без применения акустических колебаний, в зоне сплавления наблюдаются поры размером около 100 мкм (рисунок 3.11, *а*). На рисунке 3.11, *б* показано наличие

микропор диаметром около 5 микрон при воздействии акустических волн на звуковой частоте 15 кГц. Можно предположить, что образование микропор обусловлено кавитацией, что подтверждается рассмотренным ранее движением металлических масс (рисунок 3.2, *б*). При более высоких частотах ультразвука можно наблюдать поры большего размера, но их количество меньше (рисунок 3.11, *в*, *г*, *е*). Интересно, что на частоте 80 кГц поры почти не обнаруживаются (рисунок 3.11, *д*). Более тщательная микроскопия сварного соединения, полученного на этой частоте, обнаружила наличие небольшого количества пор размером 3-5 мкм. Можно сделать вывод, что кавитация, вызванная акустическими колебаниями в расплавленном металле, приводит к схлопыванию крупных пузырей. Микропоры, возникающие в результате кавитации, могут служить центрами кристаллизации, чем можно объяснить измельчение структуры и уменьшение размеров ферритовых пластин [137, 138].

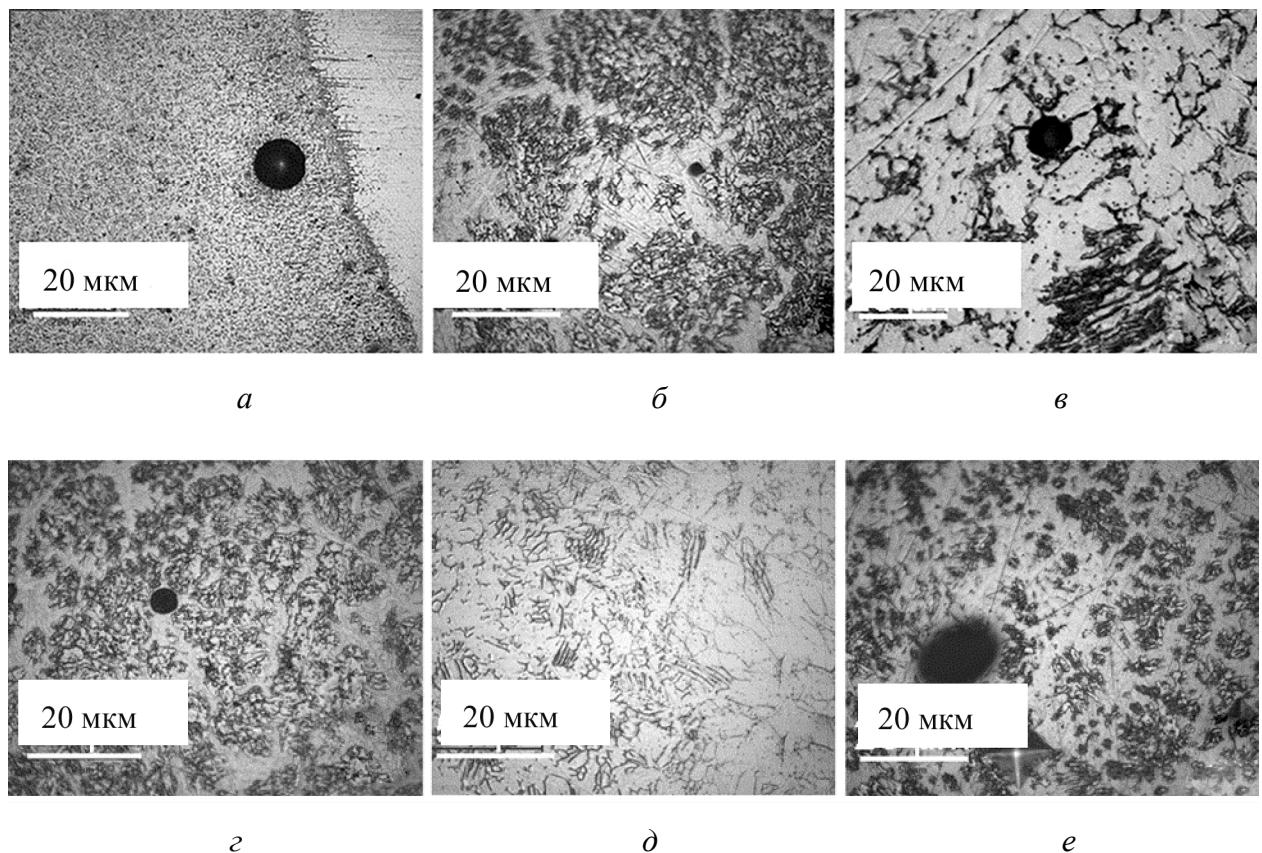


Рисунок 3.11 – Пористость в сварных соединениях: *а* – без акустического воздействия и различных частот наложенных акустических волн: *б* – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *д* – 80 кГц; *е* – 100 кГц

Пространственные распределения основных элементов в центральной зоне поперечного сечения швов представлены на рисунке 3.12. На рисунке 3.12, *a* видно, что в лазерных швах, полученных без применения акустических колебаний, наблюдаются общее уменьшение всех элементов относительно центральной оси сварного шва и пик интенсивности Si, Ti, Mn, Ni, Cr в локальных областях (рисунок 3.12, *a*). Обработка лазерной сварки ультразвуком на частоте 15 кГц приводит к выравниванию содержания Cr, однако на этой частоте неравномерность распределения Ni становится еще больше (рисунок 3.12, *б*) [137, 138].

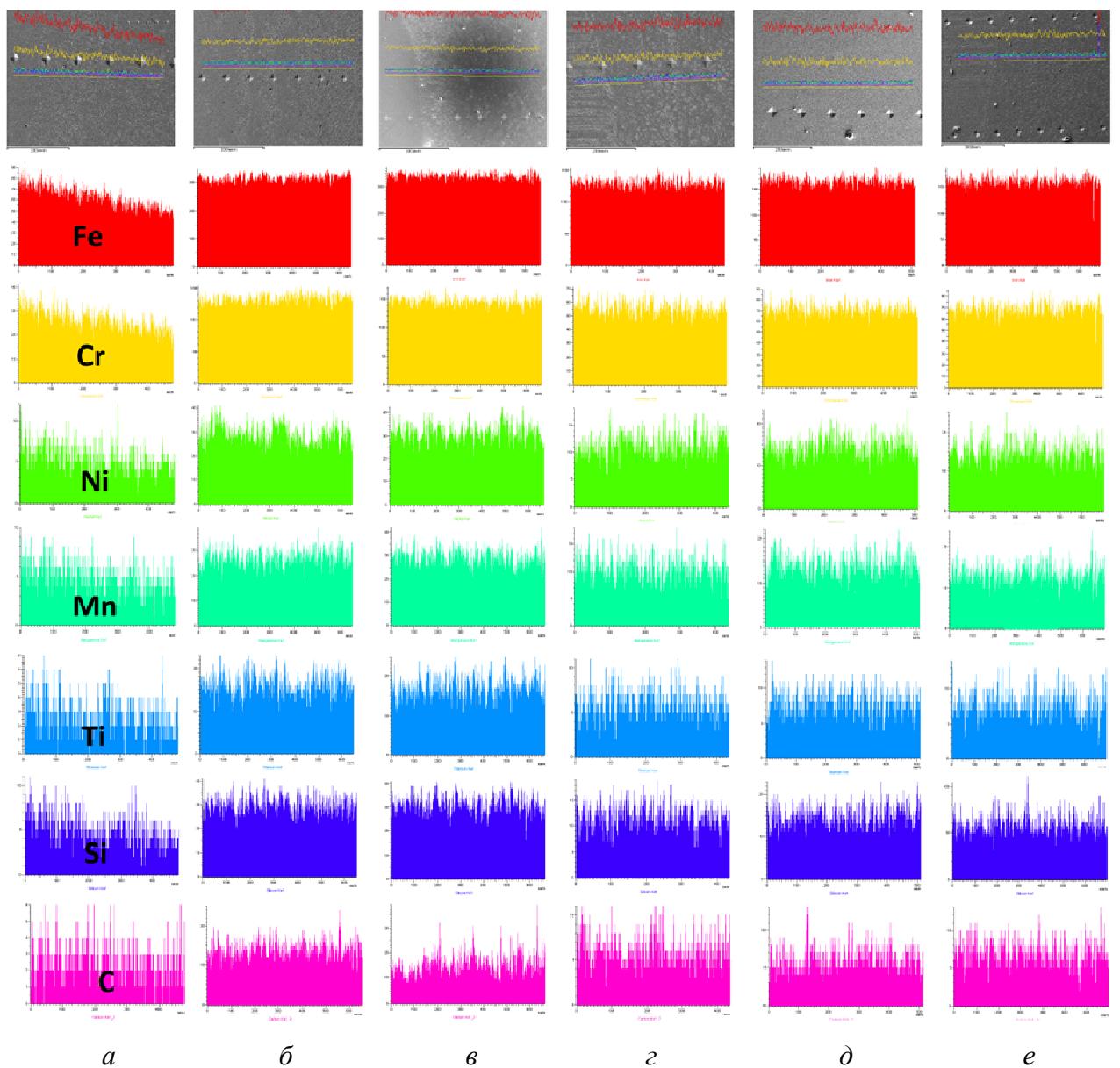


Рисунок 3.12 – ЭДС-анализ линейного сканирования нержавеющей стали 321:
а – без акустического воздействия и при разных частотах наложенных акустических волн:
б – 15 кГц; *в* – 22 кГц; *г* – 40 кГц; *δ* – 80 кГц; *ε* – 100 кГц

Из рисунка 3.12 видно, что наиболее равномерное распределение основных элементов достигается при наложении в процессе лазерной сварки акустических колебаний частотой 22 (рис. 3.12, *в*) и 80 кГц (рис. 3.12, *д*), однако сегрегация никеля значительна для всех сварных швов, о чем свидетельствуют всплески и впадины на гистограммах. Поскольку углерод и никель являются сильными стабилизаторами аустенита, наличие светлых аустенитных участков в полученных соединениях обусловлено воздействием Ni на частоте 15 кГц (рисунок 3.12, *б*) и С на частоте 40 кГц (рисунок 3.12, *г*). Это подтверждается соответствующими пиками на диаграммах [137, 138].

Когда металл находится в таком критическом диапазоне температур, карбиды хрома выделяются по границам аустенитных зерен. Все это может иметь последствия – хрупкое разрушение конструкции в процессе эксплуатации. На рисунке 3.12 видно, что сегрегация хрома равномерно распределяется по сечению шва в результате акустических колебаний расплавленной ванны при лазерной сварке.

Важным вопросом является то, как изменения микроструктуры сварного шва, вызванные ультразвуковой обработкой, влияют на его механические свойства. На рисунке 3.13 показаны испытания сварных образцов на трехточечный изгиб, полученные при различных лазерно-акустических условиях. Кривая для образца, сваренного без акустического воздействия, показана красным цветом. Испытание на трехточечный изгиб показало, что все испытанные образцы имели хорошие пластические характеристики. Однако, как видно из рисунка, все образцы, сваренные с применением ультразвуковых колебаний, показали хорошую стойкость к разрушению при изгибе. Максимальное значение прочности достигается при сварке образцов на частотах 80 и 40 кГц. Однако величина смещения образца, сваренного на частоте 80 кГц, имеет максимальное значение относительно других образцов. Снижение пластичности образца, сваренного при 40 и 100 кГц, относительно образца, сваренного при 80 кГц, можно объяснить наличием пор и трещин, как это было показано ранее. Видно, что напряжения и деформации образцов, сваренных с

ультразвуковыми колебаниями частотой 80 кГц, соответственно в 1,3 и 1,5 раза выше по сравнению с образцом, сваренным без обработки ультразвуком. Предположительно, повышение пластичности и прочности связано с отмеченным снижением пористости, фрагментацией пластин δ -феррита и снижением химической неоднородности в сварном шве [137, 138].

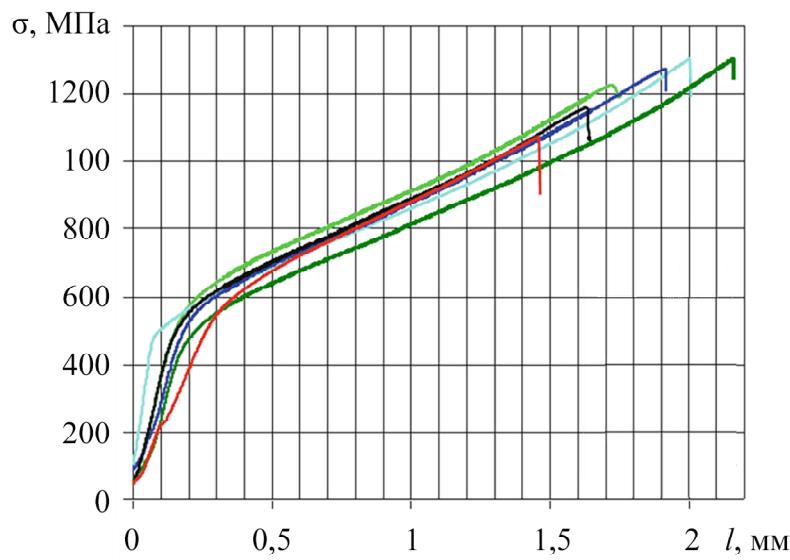


Рисунок 3.13 – Кривые трехточечного изгиба в координатах нагрузка-перемещение

для образцов, сваренных при различных частотах ультразвуковой обработки:

— 0 кГц; — 15 кГц; — 22 кГц; — 40 кГц; — 80 кГц; — 100 кГц

Таким образом, все основные параметры сварного шва: его форма, распределение пор и химических элементов, микротвердость в значительной степени зависят от обработки ультразвуком процесса лазерной сварки и от частоты накладываемого акустического поля. Наложение ультразвуковых колебаний частотой 80 кГц на лазерную сварку позволяет получить шов с однородной структурой и химическим составом по сечению без обнаруживаемых пор. С увеличением частоты колебаний происходит снижение средних значений твердости, а максимальное значение твердости достигается при лазерной сварке с акустическими колебаниями на частоте 22 кГц. Обработка ультразвуком на частоте 80 кГц позволяет получить однородную структуру. При этом в структуре обнаруживается скелетный δ -феррит на всем протяжении

шва. Кавитация, вызванная акустическими колебаниями в расплавленном металле, приводит к схлопыванию крупных пузырей. В этом случае микропоры, возникающие в результате кавитации, служат центрами кристаллизации, что может объяснить структуру измельчения и уменьшение размеров ферритовых пластин. Предполагается появление сонокапиллярного эффекта на частоте 15 кГц.

3.3 Исследование закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов в металле образцов, полученных различными методами аддитивного производства и сваренных лазерно-акустическим методом

Для проведения лазерной сварки использовались образцы из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки (прокат), Inconel 718 и сплава 17-4 РН следующих размеров (в мм): 3 (толщина), 10 (ширина), 100 (длина). При сварке образцов было выбрано значение расфокусировки + 10 мм, чтобы избежать вскипания и испарения металла и разбрызгивания капель расплава. Такая фокусировка обеспечивала необходимый диаметр лазерного пятна без значительных потерь мощности. В качестве материалов для сварки использовался сплав 12Х18Н10Т, Inconel 718 и 17-4РН. Химический состав сплава 12Х18Н10Т, 17-4РН и Inconel представлен в таблице 3.1 соответственно [135 – 137]. Основные параметры режима процесса лазерной сварки: скорость сварки – 11 мм/с; мощность лазера – 0,5 кВт; расход защитного газа аргон – 25 л/мин; угол наклона лазерного луча относительно поверхности металла – 19 град.

На рисунке 3.14 можно видеть, что микроструктура сварного шва представлена крупными дендритными кристаллами, ориентированными преимущественно к центру сварного шва, при этом обнаруживается достаточно четкая граница между сварным швом и металлом DMLS (17-4РН), однако в сварном шве наблюдаются светлые нетравящиеся участки, которые предположительно сформировались в результате перемешивания металла заготовки со сварным швом [135].

Таблица 3.1 – Химический состав стали

Элемент	Процентное содержание, %		
	Марка стали 12Х18Н10Т	Марка стали 17-4РН	Марка стали Inconel 718
Si	0,8	1	–
Mn	2	1	–
Ti	0,5	–	0,8
Ni	10	3,5 – 5,5	51,7
S	0,02	–	–
P	0,035	–	–
Cr	18	14 – 15,5	–
Fe	68,56	Осн.	20
Mo	–	0,5	3,17
Cu	–	2,5 – 4,5	–
Nb	–	0,15 – 0,45	5,25
Al	–	–	0,46
O	–	–	0,023
C	0,08	0,07	0,036

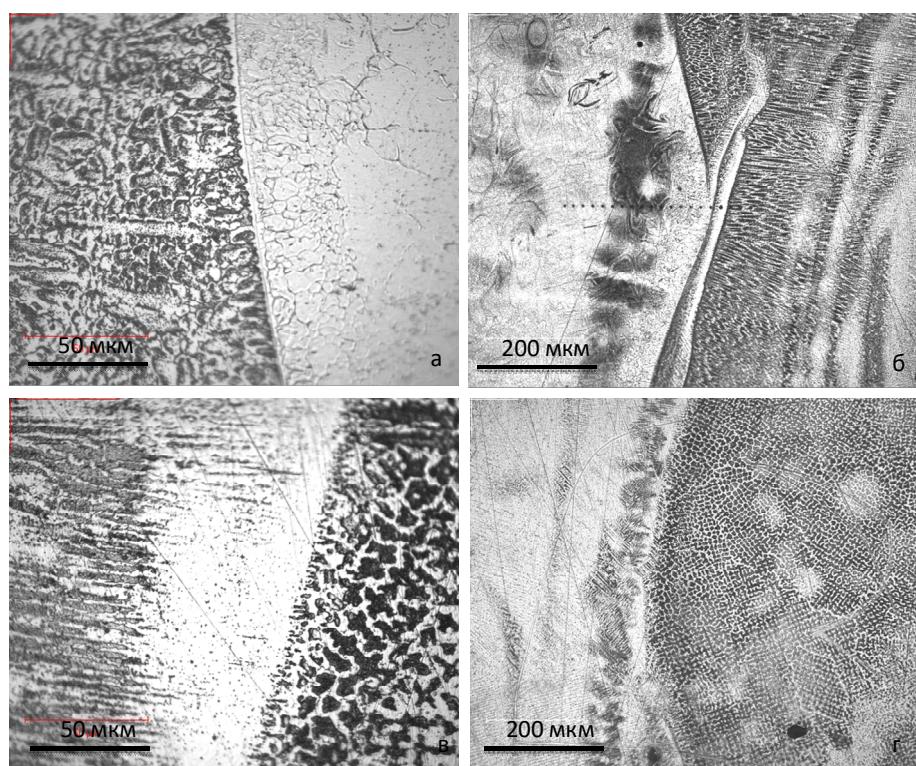


Рисунок 3.14 – Микроструктура сварного шва DMLS (17-4PH) и DED (Inconel 718)

Для сварного шва, представленного на рисунке 3.15, также можно видеть участки нетравленого металла, которые в данном случае сформированы благодаря перемешиванию сплава 12X18H10T (прокат) с DED (Inconel 718). При этом в сварном шве не обнаруживаются дефекты типа пор и трещин.

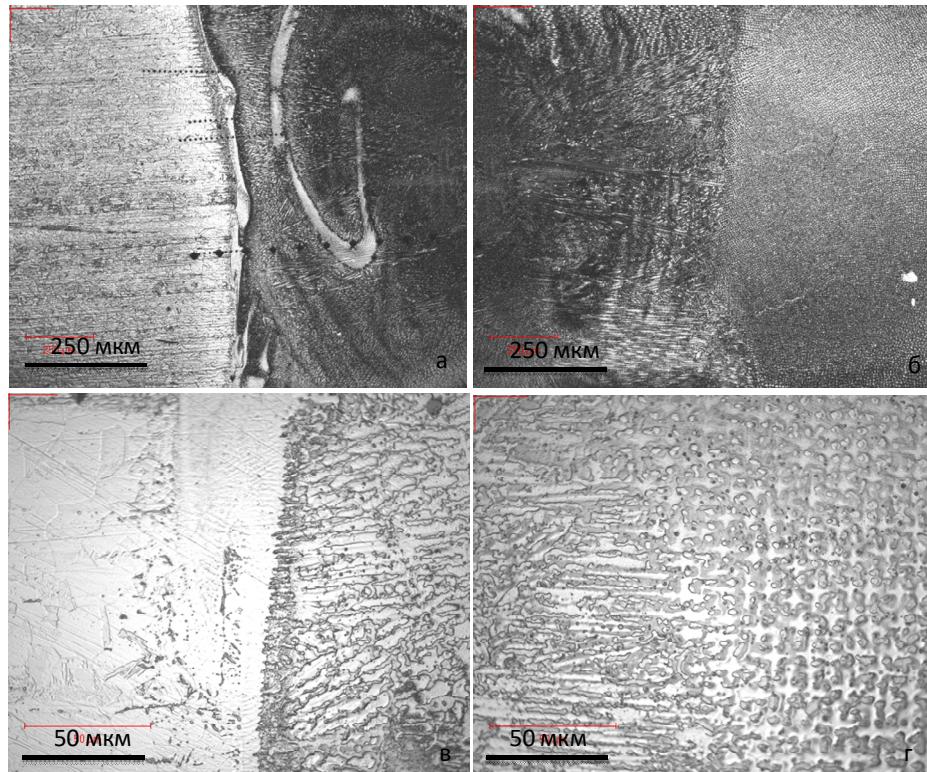


Рисунок 3.15 – Микроструктура сварного шва DED (Inconel 718) и 12X18H10T (прокат)

На рисунке 3.16 представлена микроструктура сварного шва 12X18H10T (прокат) и DMLS (17-4PH), на которой видно, что перемешивание происходит преимущественно в DMLS (17-4PH). Как можно заметить, включения типа Ti(C, N), характерные для металла 12X18H10T (прокат), в сварном шве не наблюдаются, но на границе между сварным швом и основным металлом обнаруживаются включения данного типа размером 10 мкм. На рисунке 3.17, где представлены данные микротвердости в области сварного шва и основного металла, можно видеть, что для DMLS (17-4PH) и DED (Inconel 718) микротвердость сварного шва близка к значениям твердости основного металла (рисунок 3.17, *a*). При этом при переходе от DMLS (17-4PH) к DED (Inconel 718) через сварной шов твердость меняется равномерно (рисунок 3.17, *б, в*) [135].

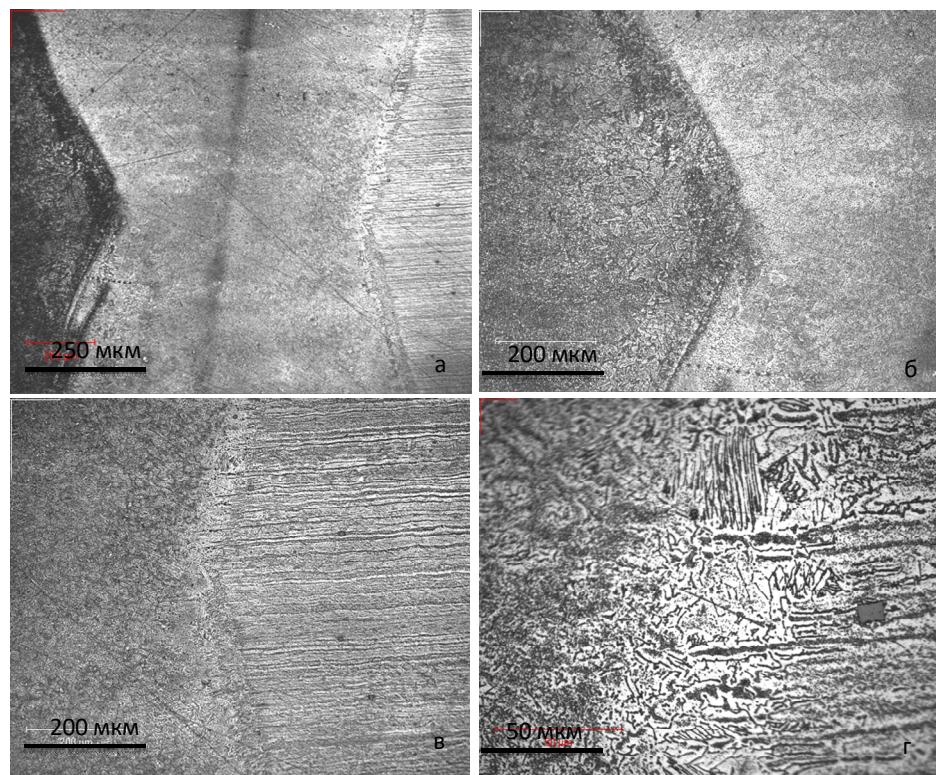


Рисунок 3.16 – Микроструктура сварного шва DMLS (17-4PH) и 12X18H10T (прокат)

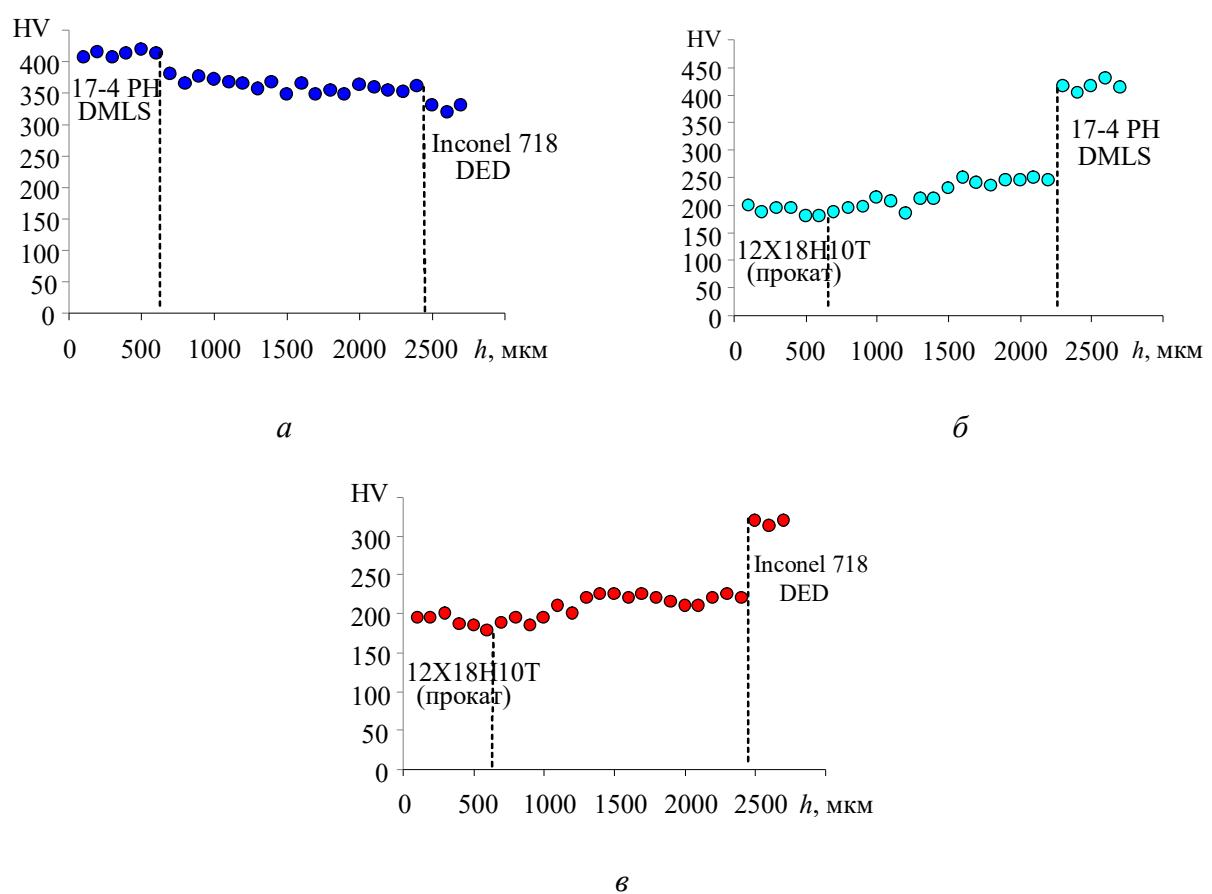


Рисунок 3.17. Микротвердость сварных швов, полученных лазерно-акустическим методом

Для случаев DMLS (17-4PH) и 12X18H10T (прокат), а также DED (Inconel 718) и 12X18H10T (прокат) в переходной зоне от сварного шва к основному металлу DMLS (17-4PH) значение микротвердости отличается приблизительно в 2 раза, однако в сварных швах для всех случаев дефекты типа пор и трещин не обнаруживаются [135 – 137].

Глава 4 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

В главе 4 показаны возможности использования ультразвуковых колебаний в процессе лазерной сварки и наплавки. Для исследования влияния вибраций на соответствующие процессы использовались оптическая и электронная микроскопия, локальный элементный анализ, рентгеновская томография и испытания на растяжение. Показано, что ультразвуковые колебания можно использовать двумя различными способами: 1) ультразвуковой обработкой непосредственно в процессе сварки и наплавки; 2) постобработкой готового сварного шва или наплавленного металла. В случае 1) ультразвуковое воздействие приводит к уменьшению толщины сварного шва и увеличению глубины провара. В случае 2) ультразвуковая дообработка образцов, полученных методом послойного прямого лазерного нанесения металла, приводит к увеличению прочности наплавленного материала до 1,3 раза. Показано, что эффект обусловлен формированием в поверхностных слоях образцов ориентированной высокодисперсной структуры [137, 138, 141, 143 – 145].

4.1 Влияние технологической схемы лазерной сварки труб на свойства сварного соединения

Отработка технологической схемы лазерной сварки осуществлялась на примере сварки бывших в употреблении (БУ) насосно-компрессорных труб (НКТ). При этом были определены общий план и стратегия выполнения работ по

отработке технологической схемы автоматической лазерной сварки НКТ, а также произведен отбор номенклатуры для проведения работ по отработке базовой технологической схемы лазерной сварки. В соответствии с техническим заданием и предварительными оценками перспективности проведения работ был отобран базовый комплект номенклатуры БУ НКТ, изготовленных по ГОСТ 633-80 и ГОСТ Р 52203-2004. Выбранные БУ НКТ различаются по виду и методу разделки торца: разделка торца под 90° , выполненная методом торцевания на токарном станке; разделка торца под 90° , выполненная методом отрезания на ленточной пиле; разделка торца под 90° , выполненная методом лазерной резки; разделка торца под 45° с наружным и внутренним конусом, выполненная методом подрезки на токарном станке (рисунок 4.1).

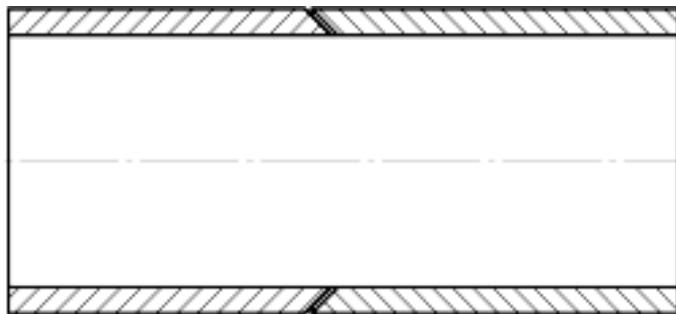


Рисунок 4.1 – Образец торца под 45° ,
подрезанного на токарном станке

Выбранные НКТ различаются по виду эксплуатации: БУ НКТ, эксплуатируемые в обычных условиях; БУ НКТ, эксплуатируемые в средах с повышенным содержанием серы.

По выбранным НКТ выбрали пробную партию образцов для проведения работ по входному контролю и предварительному анализу параметров представленных НКТ, влияющих на методы и условия автоматической ЛС. Анализ геометрических параметров представленных БУ НКТ, изготовленных по ГОСТ 633-80 и ГОСТ Р 52203-2004, проведен согласно выбранной номенклатуре по критерию возможного влияния погрешностей формы на технологичность и качества сварных соединений. Представленные образцы имели дефекты формы.

Фактическое среднестатистическое отклонение толщины стенки от заявленного номинала составило 0,169 мм, максимальное отклонение +0,38 мм – 0,07мм (таблица 4.1 и рисунок 4.2).

Таблица 4.1 – Снятие размеров по толщине стенки

Номер образца	Размер				Среднестатистическое отклонение по абсолютному значению
	S1	S2	S3	S4	
1	5,88	5,82	5,82	5,72	0,31
2	5,74	5,77	5,84	5,85	0,3
3	5,64	5,43	5,54	5,56	0,0425
4	5,53	5,47	5,43	5,51	-0,015
5	5,85	5,77	5,53	5,68	0,2075

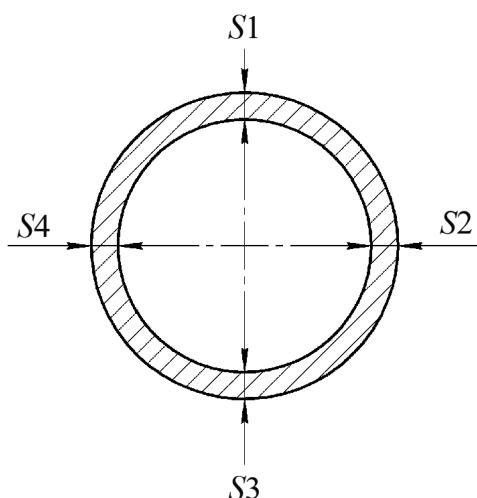


Рисунок 4.2 – Схема снятия размеров по толщине стенки

Отклонение формы в продольном сечении по наружному и внутреннему диаметрам было существенным. Фактическое среднестатистическое отклонение формы в поперечном сечении по наружному диаметру, т.е. овальность, составляет 0,42 мм (таблица 4.2 и рисунок 4.3).

Фактическое среднестатистическое отклонение формы в поперечном сечении по внутреннему диаметру, т.е. несоосность, составило 0,09 мм (таблица 4.2, рисунок 4.4).

Таблица 4.2 – Отклонение формы

Номер образца	Размер		Отклонение по абсолютному значению
	D_{\max}	D_{\min}	
Биение наружного диаметра			
1	73,52	73,01	0,51
2	73,71	73,1	0,61
3	73,22	72,92	0,3
3	73,31	72,94	0,37
5	73,36	73,03	0,32
Биение внутреннего диаметра			
1	0,1	0,08	0,09
2	0,07	0,06	0,075
3	0,16	0,1	0,13
4	0,05	0,08	0,065
5	0,08	0,1	0,09

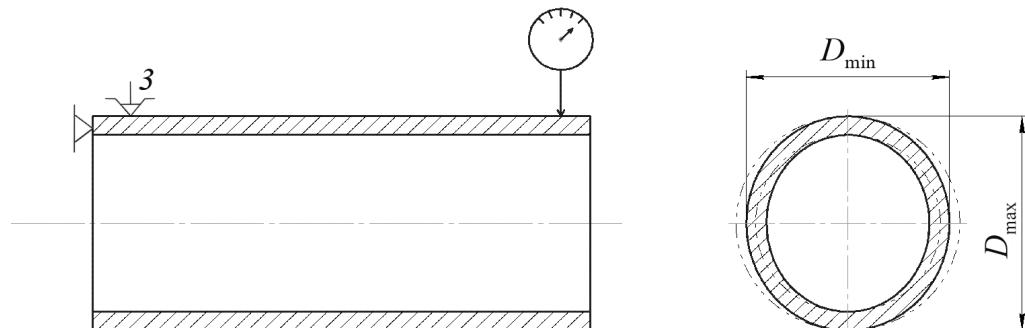


Рисунок 4.3 – Схема снятия размеров овальности

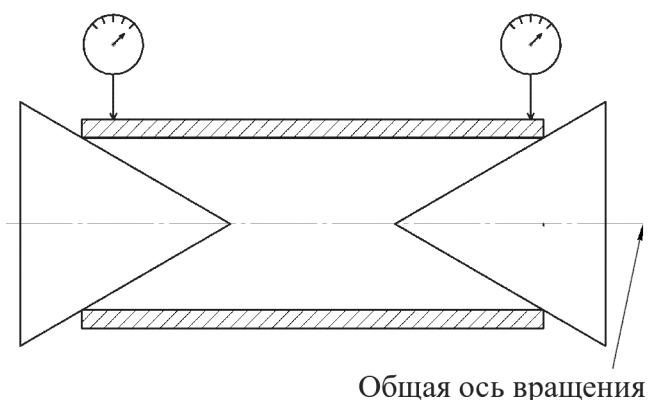


Рисунок 4.4 – Схема снятия размеров несоосности

Был проведен анализ химического состава представленных БУ НКТ на свариваемость и возможное влияние на технологичность и качество сварных соединений (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Химический анализ образцов

Элемент	Процентное содержание, %	
	сегмента трубы	ответной части трубы
Si	0,17	0,2
Mn	1,33	1,27
Ni	0,02	0,08
S	0,0097	0,033
P	0,01	0,01
Cr	0,4	0,09
V	0,0039	0,002
N	0,004	0,004
Cu	0,056	0,171

Изначально трубы были изготовлены из стали 09Г2С, но в процессе их использования химический состав претерпел изменения. Анализ физического состояния труб показал, что представленные образцы имеют величины шероховатости поверхности торцов, представленные на рисунке 4.5.

Образцы были подготовлены следующим образом:

- образец №1 – разделка торца под 90° , выполненная методом торцевания на токарном станке, параметры шероховатости при этом имели значения $Rz = 10,714$; $Ra = 1,832$;
- образец №2 – разделка торца под 90° , выполненная методом отрезания на ленточной пиле, параметры шероховатости $Rz = 26,825$; $Ra = 4,972$;
- образец №3 – разделка торца под 45° с внутренним конусом, выполненная методом подрезки на токарном станке, параметры шероховатости $Rz = 11,901$; $Ra = 1,905$.
- образец №4 – разделка торца под 45° с наружным конусом, выполненная методом подрезки на токарном станке, параметры шероховатости $Rz = 19,076$; $Ra = 3,887$.

Величины шероховатостей представленных образцов, независимо от вида разделки торцов, большого влияния на качество и вид сварного соединения не оказывают. Представленные образцы имеют величины твердости, приведенные в таблице 4.4.

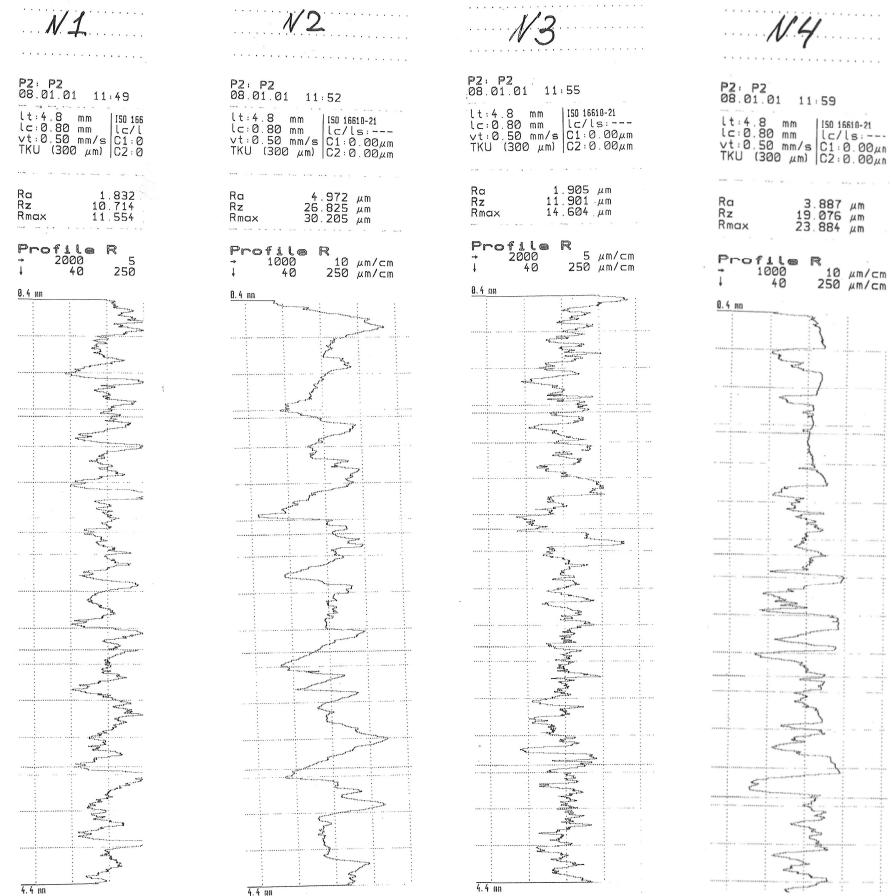


Рисунок 4.5 – Шероховатость поверхностей торцов труб

Таблица 4.4 – Результаты измерения твердости поверхности труб

Номер образца	Твердость HRC	HRC среднее
1	50.1, 48.5, 50.3, 51.6, 50.6	50.22
2	53.7, 54.5, 54.4, 55.9, 56.9	55.08
3	53.8, 54.7, 56.1, 57.0, 55.7	55.46
4	56.1, 55.4, 53.2, 58.4, 58.1	56.24
5	58.5, 58.9, 56.4, 57.3, 58.4	57.52
6	54.5, 57.4, 59.6, 57.7, 56.1	57.06
7	59.8, 63.0, 61.3, 63.9, 62.1	62.02
8	62.3, 61.4, 63.6, 61.5, 59.2	61.6

Величины твердости и результаты химического анализа подтверждают, что материал труб является условно свариваемым и отработку режимов сварки необходимо проводить с постоянным контролем остаточных напряжений, учитывая технологическую схему мероприятий по нормализации сварного соединения.

Представленные образцы имеют повышенную степень поверхностного загрязнения остатками и отложениями технических жидкостей органического и неорганического происхождения. При отработке технологической схемы, непосредственно привязанной к проектируемой установке ЛС, необходимо учесть этап зачистки внутренних и наружных поверхностей, обеспечивающий устранение видимых инородных (не металлических) фракций и оксида железа на ширину не менее 10 мм от края торца сопрягаемых элементов.

Сборочная схема с оснасткой длястыковки труб показана на рисунке 4.6.

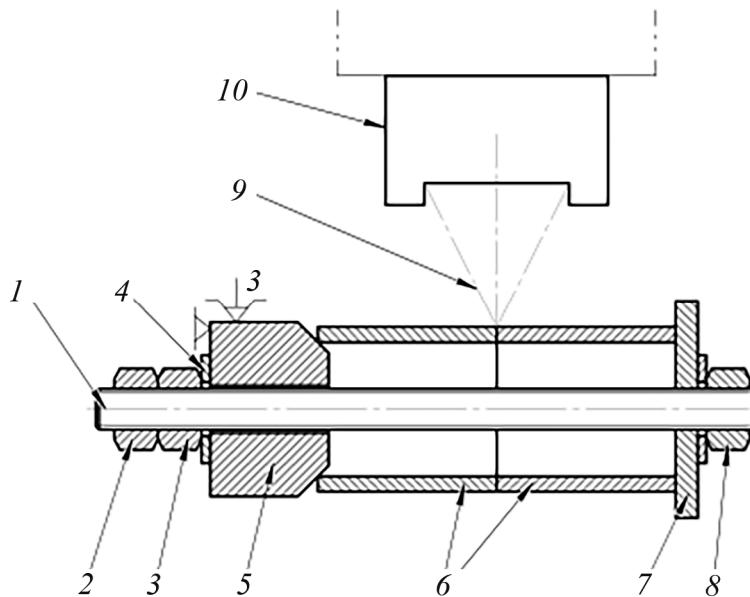


Рисунок 4.6 – Схема тестового провара с оснасткой:

- 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – контргайка; 4 – шайба; 5 – конусный упор; 6 –стыкуемые трубы;
- 7 – зажимная шайба; 8 – зажимная гайка; 9 – схема фокусировки лазера;
- 10 – лазерная сварочная голова Kugler

Тестовые режимы лазерной сварки в два прохода с использованием проволоки представлены на рисунке 4.7. Первый проход лазерной сварки осуществлялся с параметрами: мощность 10 кВт, скорость 30 мм/с, частота

колебаний лазера 15 Гц, амплитуда колебаний 2000; второй проход – с параметрами: мощность 2 кВт, скорость 10 мм/с, частота колебаний лазера 15 Гц, амплитуда колебаний 2000.



Рисунок 4.7 – Сварка трубы 09Г2С методом лазерной сварки в два прохода

Гибридный режим лазерной сварки представлял собой сочетание следующих параметров: сила тока 63 А, напряжение 10,3 В.



Рисунок 4.8 – Сварной шов, выполненный методом гибридной сварки

Рентгеновские снимки гибридной и классической ЛС показаны на рисунке 4.9.

Насосно-компрессорные трубы эксплуатировались в нормальных условиях (торцованные ленточной пилой под 90° не подходят для лазерной сварки). Пристыковке данных труб наблюдается стабильный зазор 1-2 мм на больших

секторах соединения (порядка 30-40 мм длины). Среднестатистическая величина торцевого бienia 1,009 мм. Образцы, имеющие погрешности формы и качества состояния, не могут быть сварены с использованием ЛС. НКТ (эксплуатировались в нормальных условиях), торцовые на токарном станке под 45° (рисунок 4.10) с наружным и внутренним конусом, не подходят для лазерной сварки, так как исходим из условия, что сварка должна происходить вертикально, трубы выставляются под 45° относительно инструмента. Глубина шва увеличивается, имеется разность расположения толщин материала относительно лазерного пятна. Примерный радиус расфокусированного пятна лазера составляет (по выбранным режимам и технологической схеме) 5-7 мм. В данном случае образуются неравномерный прогрев соединенных поверхностей и, как следствие, – пустоты, каналы, непровары. Полученные трубы имеют весьма грубую обработку с отклонениями $1-2^\circ$ от номинального значения, и при стыковке методом визуального контроля можно установить неплотность создаваемого соединения.

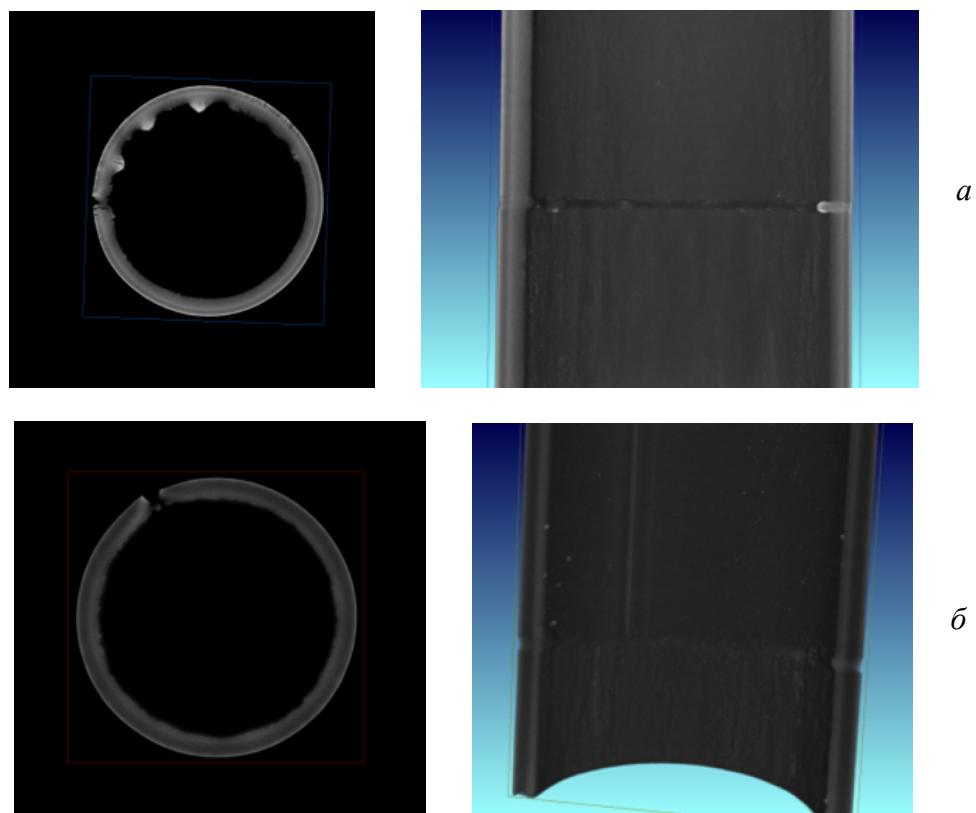


Рисунок 4.9 – Рентгеновский снимок трубы, сваренной лазерной сваркой:
 а – гибридной; б – классической

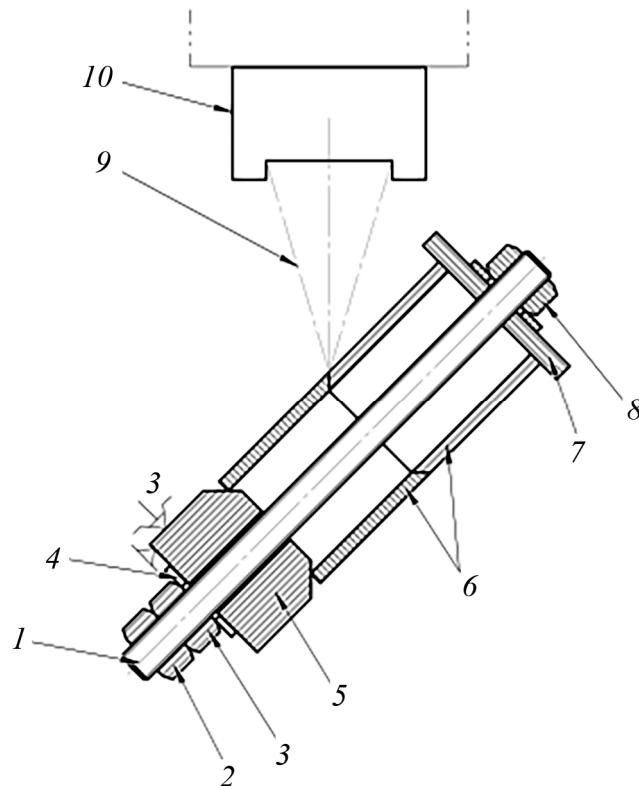


Рисунок 4.10 – Схема сварки под углом 45°:

1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – контргайка; 4 – шайба; 5 – конусный упор; 6 –стыкуемые трубы; 7 – зажимная шайба; 8 – зажимная гайка; 9 – схема фокусировки лазера; 10 – лазерная сварочная голова Kugler

Принципиальная схема на рисунок 4.11 показывает разность высоты падения лазерного излучения на металл в зависимости от фокусировочной точки.

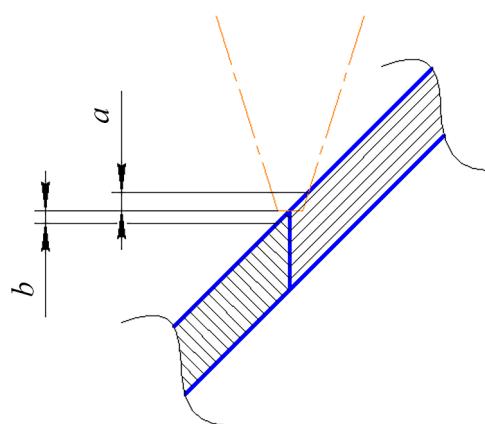


Рисунок 4.11 – Схема сварки под углом 45°

На трубу, которая находится с левой стороны эскиза, луч попадет в сфокусированное состояние. Диаметр пятна будет уменьшен пропорционально значению b (рисунок 4.11), соответственно прогрев будет выше от номинального.

На трубу, которая находится с правой стороны эскиза, луч попадет в расфокусированное состояние. Диаметр пятна будет увеличен пропорционально значению a (рисунок 4.11), прогрев будет значительно ниже от номинального. Рассмотрев данный эскиз, можно предположить, что прогрев стенок будет неравномерным, что может привести к браку создаваемого соединения (непровары, кратеры, подрезы).

4.1.1. Отработка режимов сварки на плоских образцах

Для полнофакторного просмотра процесса лазерной сварки БУ НКТ был составлен список всех наиболее значимых составляющих сварочного процесса лазерной сварки.

Процессы, происходящие при сварке и напрямую влияющие на образование режима:

- 1) термодинамические:
 - а) нагрев поверхности металла за счет энергии лазера,
 - б) распространение энергии по объему металла,
 - в) поглощение части энергии на нагрев/расплавление присадочной проволоки (опционально);
- 2) оптические:
 - а) поглощение излучения,
 - б) отражение излучения,
 - в) процессы многократного отражения лазерного излучения внутри сварочной ванны,
 - г) поглощение и отражение части излучения от присадочной проволоки (опционально),
 - д) отражение излучения от «металлической» линзы,
 - е) поглощение части излучения столбом плазмы;
- 3) гидро-газодинамические:
 - а) влияние расхода (давления) защитного газа,
 - б) поведение металла в жидкой фазе;

- 4) металлургические:
- скорость перехода в жидкую фазу,
 - скорость кристаллизации металла,
 - условия, определяющие образование мелкозернистой структуры шва,
 - процессы взаимодействия металла в жидкой фазе с внешней средой.

Влияние параметров на процесс образования сварного шва в отдельных процессах:

1а – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], смещение фокусного расстояния [мм], скорость подачи присадочной проволоки [м/мин],

1б – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], смещение фокусного расстояния [мм],

1в – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], смещение фокусного расстояния [мм], скорость подачи присадочной проволоки [м/мин];

2а – качество подготовки поверхности [шероховатость, Ra, мкм], скорость сварки [м/с], смещение фокусного расстояния [мм],

2б – качество подготовки поверхности [шероховатость, Ra, мкм], скорость сварки [м/с], смещение фокусного расстояния [мм],

2в – скорость сварки [м/с], смещение фокусного расстояния [мм],

2г – скорость сварки [м/с], смещение фокусного расстояния [мм], скорость подачи присадочной проволоки [м/мин], мощность лазерного излучения [кВт],

2д – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], угол наклона лазерного излучения по отношению к поверхности металла [град.],

2е – угол наклона лазерного излучения по отношению к поверхности металла [град.];

3а – расход защитного газа [л/мин], давление защитного газа [МПа],

3б – расход защитного газа [л/мин], давление защитного газа [МПа], скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт];

4а – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], расход защитного газа [л/мин],

4б – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], расход защитного газа [л/мин],

4в – скорость сварки [м/с], мощность лазерного излучения [кВт], расход защитного газа [л/мин], скорость подачи присадочной проволоки [м/мин],

4г – расход защитного газа [л/мин].

Количество параметров во всех процессах определяется по таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Режимы процесса лазерной сварки

Параметры	Значение
Скорость сварки, м/с	11
Мощность лазерного излучения, кВт	9
Расход защитного газа, л/мин	6
Смещение фокусного расстояния, мм	6
Скорость подачи присадочной проволоки, м/мин	4
Угол наклона лазерного излучения по отношению к поверхности металла, град	2
Качество подготовки поверхности, шероховатость, Ra, мкм	2

Для осуществления лазерной сварки было определено, какие параметры фиксированы, а на основании которых будут регулироваться режимы ЛС:

1) скорость сварки – варьируемый параметр, в большинстве процессов является определяющим фактором;

2) мощность излучения – варьируемый параметр, является основополагающим фактором;

3) расход защитного газа – фиксированный параметр. Несмотря на то, что многие условия сварки ссылаются на расход защитного газа, было предпринято решение зафиксировать значение защитного газа на отметке 25 л/мин. При данном расходе и имеющейся системе обеспечения защиты шва достигается стабильное образование «чешуйчатой» лицевой поверхности шва, также мы не заходим в область резки металла (возникает при больших давлениях газа, 0,2 МПа и выше).

В случае недостаточности защиты сварочной ванны (цвета побежалости на шве, наличие окисленных зон) необходимо будет предусмотреть дополнительные каналы подвода защитного газа;

- 4) смещение фокусного расстояния – варьируемый параметр. Из-за изменения фокусного расстояния получаем изменение площади лазерного сфокусированного пучка. Соответственно изменяется значение плотности энергии пучка, приходящееся на квадратный сантиметр площади – основополагающий параметр, определяющий провариваемость материала;
- 5) скорость подачи присадочной проволоки – варьируемый параметр. Величину удаленного материала из зоны сварки (путем разбрзгивания) и дальнейшее его восстановление будет регулироваться скоростью подачи. Также этот параметр влияет на величину валика на лицевой поверхности металла и провар корня шва;
- 6) угол наклона лазерного излучения по отношению к поверхности металла – фиксированный параметр. Чтобы уменьшить размерность решаемой задачи, было принято решение фиксировать это значение в 90° относительно провариваемой детали. Все дефектные процессы, возникающие при сварке (обратное отражение, пульсационные явления), будут устраняться регулированием остальных параметров;
- 7) качество подготовки поверхности – фиксированный параметр. Так как НКТ БУ имеет неравномерный износ по диаметру, было принято решение применять механическую зачистку внешней и внутренней поверхностей трубы до металлического блеска. Таким образом, дефектовке подвергались трубы с большим износом, пробоинами и кавернами;
- 8) торцы стыкуемых элементов трубы по результатам этапа 1 решено подготавливать с требуемыми параметрами.

4.1.2. Зависимость свойств сварного соединения

от расположения фокуса лазера

Для осуществления подбора режимов лазерной сварки были рассмотрены три варианта расположения фокуса: 1) на поверхности (рисунок 4.12, *а*) («в фокусе»); 2) над поверхностью (рисунок 4.12, *б*) («плюсовой фокус»); 3) под поверхностью (рисунок 4.12, *в*) металла («минусовой фокус»).

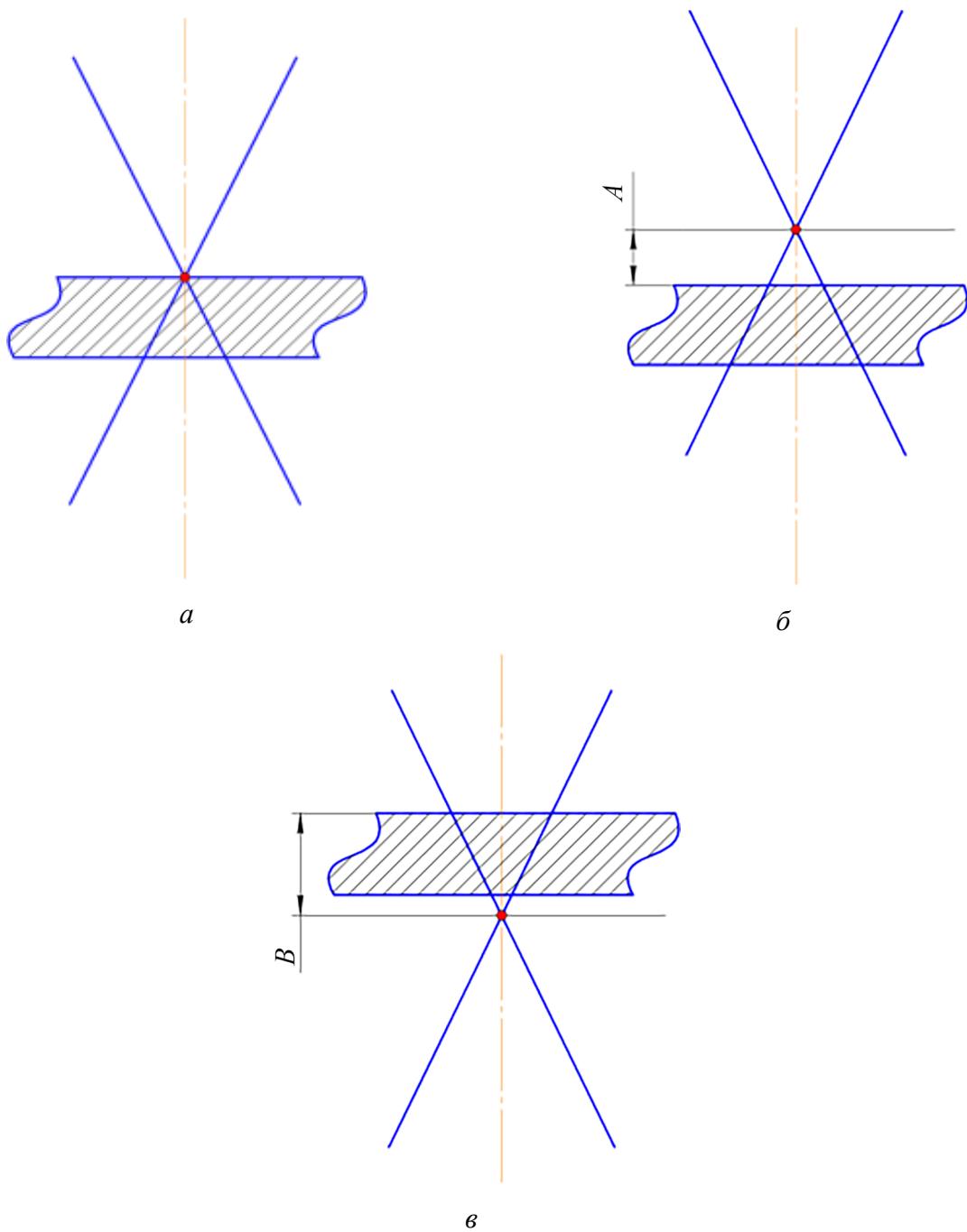


Рисунок 4.12 – Варианты расположения фокуса и лазера:

а – на поверхности металла, «в фокусе», $\Delta f = 0$; *б* – над поверхностью металла, «плюсовой фокус»; $\Delta f > 0$; *в* – под поверхностью металла, «минусовой фокус», $\Delta f < 0$

Рассмотрим каждую схему в отдельности. Первая схема может быть названа «в фокусе» – площадь сфокусированного участка мала, достигает $3 \times 10 - 6 \text{ см}^2$. В данной схеме будет максимальное приложение энергии, температура поверхности будет разогреваться до точки испарения материала (около 3000°C). Данная схема крайне не рекомендуется к сварке.

Вторая схема «Плюсовой фокус» – площадь сфокусированного участка регулируется, для получения требуемого проплава материала требуется выдержать соотношение мощность/скорость. В данной схеме луч лазера фокусируется над поверхностью металла и уже на самой поверхности имеет расфокусированный пучок. Благодаря полученной площади нагрева, можно достигать более равномерного распространения тепла по поверхности металла и использовать энергию луча для расплавления присадочного материала. Сварочная ванная будет иметь кинжалочный характер.

Третья схема «Минусовой фокус» – площадь сфокусированного участка регулируется, для получения требуемого проплава материала требуется выдержать соотношение мощность/скорость. В данной схеме луч лазера фокусируется под поверхностью металла и уже на самой поверхности имеет расфокусированный пучок. Как и в случае «плюсового фокуса», получаем все его преимущества. Для данной схемы характерно наиболее глубокое проникновение излучения в металл, что приводит к сильным «провалам».

4.1.3. Зависимость свойств сварного соединения от плазменного факела

Вследствие происходящих на поверхности высокотемпературных процессов (расплавление материала, выгорание окисленных частиц и т.д.) за сварочной ванной образуется плазменный факел. В зависимости от скорости, мощности и наклона лазерного излучения он имеет различный характер. Типовой вид плазменного факела представлен на рисунке 4.13 в виде шлейфа, расположенного против движения лазерного излучения. Такая схема характерна для мощностей лазера до 10 кВт при скорости 0,03 м/с. На распространение факела также влияет наклон лазерного излучения относительно свариваемой поверхности. При наклоне лазерного излучения плазменный факел получает равно противоположное вдвое меньшее приращение по углу. Данное утверждение верно на углах до 45° . При больших значениях угла площадь нагрева металла значительно увеличивается и происходит возвращение плазменного факела к значению в 90° .

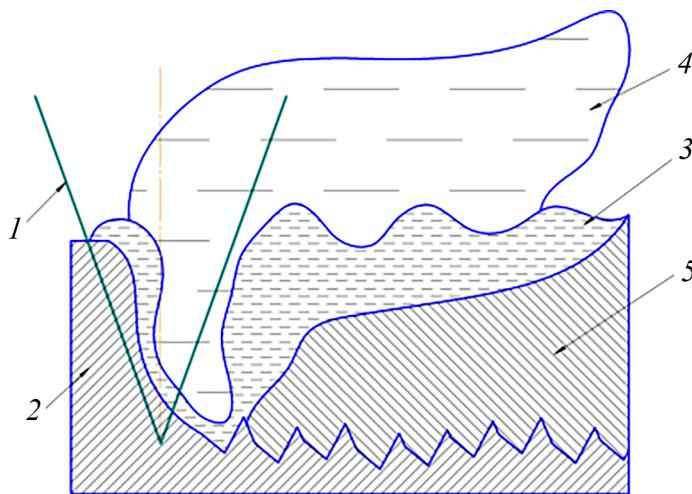


Рисунок 4.13 – Схема лазерной сварки:

1 – сфокусированный лазерный луч; 2 – свариваемый металл; 3 – жидкая фаза металла; 4 – плазменный факел; 5 – закристаллизовавшийся металл

Плазменный факел оказывает исключительно отрицательное влияние на образование сварочного соединения путем ЛС. Из-за плазменного факела становится возможным «догрев» углерода в металле, который при достижении температуры расплавления образует кратковременный газовоздушный канал (процесс кипения). После его истечения с поверхности металла под действием сил натяжения металла образуется его всплеск, приводящий к дефектам сварного шва. Данный процесс происходит непрерывно и имеет пульсационный характер. Также из-за мелкодисперсных частиц, находящихся в облаке, плазменный факел играет роль поглощающего экрана. Данный эффект тоже имеет пульсационный характер. Проблема плазменного факела решается установкой дополнительных «воздушных ножей» для сбивания пульсационной части факела и дополнительной вытяжкой непосредственно в самой зоне сварки.

4.1.4. Зависимость свойств сварного соединения от подготовки поверхности

Подготовка поверхности труб играет важную роль для получения качественного сварного соединения. Зачистка поверхности также позволяет дефектовать трубы с больших износом либо с наличием пробоин, трещин, вмятин. Устранение окислов и загрязнений позволяет улучшить качество сварного шва и снизить количество неметаллических включений в ванне расплава.

4.1.5. Зависимость свойств сварного соединения от толщины стенки трубы

По результатам этапа 1 было установлено, что толщина стенки трубы имеет значение $5,5^{+1,0}_{-0,5}$. Результаты промера 240 линейных сегментов труб (45°-градусные сегменты из 60 труб) представлены на рисунке 4.14.

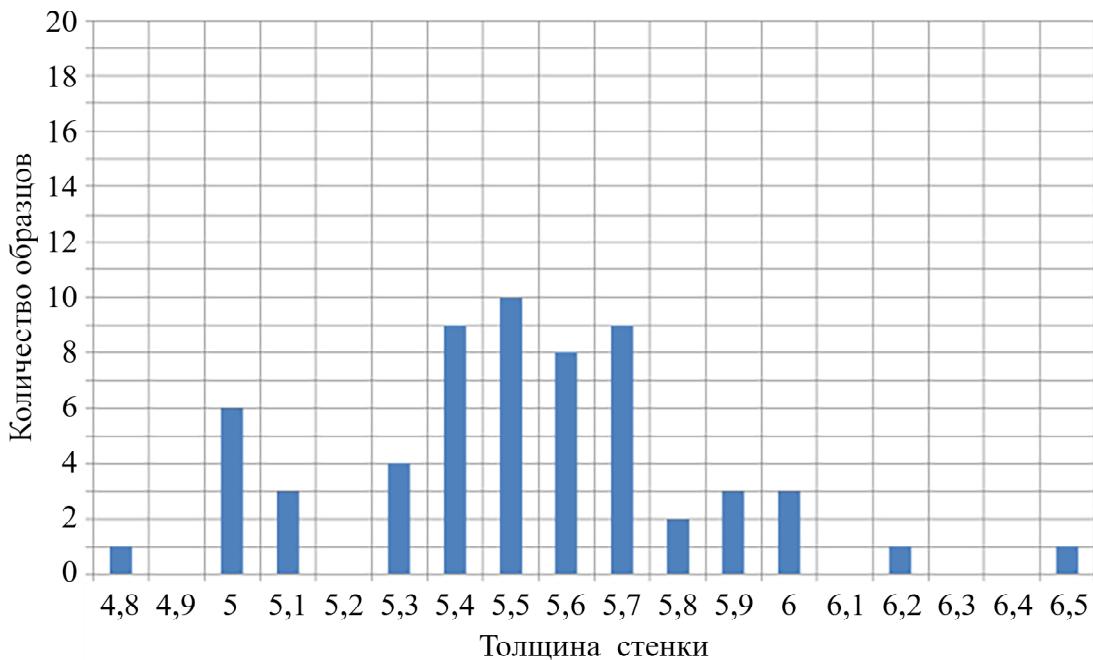


Рисунок 4.14 – Распределение толщин стенок труб НКТ БУ

Данный график указывает на то, что износ труб имеет неравномерный характер, об этом говорит наличие сегментов с размерами 4,8 мм. У трубы продольный сварной шов, так как толщина сегментов 6,5 мм. Данный факт оказывается отрицательно, потому что толщина переменна не по всему диаметру, а в конкретном месте на труbe. Нестыковка двух таких швов приводит к двум непроварам ЛС по диаметру трубы.

4.1.6 Лазерная сварка образцов 09Г2С

После установления всех факторов была осуществлена тестовая сварка труб НКТ БУ. Первая серия экспериментов проводилась по двухфакторной схеме: изменение скорости и мощности ЛС при прочих постоянных параметрах. Данная серия экспериментов проводилась с целью установить благоприятные режимы провара методом ЛС с учетом варьирования смещения фокусной точки.

Для установления зоны провара металла были изготовлены линейные сегменты труб из имеющихся заготовок. Сегменты прошли механическую зачистку поверхности и обезжикивание. Были установлены режимы сварки и проварены сегменты. Далее были построены графики провара на различных смещениях фокусной системы (рис. 4.15). Данные эксперименты проводились без применения присадочной проволоки.

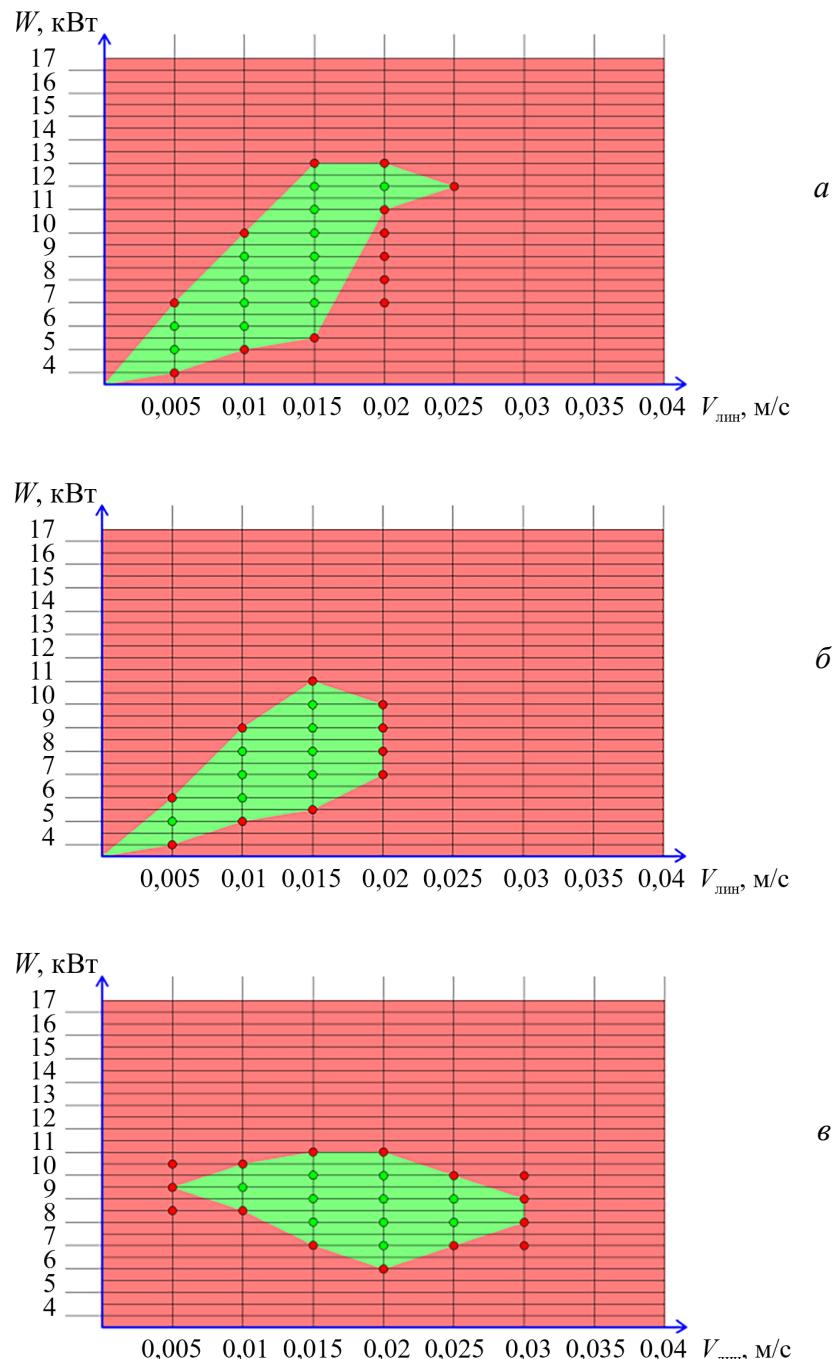


Рисунок 4.15 – Зависимость наличия проплава от скорости движения и мощности лазера:
а – фокус -10; *б* – фокус -15; *в* – фокус +15; *г* – фокус -30 (см. также с. 88)

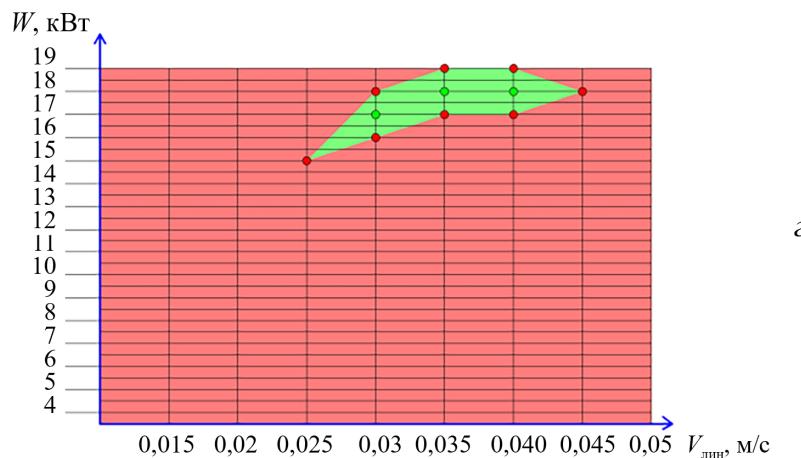


Рисунок 4.15 – Окончание

На каждом графике обозначены: зеленые точки – провар металла без дефектов. Контролировалась усадка металла по внешнему диаметру, отсутствие холодных/горячих трещин, отсутствие не провара, отсутствие пор и свищей методом рентгенографии. Зеленая зона – допустимая зона режимов провара при данных условиях. Красные точки – непровар материала либо недопустимые дефекты сварного шва. Красная зона – недопустимые режимы сварки металла.

При $0 < \Delta f < 10$, $-10 < \Delta f < 0$ наблюдается стабильный проплав материала. Ширина сварочной ванны достигает 4 мм. При $10 < \Delta f < 30$, $-30 < \Delta f < -10$ наблюдается нестабильность процессов (кипение, удаление материала с поверхности), большое количество дефектов. Ширина сварочной ванны достигла 8 мм.

4.1.7. Лазерная сварка насосно-компрессорных труб

с применением проволоки 09Г2С

В результате экспериментальных исследований: выбран оптимальный, статичный режим сварки труб с проточкой, при которой толщина трубы составляет 4,5 – 5 мм; выявлены «проблемные» места – сквозной канал на «входе-выходе», пористость шва, холодные трещины, путем рентген-контроля, изучения шлифов сварного соединения; устранены найденные недостатки и обоснованное внедрение технологических операций для получения требуемого качества

сварного шва; установлено – трубы имеют разный износ, соответственно разные наружные и внутренние диаметры, что пагубно влияет на процесс сварки. Наблюдается нестабильность провара из-за увеличения толщины свариваемых труб. Когда толщина меньше, чем та, для которой подобран режим, приложенной энергии лазерного излучения оказывается слишком много, расплавленный металл начинает течь внутрь трубы, образуя при этом «пузырь».

Для устранения этой проблемы было принято решение о добавлении дополнительной операции перед сваркой труб – создание проточки (чертеж проточки представлен на рисунок 4.16) для выравнивания диаметров труб.

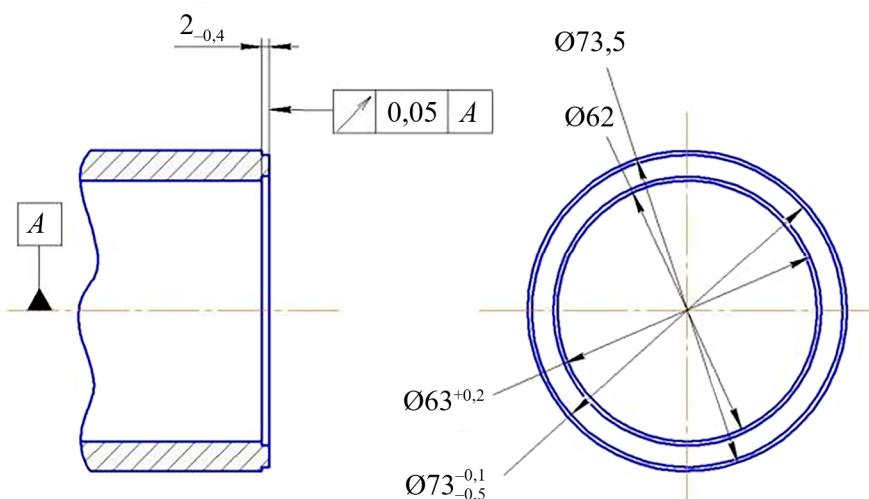


Рисунок 4.16 – Чертеж трубы с проточкой

Для плотнойстыковки и равномерного минимального зазора между свариваемыми элементами трубы торцуются согласно чертежу (рисунок 4.16). На рисунке 4.17 показана программа для работы с осциллографом: зеленая линия – расчетная кривая; белая – действительная.

На рис. 4.18 показан общий вид труб перед началом сварки.

Процесс сварки происходит в два прохода (рисунок 4.18). Технологическая схема: на первом этапе производится сварка трубы лазером, а на втором – наплавка проволоки сверху предварительно полученного сварного шва. Значение мощности на первом этапе сварки по отношению к толщине стенки показано в таблице 4.6.

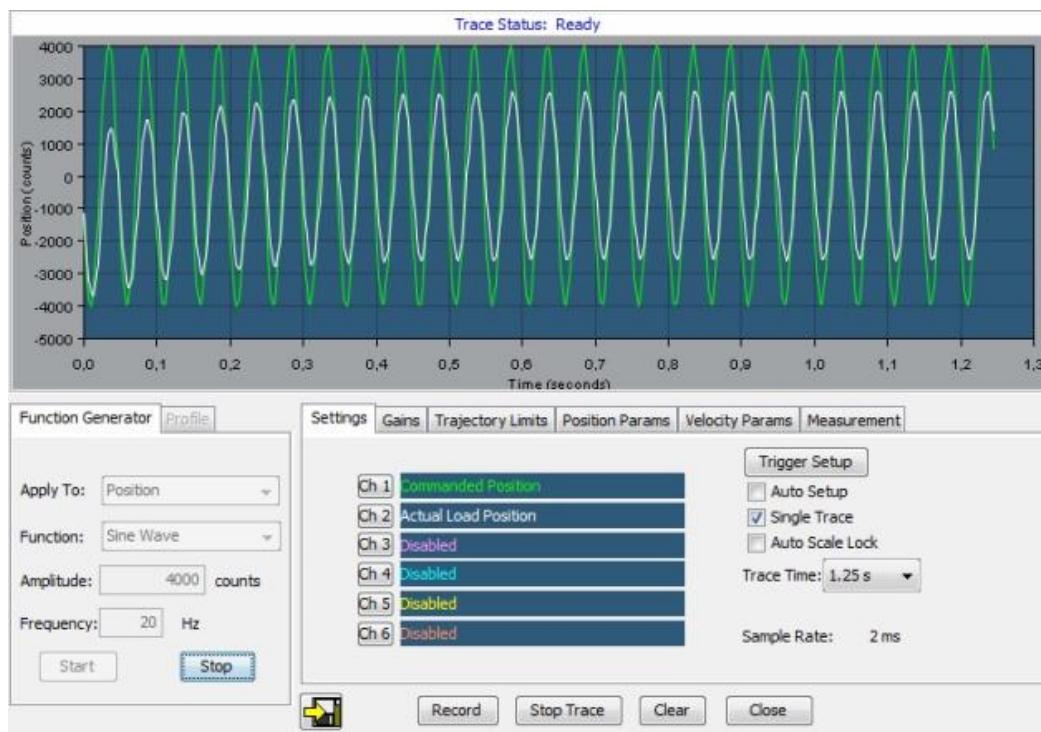


Рисунок 4.17 – Осциллограф



Рисунок 4.18 – Трубы перед началом сварки

Таблица 4.6 – Мощность сварки на различных этапах и толщины стенок труб

Толщина стенки, мм	Мощность, кВт	
	на 1-3-й четвертях	на 4-й четверти
4,48	7,8	8
4,85	8,66	8,6
4,9	8,9	9

Пористость появлялась из-за нехватки присадочного материала, вследствие чего оставались пустоты (рисунок 19, *a*).

Было решено увеличить количество прикладываемой проволоки в сварочном шве для заполнения пустот (пор). Скорость подачи проволоки была увеличена с 2,2 до 3,0 мм/с. Для успешного плавления большего объема присадочного материала была увеличена и мощность. Как видно по рисунку 4.19, *б*, увеличение скорости подачи проволоки привело к избавлению от пористости в шве.

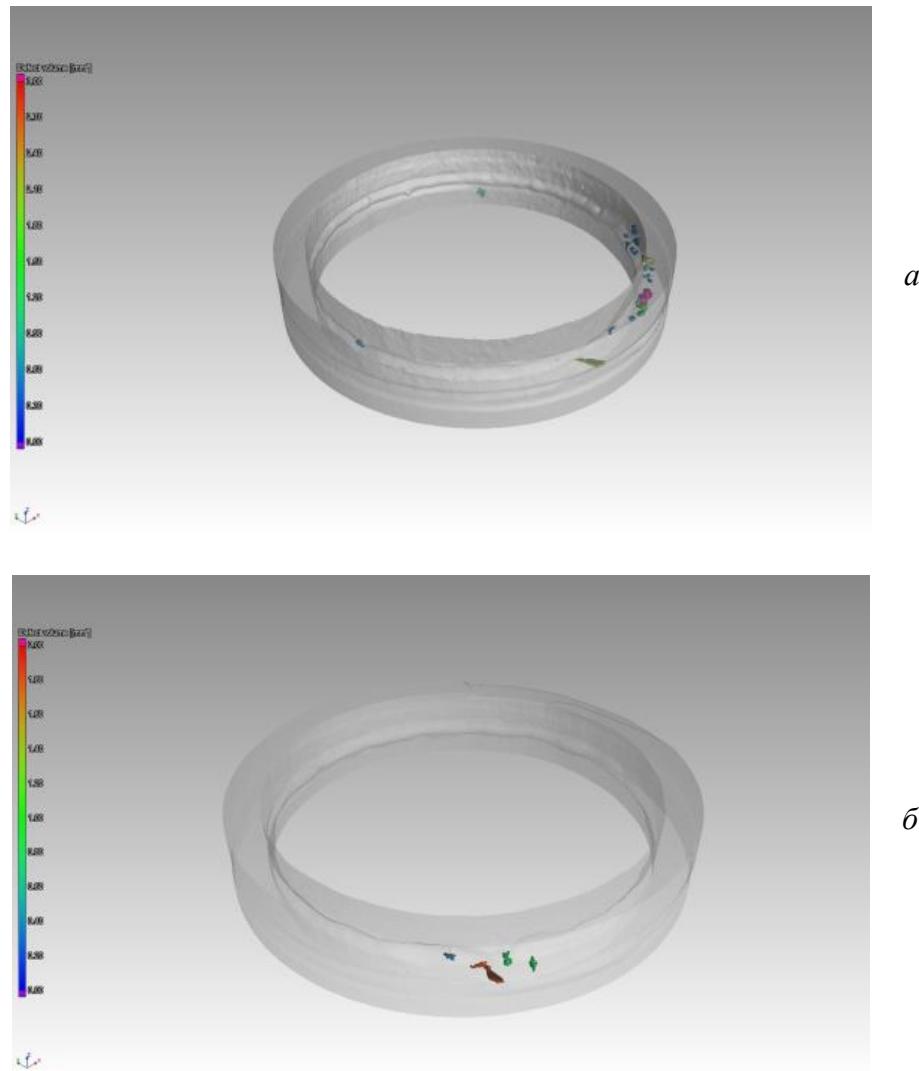


Рисунок 4.19 – 3D-снимок трубы, сделанный на томографе:

а – подача проволоки 2,2 мм/с; *б* – скорость подачи проволоки 3 м/с

Предполагается, что сквозной канал в месте начала сварки образуется из-за того, что в это время лазерное излучение не успевает прогреть весь объем, это происходит постепенно, т.е. расплавленный металл не сразу выходит во внутреннюю сторону шва, а через какое-то время. Ванна расплава долгое время находится под действием непрерывного лазерного излучения, но не имеет

«выхода». Со временем, когда количество отводимого тепла уменьшается, энергии, прилагаемой лазерным излучением, оказывается достаточно для провара на всю толщину, происходит «провал» расплавленного металла и при этом образуется канал. Решением этой проблемы является добавление на старте сварки мощного короткого импульса, который обеспечивает полный провар толщины труб с самого начала сварки. На рисунке 4.20 хорошо виден данный дефект. Параметры импульса: мощность 10 кВт, длительность 30 мс.



Рисунок 4.20 – Поперечный снимок сварного шва трубы

На рисунках 4.21, *а* и *б* видим, что канал отсутствует, значит «вход» (начало и конец сварки) герметичен и не имеет других дефектов.

Появление «пузырей» происходит в моменте, когда расплавленный металл начинает вытекать внутрь трубы, образуя каплю. Внутри трубы защитный газ отсутствует из-за невозможности его подвода. При высокой мощности лазерного, расплавленного металла оказывается больше, чем требуется для создания ванны расплава, излишки начинают вытекать внутрь трубы. Кислород, содержащийся в воздухе внутри трубы, контактирует с жидким металлом, образуя сферические пустоты внутри шва (рисунок 4.22).

Таким образом, мощность лазера подбиралась так, чтобы ее хватало на полный проплав и создание валика внутри трубы высотой не более 1 мм. Такие пустоты появляются, когда при втором проходе, где наплавляется проволока, недостаточно мощности. Проволока расплавляется, но имеет высокую вязкость,

вследствие чего могут появляться пустоты между двумя швами, как показано на рисунке 4.23.

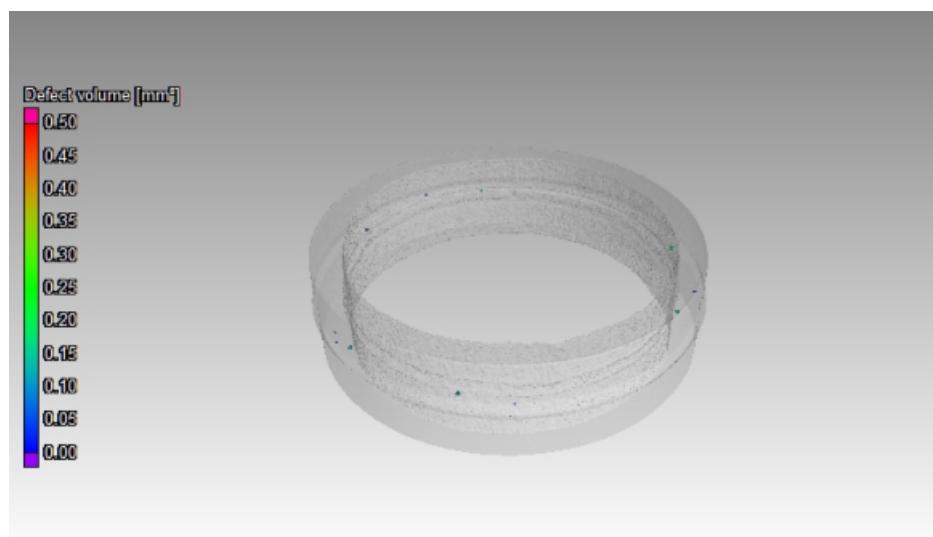
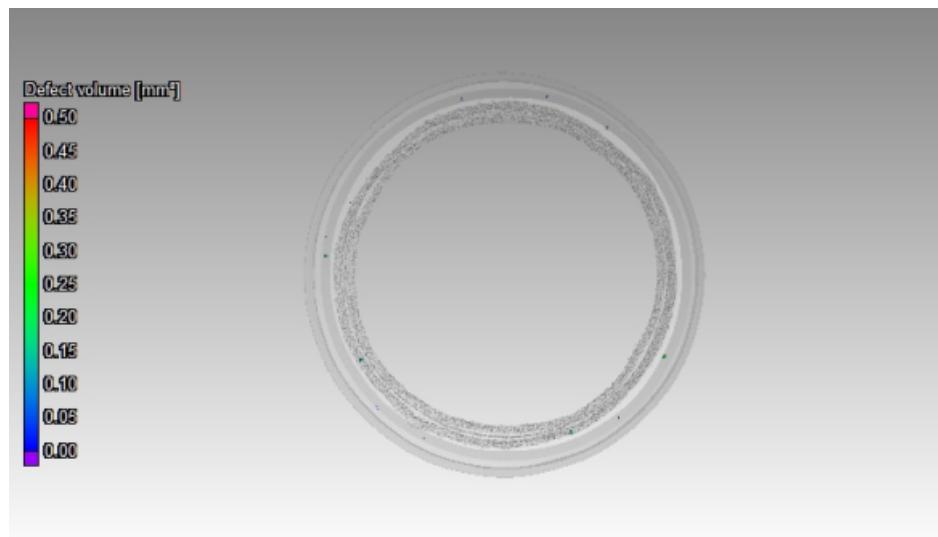


Рисунок 4.21 – 3D-снимок трубы: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку

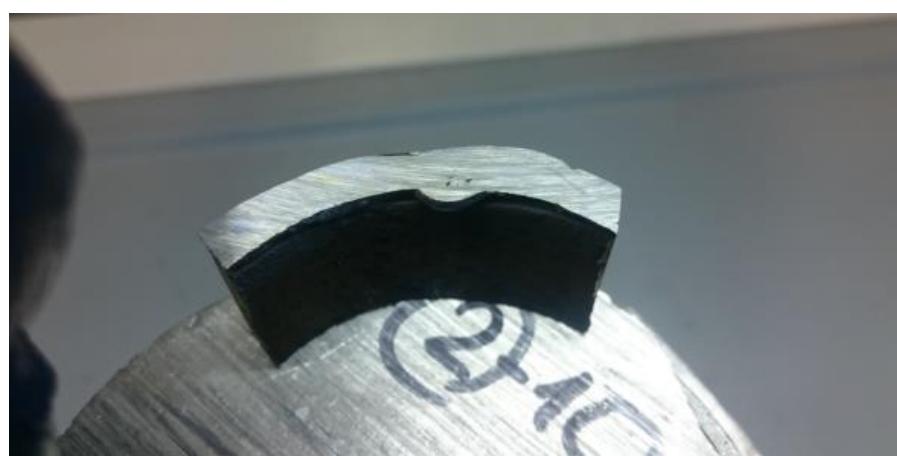


Рисунок 4.22 – Продольный шлиф сварного шва

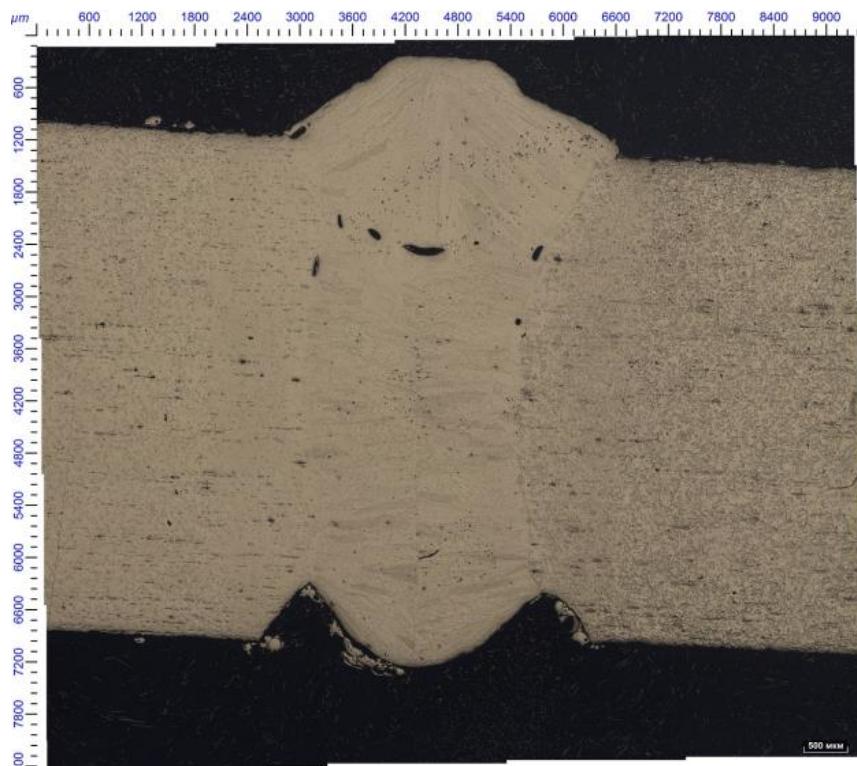


Рисунок 4.23 – Поперечный шлиф сварного шва

Следовательно, необходимо увеличить мощность, чтобы ее было достаточно для придания проволоке жидкого состояния. После увеличения мощности на втором проходе пустоты отсутствуют (рисунок 4.24).



Рисунок 4.24 – Поперечный шлиф сварного соединения после увеличения мощности на втором проходе с применением ультразвуковых колебаний

После устранения всех выявленных дефектов получаем герметичный сварной шов с постоянной величиной валика снизу и сверху: отсутствие трещин, поры в сварном шве сведены к минимуму. Итоговый график изменения мощностей показан на рисунке 4.25: на графике: 0 – начало сварки, T_1 – точка начала последней четверти, T_2 – конец первого прохода и начало второго прохода, T_3 – конец второго прохода.

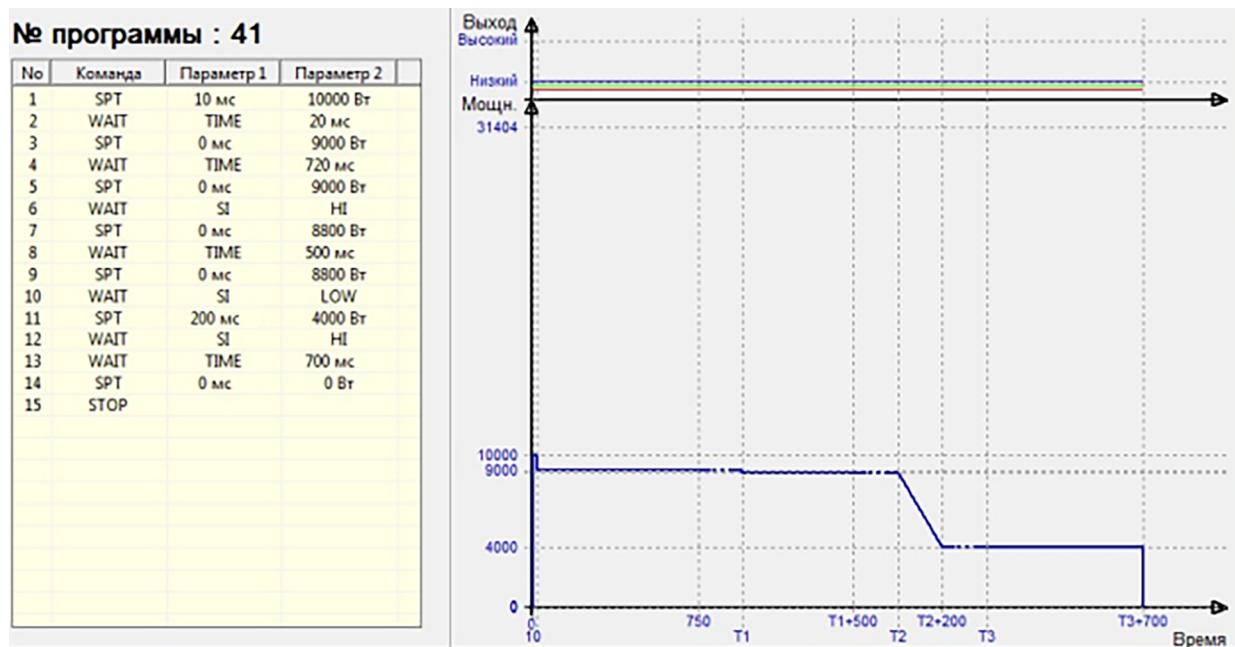


Рисунок 4.25 – Итоговый график мощностей для лазерной сварки в два прохода

4.2. Лазерно-акустическая сварка насосно-компрессорных труб

На микрофотографиях можно видеть, что в процессе формирования наплавочного валика в нижней части наблюдается сужение и валик вытягивается. Данный эффект вызван влиянием ультразвуковых колебаний, оказывающих значительное влияние при увеличении частоты ультразвуковых колебаний с 15 до 22 кГц [109 – 111]. При этом достигается вытягивание сварочной ванны на всю глубину свариваемой заготовки при тех же параметрах сварки. Ширина сварочной ванны при этом снижается в 1,2 раза (рисунок 4.26) [137, 138].

Предел прочности таких образцов остается соответствующим основному металлу, так как при растяжении разрушение происходит по основному металлу [112, 113]. На рисунке 4.27 представлен единичный трек наплавленного металла

проводки для изготовления компактных образцов материалов прямым лазерным выращиванием из проволоки.

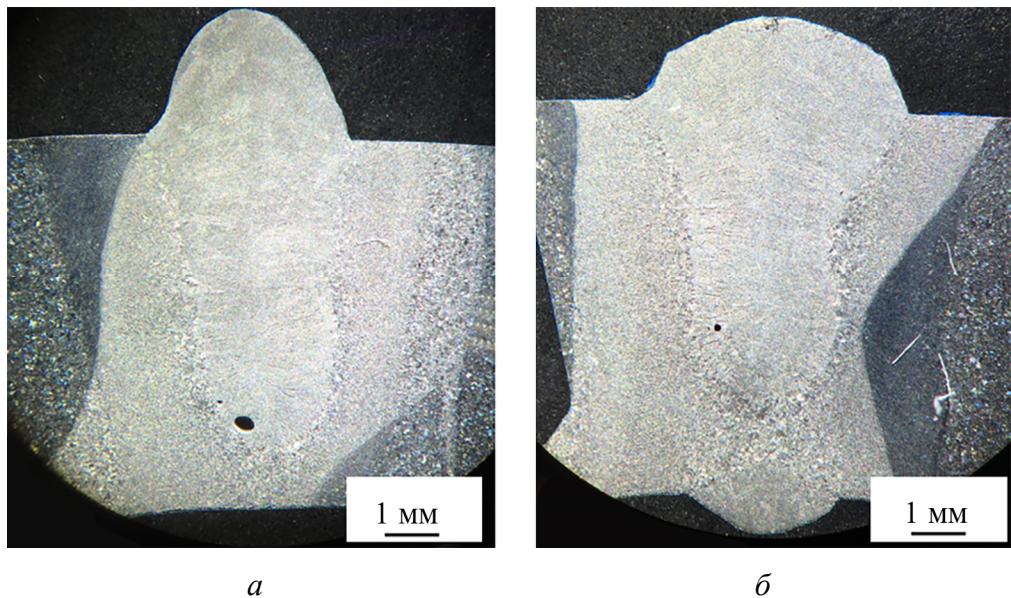


Рисунок 4.26 – Микрофотографии поперечного сечения наплавленного металла:
 а – без ультразвуковой обработки; б – с ультразвуковой обработкой

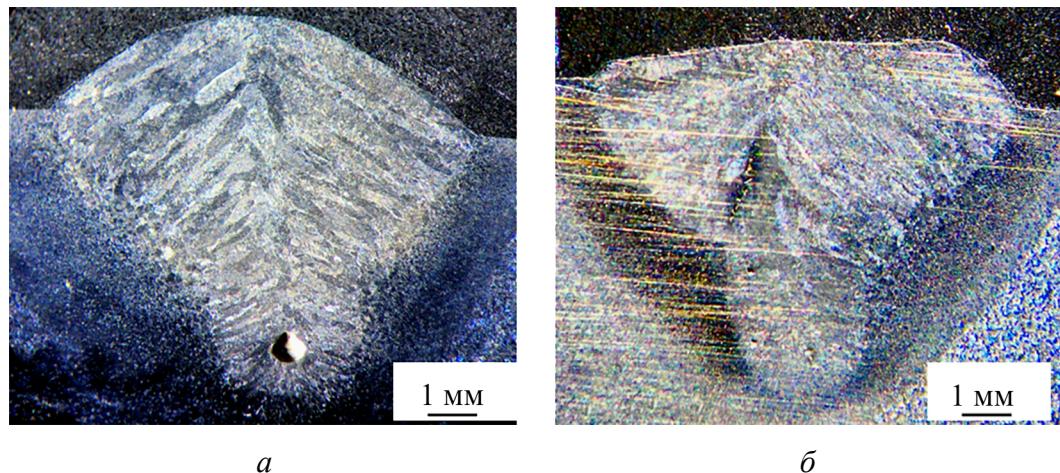


Рисунок 4.27 – Микрофотографии поперечного сечения наплавленного металла:
 а – без ультразвуковой обработки; б – с ультразвуковой обработкой

4.2.1 Микроструктура и твердость сварного шва

Превращения микроструктуры в сварном шве и в окколошовной зоне могут быть описаны классической теорией, которая схематически представлена на рисунке 4.28. Сварное соединение состоит из металла шва и основного металла, подвергшегося термическому воздействию [114, 115]. При этом ширина

структурных зон и зона термического влияния могут отличаться от соответствующих параметров структурных зон, полученных методами дуговой сварки [137, 138].

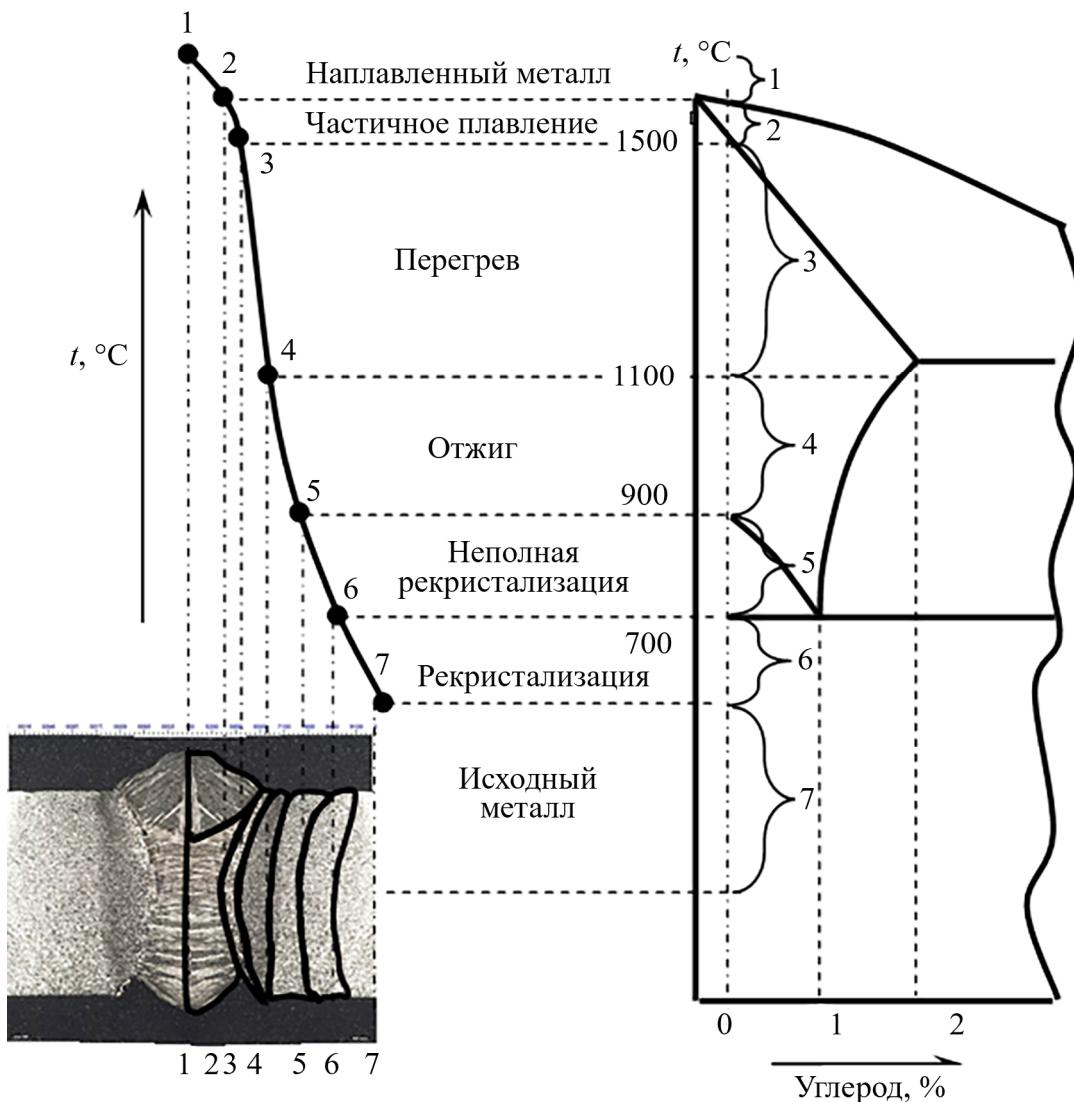


Рисунок 4.28 – Образование шва и окколошовной зоны

Шов с выделенными зонами и их твердостью показан на рисунке 4.29. Сварочный шов первого прохода (зеленая зона) состоит из расплавленного металла труб, перемешанного с проволокой. Наблюдается крупная литая структура с большими пластинами, идущими в направлении от основного металла к центру шва. Твердость данной зоны составляет 370-421 HV₍₁₀₎.

Металл наплавленной проволоки поверх основного шва (оранжевая зона) состоит только из сплава 09Г2С и имеет твердость 280-313 HV₍₁₀₎.

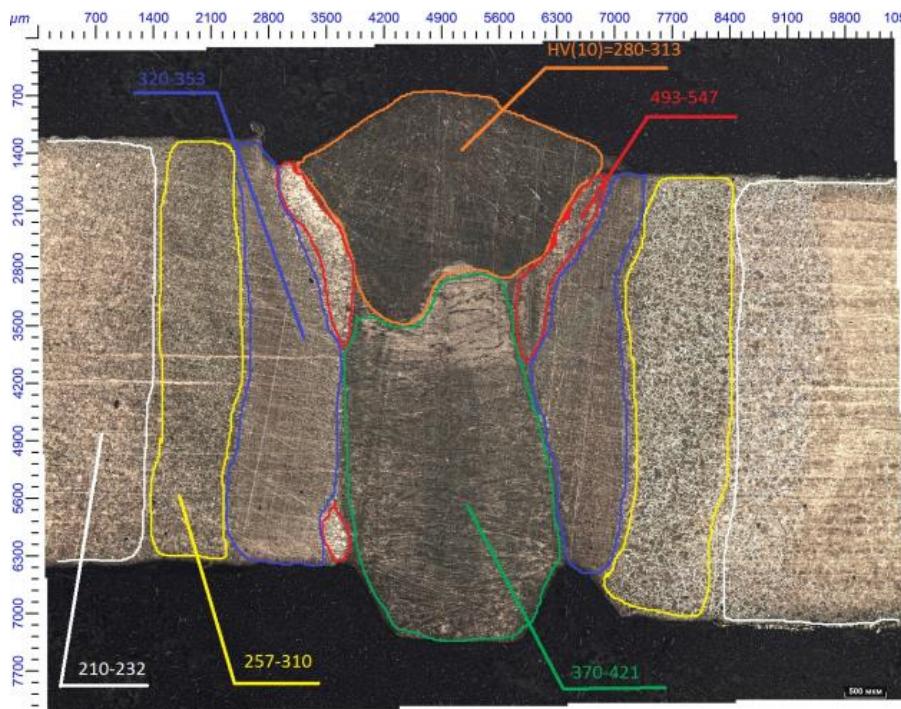


Рисунок 4.29 – Снимок сварного соединения с указанием твердостей зон
(замер твердости производился на микротвердомере)

Красная зона – материал трубы, который находился непосредственно в контакте с ванной расплава, но не получил достаточной температуры для перехода в жидкую фазу, а получил резкий нагрев с длительным воздействием, вследствие чего зерна металла выросли, получив упрочнение. Поэтому эти зоны обладают максимальной твердостью в шве 493-547 HV(10).

Зона термического влияния (синяя зона) также получила сильный нагрев и соответственно упрочнилась до 320-353 HV(10).

Желтая зона претерпела наименьшее тепловое воздействие в процессе сварки, зерна увеличились в размере незначительно. Твердость данной зоны составляет 257-310 HV(10). Белая зона – основной металл трубы, твердость 210-232 HV(10) [137, 138].

4.2.2. Механические свойства образцов

В качестве оборудования для испытаний использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 5884. Условия испытания: температура 23 °C, отн. влажность 50%, скорость 15 мм/мин. Объект испытаний: образец без шва (таблица 4.7, рисунок 4.30).

Таблица 4.7 – Механические свойства сварных соединений

Номер образца	Метка образца	Размер образца, мм		Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
		толщина	ширина		
1	1	6,09	15,85	67,015	694,264
2	2	5,80	15,71	58,164	638,335
3	3	6,08	16,07	63,696	651,914

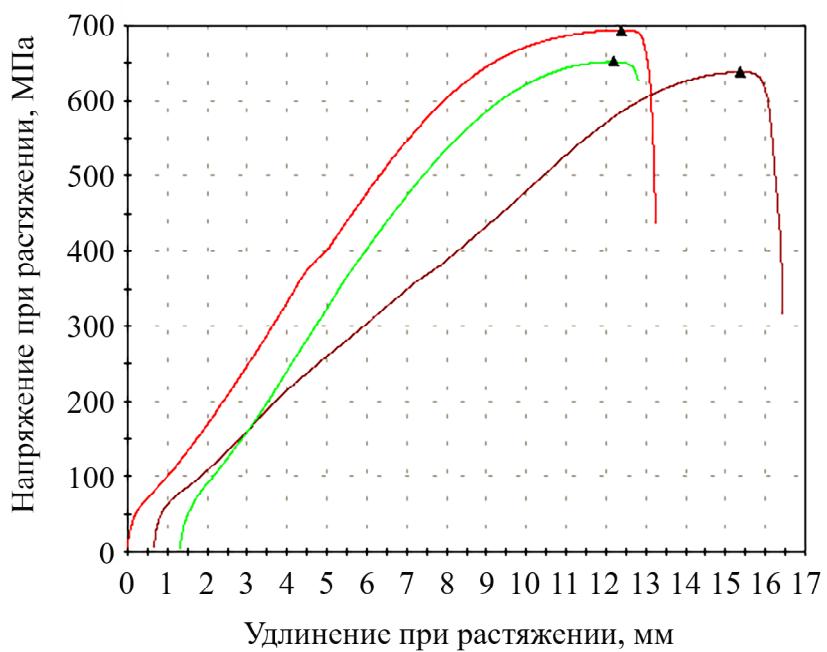


Рисунок 4.30 – Результаты исследования (образец №: 1 – красная линия; 2 – синяя линия; 3 – зеленая линия)

Объект испытаний: образец со швом (таблицы 4.8, 4.9, рисунки 4.31, 4.32).

Таблица 4.8 – Механические свойства сваренных образцов

номер	метка	Образец		Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Примечание			
		размер, мм							
		толщина,	ширина						
1	4	5,68	15,40	53,523	611,885	Разрушение по сварному шву			
2	5	6,06	15,37	65,194	699,941	Разрушение по основному металлу в пришовной зоне			
3	6	5,43	15,39	45,829	548,410	Разрушение по сварному шву			

Таблица 4.9 – Среднее значение прочностных характеристик сваренных образцов

Образец			Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Примечание
номер	метка	размер, мм			
		толщина			
1	7	5,89	46,728	654,571	Разрушение по основному металлу

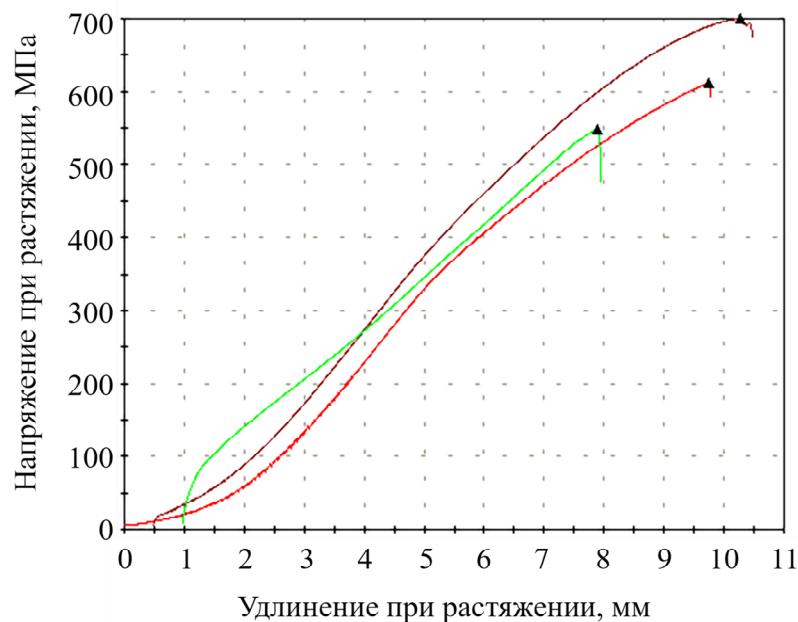


Рисунок 31 – Результаты механических испытаний сваренных образцов

(образец №: – 1; – 2; – 3)

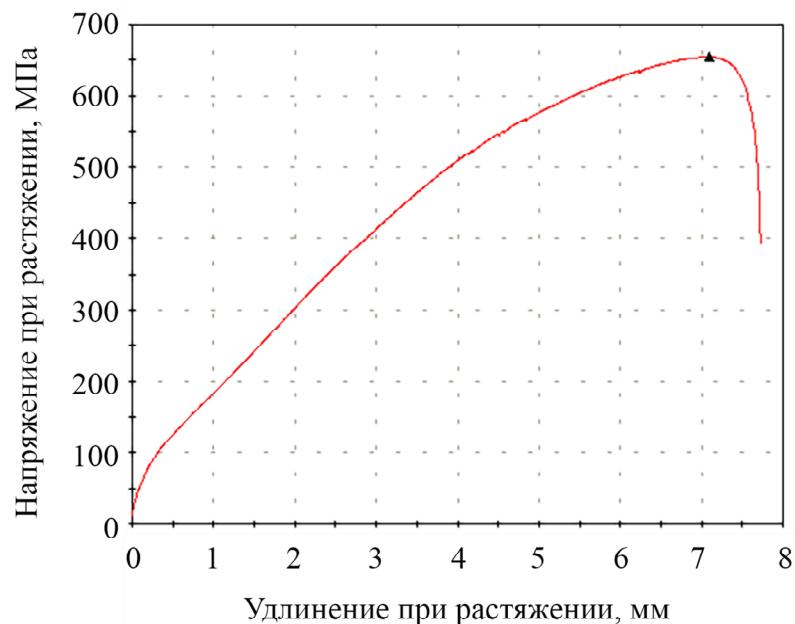


Рисунок 4.32 – Результаты исследований (образец № 1 –)

Вид образцов со швом после испытаний показан на рисунке 4.33.

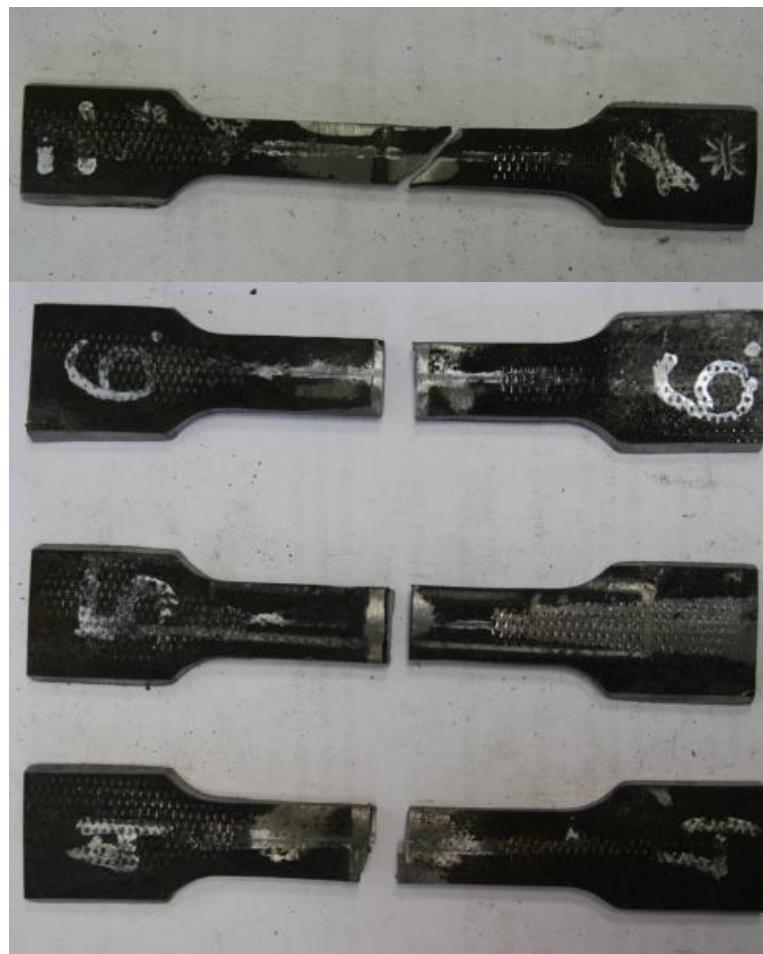


Рисунок 4.33 – Образцы после проведения испытаний

Усредненное значение по результатам растяжения трех образцов при скорости подачи проволоки 2,2 мм/с составило 655 МПа при среднем значении предела прочности для основного металла 661 МПа. При этом можно видеть, что разрушение образца, полученного при оптимальном сочетании параметров, произошло в окколошовной зоне по основному металлу. При этом по характеру излома можно установить, что причиной разрушения явились преимущественно касательные напряжения. В значительной степени мощность лазера оказывает влияние на степень проплавления присадочного материала (проводки), что в результате влияет на получение качественного сварного шва, скорость подачи проволоки и положение фокусного пятна на поверхности ванны расплава. Появление незначительной пористости в сварном шве приводит к формированию высокой концентрации напряжений, что влечет за собой к

разрушению сварного металла по месту сварки, а именно, по сварному шву. В данном случае прочность такого сварного соединения в 1,2 раза уступает прочности основного металла.

В нашем случае, при соблюдении рекомендации, предложенных в работе, значение предела прочности при разрыве усредненное значение трех образцов со швом оказалось на 2% меньше, чем значение прочности образцов без шва. При этом разброс значений при испытании не превышал 5%.

На рисунках 4.33 – 4.36 показаны фотографии микроструктуры образцов, полученных методом выращивания из проволоки. Микроструктура представляет собой зерна феррита и перлита, при этом обнаруживаются на поверхности сварного шва небольшие участки мартенсита и верхнего бейнита.

Образцы, изготовленные из этих сталей, подвергали термической обработке – отпуску и закалке.

Температуры режимов термической обработки выбирали с учетом положения критических точек и анализа термокинетических диаграмм стали 09Г2С, из которых изготавливались образцы материалов методом прямого лазерного выращивания из проволоки. На рисунке 4.34 представлена структура компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки (структуре феррит, перлит) [137, 138].

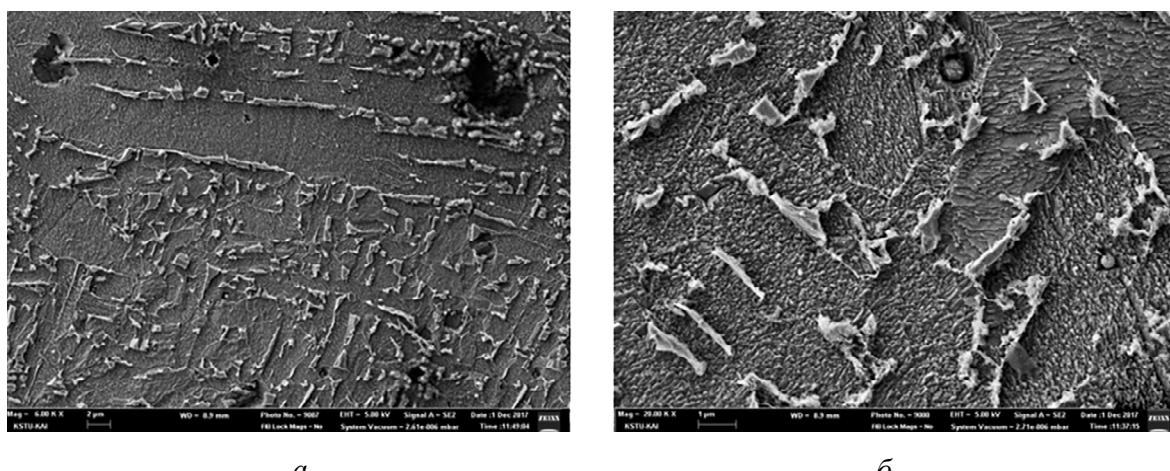


Рисунок 4.34 – Структура компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки: *а* – микроструктура металла; *б* – фрагмент структуры

Можно видеть, что термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки, выдержка в печи в течение 1 часа при температуре 760 °С с последующим охлаждением на воздухе приводят к гомогенизации структуры металла. При этом размер зерен снижается относительно исходного состояния металла (рисунок 4.35).

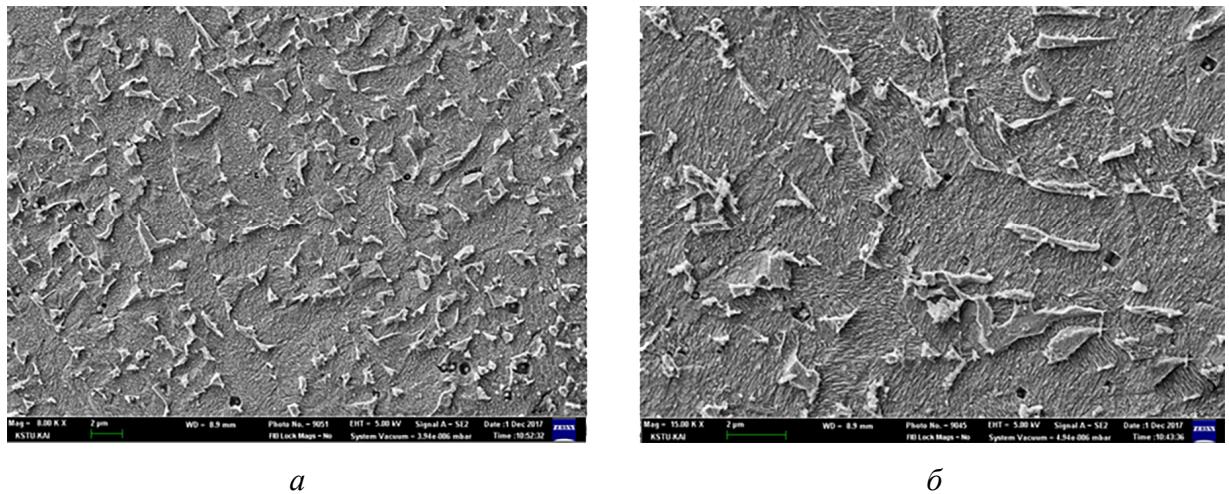


Рисунок 4.35 – Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки, выдержка в печи в течение 1 часа при температуре 760 °С и последующим охлаждением на воздухе:

а – микроструктура металла; *б* – фрагмент структуры

Микроструктура металла компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 920 °С и последующим охлаждением в воду, состоит из зерен избыточного феррита размером 20–50 мкм, находящихся в контакте между собой, внутри которых сформировались игольчатые кристаллы мартенсита и бейнита (рисунок 4.36).

Закалка в воду приводит к появлению игл верхнего бейнита. При этом значения твердости возрастают в три раза относительно исходного состояния образцов без термообработки. Площадь зерен упрочняющей фазы составляла 40–50 %. Нагрев под закалку до температуры 920 °С позволил получить аустенитное зерно повышенной гомогенности, при этом средний размер его остался неизменным (рисунок 4.37).

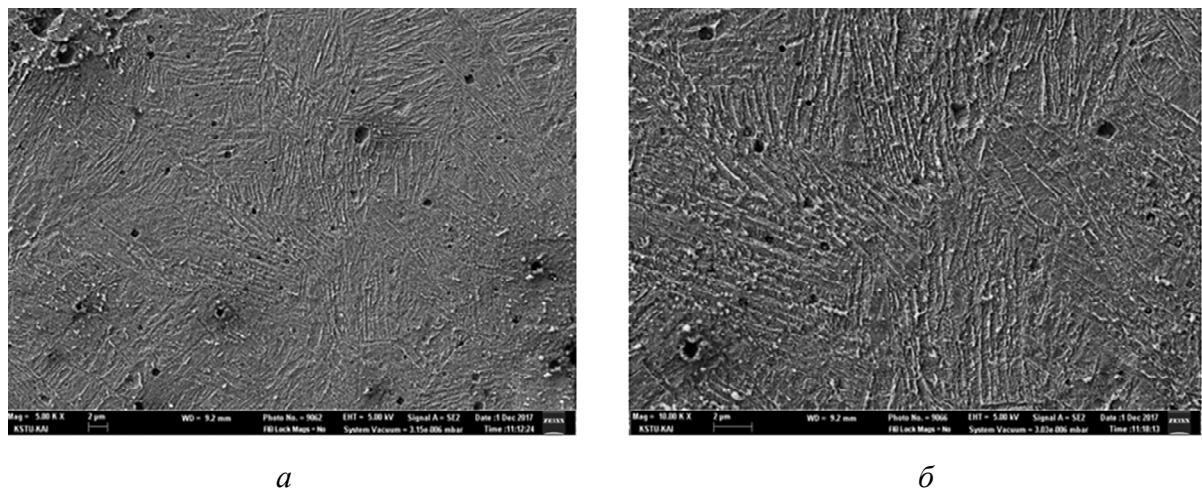


Рисунок 4.36 – Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 920 °С и последующим охлаждением в воду:

a – микроструктура металла; *б* – фрагмент структуры

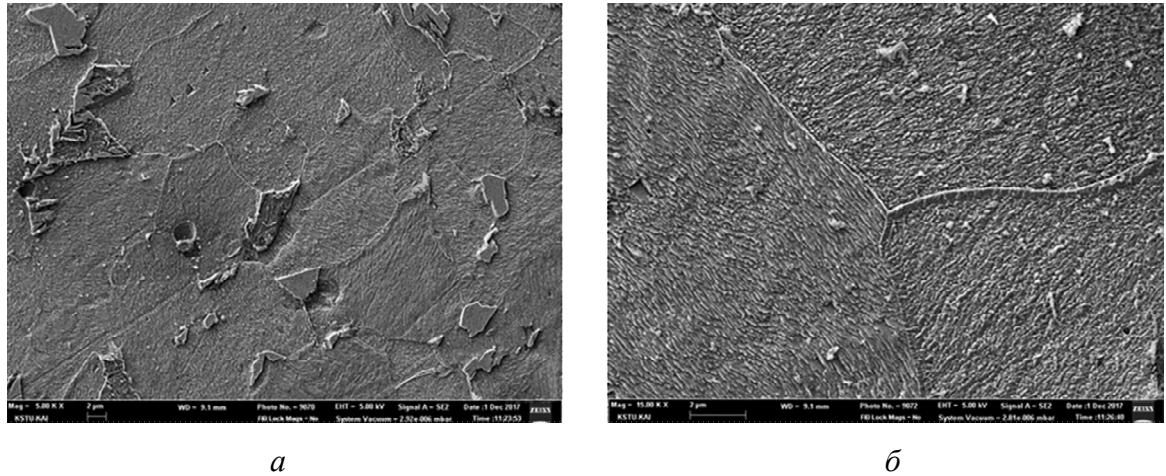


Рисунок 4.37 – Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 920 °С и последующим охлаждением на воздухе:

a – микроструктура металла; *б* – фрагмент структуры

Термическая обработка компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки с выдержкой в печи в течение 1 часа при температуре 920 °С и последующим охлаждением на воздухе приводят к появлению крупных перлитных зерен (рисунок 4.37). Предполагается, что после такой обработки на двухфазную структуру образцы материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки, будут иметь повышенный предел

выносливости; одновременно примерно в 3–3,5 раза увеличится число циклов до разрушения в области малоцикловой усталости. Исходные данные для выращивания образцов с боковой подачей проволоки аддитивным методом: материал проволоки – 09Г2С, толщина проволоки – 1,2 мм, материал подложки – сталь 40, размер подложки 100x200x20 мм, температура окружающей среды при проведении эксперимента – 26 °С [137, 138].

4.3 Выращивание элементов труб из проволоки 09Г2С с применением ультразвуковых колебаний

Наплавлялся слиток размерами 150x30x8 мм по слойно, проходы совершились вдоль подложки (рисунок 4.38).

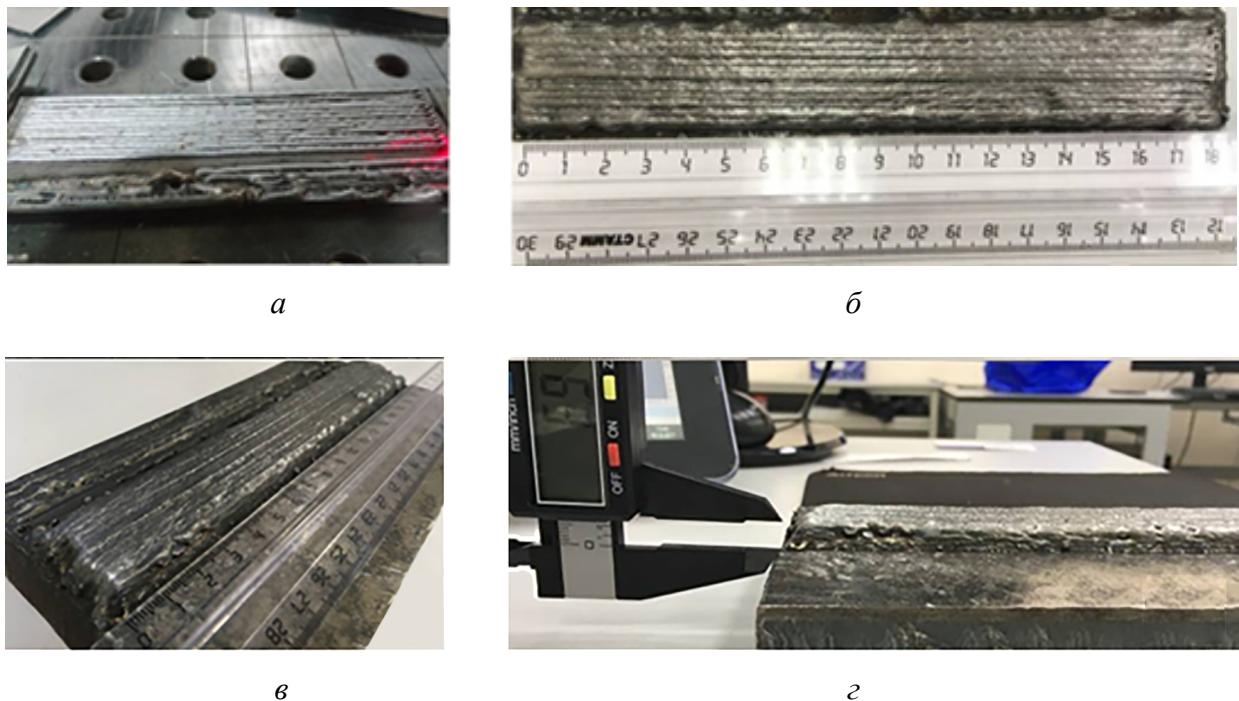


Рисунок 4.38 – Заготовка наплавленного металла для образцов:
а – общий вид образца ; б – вид поверхности; в и г – размеры образца

Получаемый «валик» с единичного прохода имел размеры: высота 1,2 мм; ширина 1,5 мм; длина 150 мм. Проволока в положении пересечения с лазерным излучением подводилась на высоту ≈ 1 мм от подложки/предыдущего наплавленного слоя, выполнялся проход длиной 150 мм, робот уходил в

исходную точку, смешался на шаг, равный 1,5 мм, и операция наплавки повторялась [137, 138].

Вид компактных образцов для испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки, показан на рисунке 4.39. Фрезерование осуществляется на станке с ЧПУ управлением набором из двух дисковых фрез $\Phi 80$ мм, $Z = 20$, ВК8 при оборотах 200 об./мин.

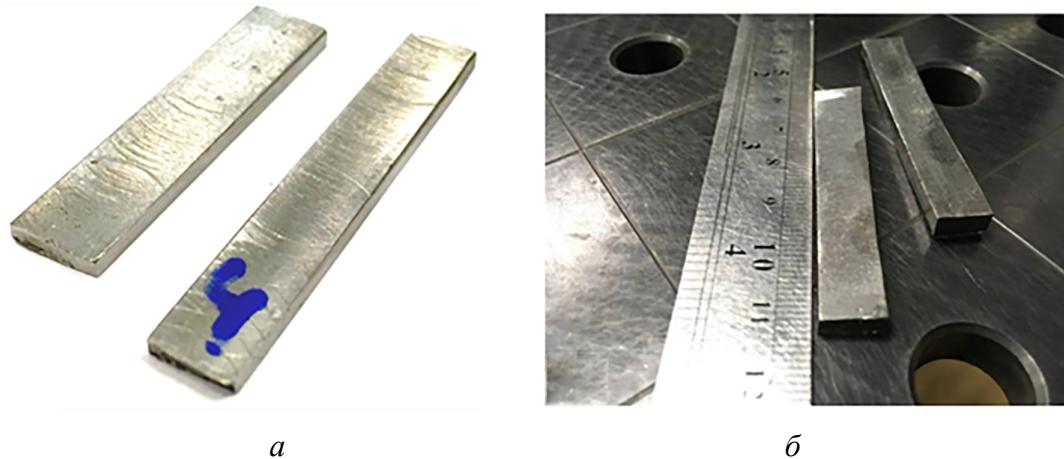


Рисунок 4.39 – Вид образцов для статического растяжения, вырезанных из выращенного бруска

Данные по химическому составу образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки и полученных на рабочей станции Auriga™ CrossBeam®, представлены на рисунке 4.40.

Полученный методом прямого лазерного нанесения с боковой подачей проволоки элементный состав образцов, определенных также на рабочей станции Auriga™ CrossBeam®:

спектр.....	C	Si	Mn	Fe	Итог
спектр 1, вес. %....	4,89	1,02	1,30	92,79	100,00

Исследовался характер разрушения компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки (таблица 4.10). Для проведения испытаний использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 5884 с предустановленным программным обеспечением для фиксации диаграммы растяжения.

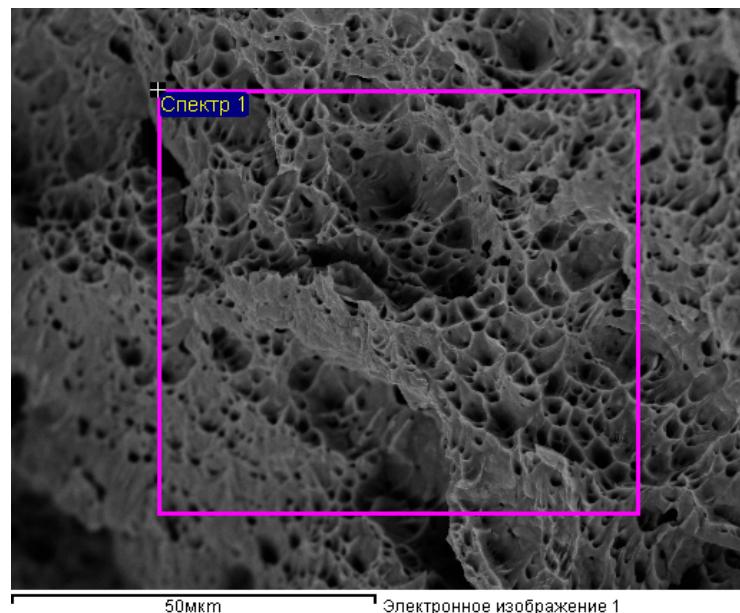


Рисунок 4.40 – Область исследования элементного анализа материала выращенных образцов

Таблица 4.10 – Сравнение механических характеристик образцов

Вид сварки	Размер, мм		Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
	ширина	толщина		
Без ультразвуковой обработки	7,70	2,02	9,768	527,998
С ультразвуковой обработкой	8,75	2,02	11,961	628,704

Примечание: Ультразвуковая обработка металла 09Г2С приводит к увеличению прочности на 16%.

Испытания проводились при температуре 23 °C, относительной влажности 50%, скорость нагружения составляла 15 мм/мин (рисунок 4.41).



Рисунок 4.41 – Образец для статического растяжения, установленный в захваты

Из рис. 4.42 видим, что предел прочности и пластичность образцов, полученных с применением ультразвуковой обработки, повышаются практически в 1,5 раза [116, 117].

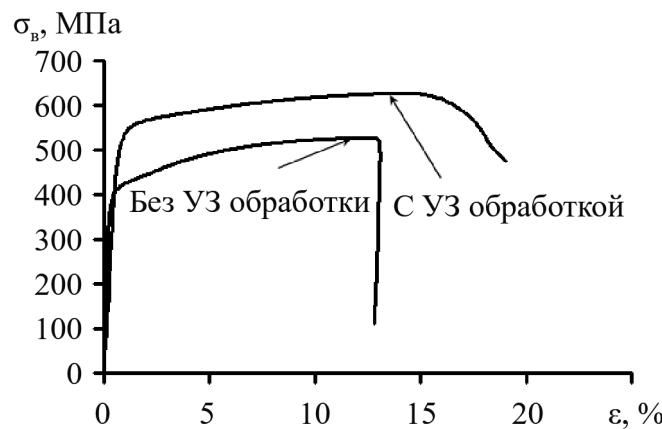


Рисунок 4.42 – Диаграмма растяжения четырех компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки в координатах напряжение-деформация

В данном случае такой эффект можно объяснить ориентированной структурой в поверхностных слоях полученных образцов. Тонкая пластинчатая структура формируется в результате ультразвукового воздействия (рисунок 4.43 *а, в*) [137, 138].

На рисунке 4.44 представлены фотографии образцов, выращенных из проволоки 09Г2С.

Вид излома образцов после статического растяжения показан на рисунке 4.45.

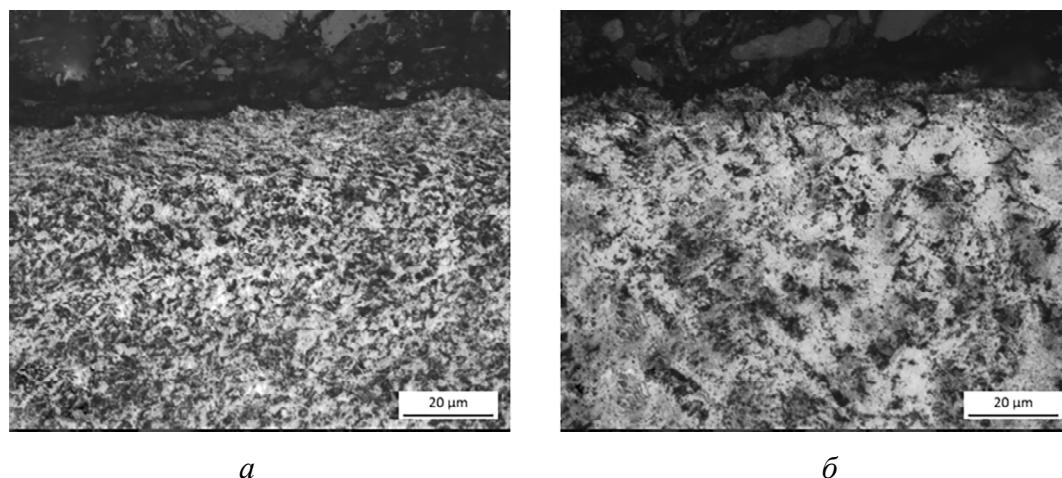


Рисунок 4.43 – Микроструктура наплавленного металла образцов: *а, в* – после ультразвуковой обработки; *б, г* – без ультразвуковой обработки (см. также с. 109)

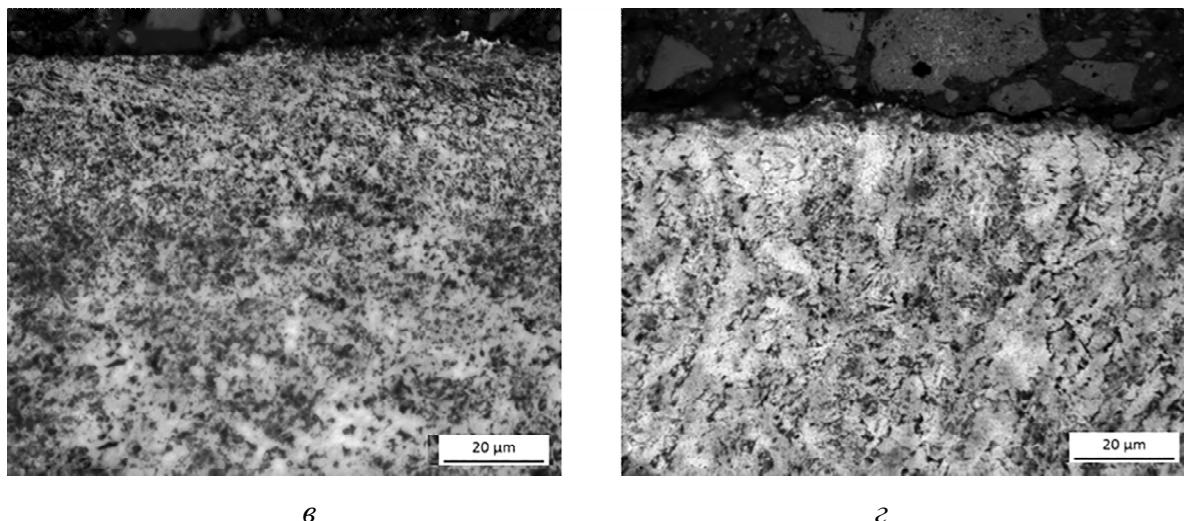


Рисунок 4.43 – Окончание

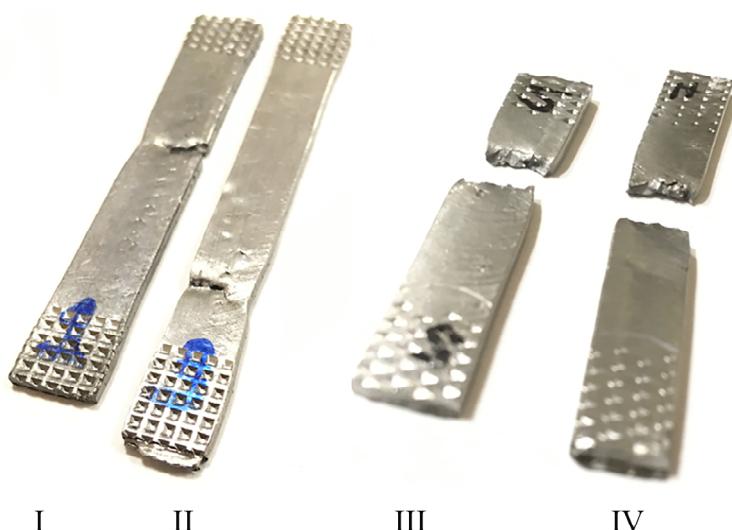


Рисунок 4.44 – Общий вид разрушенных образцов

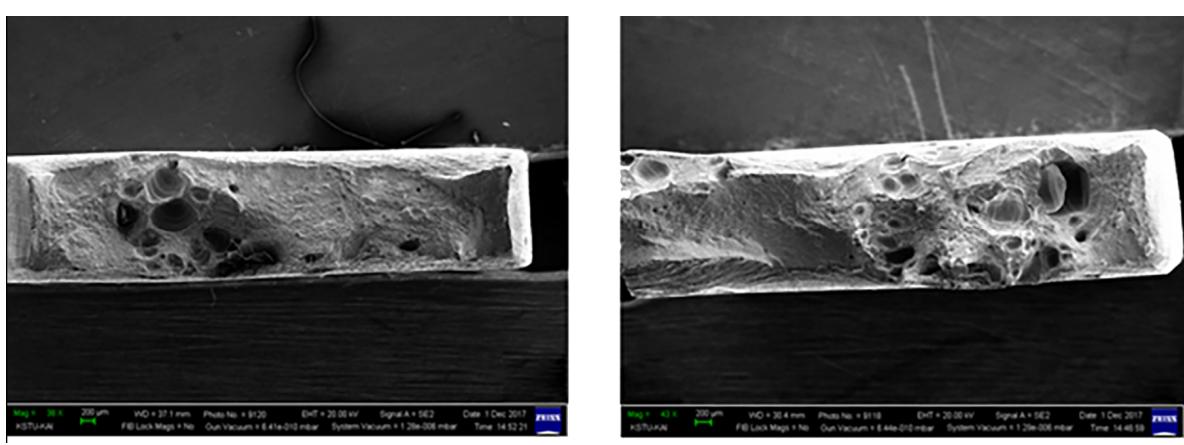


Рисунок 4.45 – Вид излома образцов после разрушения:

a – после ультразвуковой обработки; *б* – без ультразвуковой обработки

Компактным образцам, изготовленным прямым лазерным выращиванием из проволоки, характерен квазистатический характер разрушения с присущими ему характеристиками излома (рисунок 4.46).

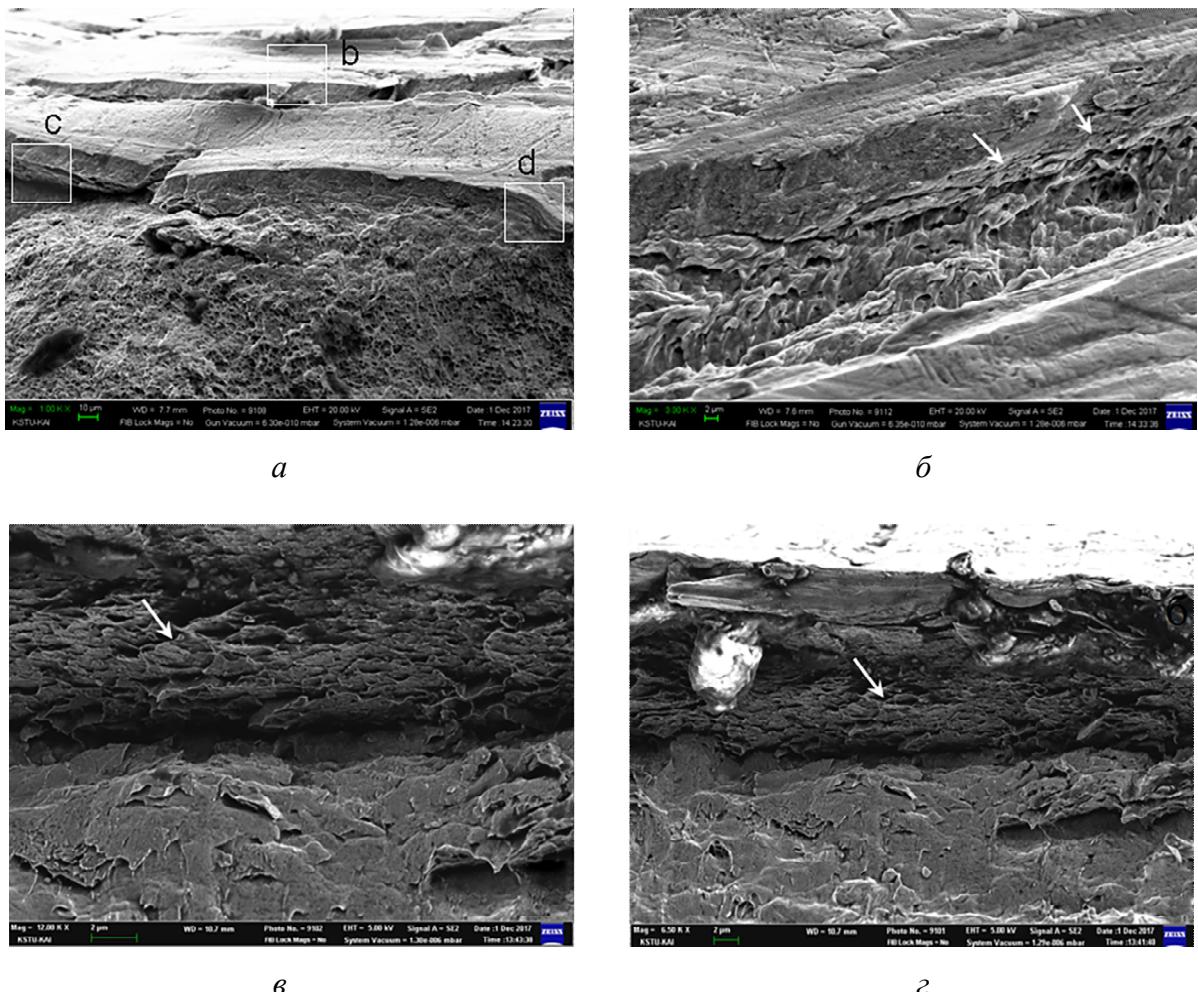


Рисунок 4.46 – Характерные участки разрушения

На рисунке 4.46 представлена фрактография разрушения компактных образцов полученным методом прямого лазерного нанесения проволоки с одновременным ультразвуковым воздействием. Стрелками показаны тонкие пластины в приповерхностных слоях разрушенных образцов. Можно видеть, что ультразвуковая обработка образцов сформировала в их поверхности слой толщиной 50 мкм, который оказывает значительное сопротивление разрушению. В призматических образцах зарождение трещин начинается с поверхности. В данном случае ультразвуковая обработка позволяет задавать ориентировку зерен, поэтому необходимо учитывать направление приложения растягивающей

нагрузки и осуществлять ультразвуковую обработку целенаправленно для заданной ориентации либо по различным направлениям одновременно. Отправленные в ООО «ТЕХНОФОРДЖ» три трубы были исследованы сотрудниками «ТЕХНОФОРДЖ» на герметичность. Одна сторона трубы заваривалась, ко второй пристыковывалась установка, которая заполняла трубу техническим маслом и накачивала давление. Были проведены два опыта: в первом – трубы выдержали 300 атм., во втором – было создано (на другой установке, способной создать давление больше 300 атм.) давление в 700 атм. Сварное соединение трех труб выдержало такое давление, что свидетельствует о высокой стойкости сварных соединений к подобным нагрузкам.

4.4 Реализация способа лазерно-акустической сварки разнородных материалов, полученных методами аддитивного производства на примере изделия типа «Баллон»

На рисунке 4.47 представлена реализация способа лазерной сварки разнородных материалов с применением различных технологий аддитивного производства на примере изделия типа «Баллон».



Рисунок 4.47 – Реализация сварки разнородных металлов
на примере лазерно-акустической сварки изделия типа «Баллон»

В ходе работы по данным исследования влияния структуры и твердости сварных швов разнородных сплавов, полученных по различным технологическим

схемам, было выявлено, что лазерная сварка является оптимальной для разнородных сплавов, полученных разными методами аддитивного производства [135 – 138, 143]. Было установлено, что интенсивное перемешивание металла в сварном шве в процессе лазерной сварки приводит к увеличению микротвердости металла шва. Во всех сварных швах не было обнаружено дефектов типа пор и трещит.

Таким образом, лазерная сварка является хорошим способом для сваривания разнородных сплавов, полученных различными методами производства [135, 138 – 143].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технологическая схема лазерной сварки с дополнительными акустическими воздействиями насосно-компрессорных труб из сплавов 09Г2С и 12Х18Н10Т, что обеспечивает получение сварного шва с оптимальным сочетанием структуры, химического состава и механических свойств. Дополнительное влияние ультразвуковых колебаний на процесс лазерной сварки в диапазоне частот 22 – 100 кГц обеспечивает фрагментацию пластинчатых включений δ -феррита более чем в 2 раза, снижение химической неоднородности и устранение пористости в сварном шве, что приводит к увеличению предела прочности и относительного удлинения в 1,3 - 1,5 раза.

Основные выводы по работе:

1. Показано, что введение ультразвуковых колебаний с частотой 80 кГц и мощностью 1,5 кВт в процессе лазерной сварки нержавеющей стали 12Х18Н10Т позволяет получить шов с однородной структурой и химическим составом по всему объему шва, без образования дефектов типа пор и трещин. Увеличение предела прочности образцов в 1,2 раза при испытаниях на изгиб связаны с фрагментацией пластинчатых включений δ -феррита и нитритов титана в структуре сварного шва, вызванной обработкой ультразвуком на оптимальной частоте (80 кГц).

2. Показано, что воздействие ультразвуковыми колебаниями в процессе сварки стали 09Г2С в направлении параллельном поверхности подложки позволяет сузить сварочную ванну в 1,3 раза и осуществить проплавление свариваемой заготовки в 1,5 раза. Предел прочности и пластичности образцов, полученных методом лазерной наплавки металлической проволоки 09Г2С с

применением ультразвуковой обработки, увеличиваются в 1,5 раза, за счет ультразвуковой обработки, обеспечивающей снижение размера зерен в 3 раза и пористости в 3 – 5 раз.

3. Показано, что при значениях фокусного расстояния $0 < \Delta f < 10$, $-10 < \Delta f < 0$, мощностью 10 кВт и длиной волны 1064 нм, обеспечивается проплавление свариваемых заготовок 09Г2С на глубину 5 мм, а ширина сварочной ванны, при этом, достигает 4 мм. Прочность сварного соединения, полученного лазерной сваркой, стали 09Г2С в два прохода с задаваемой мощностью и фокусировкой лазера, на 4% меньше прочности образцов исходного металла.

4. Установлено, что импульсный режим сварки с мощностью импульса 10 кВт и длительностью воздействия 30 мс, скоростью подачи проволоки 2,2 мм/с в сварочный шов с одновременным воздействием ультразвуковыми колебаниями с частотой 22 кГц в процессе сварки стали 09Г2С приводит к устраниению пустот, пор и сквозного канала, образующегося в месте начала сварки.

Результаты исследований, приведенные в диссертации, могут быть применены для сварки труб нефтяной и газовой промышленности. Теоретические выводы, полученные в исследовании, помогут в понимании процессов формирования микроструктуры металла сварных швов под воздействием ультразвука, что в свою очередь позволит расширить номенклатуру свариваемых труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Патон, Б.Е.* Автоматическая электродуговая сварка неповоротных стыков трубопроводов порошковой проволокой // Автоматическая сварка. – 2002. – №10. – С. 15-22.
2. *Морозов, В.П.* Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – №8. – С. 41-54.
3. *Сараев, Ю.Н.* Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва // Сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4. – №1. – С. 16-24.
4. *Шелягин, В.Д.* Лазерная сварка тонколистовых сталей с использованием элементов стали ОККН18№101 // Автоматическая сварка. 2003. №1. С.41-44.
5. *Рыжов, Р.Н., Кузнецов, В.Д.* Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки // Автоматическая сварка. – 2006. – №10. – С. 36-44.
6. *Вышемирский, Е.М.* Совершенствование нормативной базы по сварке и контролю качества сварных соединений магистральных газопроводов. Современные технологии сварки и контроля // Территория Нефтегаз. – 2016. – №10. – С. 11-15.
7. *Алешина, Н.П.* Сварка. Резка. Контроль: справочник. В 2-х т. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. Москва: Машиностроение, 2004. – Т. 1. – 624 с. – Т. 2. – 480 с.

8. *Неровный, В.М.* Теория сварочных процессов / В.М. Неровный, Б.Ф. Окулин, А.В. Коновалев; под ред. В.М. Неровного. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 702 с.
9. *Морозов, В.П.* Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием // Наука и образование. Электронный журнал. 2010. – №10. – С. 1-22.
10. *Столяров, В.И. и др.* Свариваемость высокопрочных сталей для газопроводных труб большого диаметра // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – №3. – С. 23-29.
11. *Ефименко, Л.А., Капустин, О.Е., Карасёв, М.В.* Формирование структуры сварных соединений высокопрочных сталей при автоматической сварке в защитных газах // Трубопроводный транспорт. – 2012. – №4. – С. 28-36.
12. *Гоок, С. и др.* Особенности процесса орбитальной лазерно-дуговой сварки толстостенных труб большого диаметра // Автоматическая сварка. – 2010. – №9. – С. 12-19.
13. *Кулик, В.М., Шелягин, В.Д., Савицкий, М.М.* Технологические особенности лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали // Автоматическая сварка. – 2012. – №6. – С. 11-14.
14. *Григорьянц, А.Г., Грезев, А.Н., Грезев, Н.В.* Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и С02-лазеров // Москва: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
15. *Григорьянц, А.Г.* Лазерная сварка металлов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов. – Москва: Высшая школа, 1988. – 207 с.
16. *Григорьянц, А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
17. *Григорьянц, А.Г.* Гибридные технологии лазерной сварки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 52 с.

18. *Грезев, Н.В.* Разработка способа двухлучевой лазерной сварки конструкционных низколегированных трубных сталей: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 20 с.
19. *Туричин, Г.А.* Теоретические основы и моделирование процесса лучевой сварки металлов с глубоким проплавлением: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2000. – 28 с.
20. *Туричин, Г.А., Валдайцева, Е.А., Поздеева, Е.Ю.* Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением // Автоматическая сварка. – 2008. – №7. – С. 15-19.
21. *Харанжевский, Е.В.* Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилёв. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011. – 187 с.
22. *Вейко, В.П.* Опорный конспект лекций «Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике» / В.П. Вейко. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 141 с.
23. *Морозов, В.П.* Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – №8. – С. 41-54.
24. Патент №2539256 РФ Способ лазерно-дуговой орбитальной сварки / О.В. Величко, Г.А. Туричин, И.Н. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Осипов; заявл. 27.09.2013; опубл. 20.01.2015; Бюлл. №2.
25. *Шелягин, В.Д., Хаскин, В.Ю.* Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автоматическая сварка. – 2002. – №6. – С. 28-32.
26. *Кривиун, И.В.* Модель испарения металла при дуговой, лазерной и лазерно-дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2001. – №3. – С. 3-10.
27. *Фёдоров, Б.М., Таксанц, М.В.* Инженерный подход к оценке глубины проплавления материала лазерным лучом при сварке сталей и сплавов // Вестник МГУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 85-90.

28. Шилов, И.В., Чащин, Е.А. Математическое моделирование процесса возникновения эффекта самоконцентрации лазерного излучения в парогазовом канале // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №4. – С. 1-5.
29. Рыжов, Р.Н. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на формирование и кристаллизацию швов // Автоматическая сварка. – 2007. – №2. – С. 56-58.
30. Чубуков, И.А. Разработка способа лазерной сварки конструкционных сталей в щелевую разделку с подачей присадочной проволоки: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 1989. – 159 с.
31. Курынцев, С.В., Грезев, Н.В., Шамов, Е.М. Сварка волоконными лазерами материалов больших толщин со сканированием луча и применением порошковой присадки на основе никеля // Сварочное производство. – 2015. – №12. – С. 23-29.
32. Черепанов, А.Н., Шапеев, В.П., Фомин, В.М. Численное моделирование теплофизических процессов при лазерно-лучевой сварке с образованием парового канала // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – №5. – С. 88-96.
33. Исаев, В.И., Шапеев, В.П., Черепанов, А.Н. Численное моделирование лазерной сварки тонких пластин с учетом конвекции в сварочной ванне // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – №3. – С. 451-466.
34. Шиганов, И.Н., Грезев, Н.В., Шамов, Е.М. Особенности сварки стали 10ХСНД лазерным лучом с колебаниями // Сварочное производство. – 2016. – №10. – С. 23-28.
35. Чёрная, Т.И., Царюк, А.К., Сиора, А.В. Лазерная ставка корневых швов соединений толстого металла теплоустойчивой стали // Автоматическая сварка. – 2010. – №2. – С. 19-22.
36. Вышемирский, Е.М. и др. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. – 2017. – Спец. №2. – С. 15-23.
37. Грезев, А.Н. Пламеобразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением // Современные лазерно-информационные технологии. Сборник трудов ИПЛИТ РАН. – 2005. – С. 228-235.

38. Кривцун, И.В., Талерко, А.Н. Влияние поляризации излучения на поглощение лазерного пучка при сварке с глубоким проплавлением // Автоматическая сварка. – 2004. – №6. – С. 29-34.
39. Морозов, В.П. Влияние синхронизации собственной частоты колебательного механизма кристаллизации металла шва и частоты внешнего периодического воздействия на технологическую прочность в процессе сварки // Наука и образование. – 2011. – №12. – С. 1-16.
40. Нестеренко, В.М. Применение сканирующего сварочного электронного луча для устранения корневых дефектов на стаях больших толщин // Автоматическая сварка. – 2003. – №9. – С. 7-12.
41. Рыжов, Р.Н., Семенюк, В.С., Титов, А.А. Особенности формирования и кристаллизации швов при сварке тиг с отклонениями дуги магнитным полем // Автоматическая сварка. – 2004. – №4. – С. 17-20.
42. Рыжов, Р.Н., Кузнецов, В.Д. Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки // Автоматическая сварка. – 2005. – №6. – С. 27-31.
43. Лукашенко, А.Г., Мельниченко, Т.В., Лукашенко, Д.А. Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением // Автоматическая сварка. – 2012. – №4. – С. 19-23.
44. Папалекси, Н.Д. Эволюция понятия резонанса // Уральский Физический Журнал. 1947. – Вып. 4. – С. 447-460.
45. Широконосов, В.Г. Резонанс в физике, химии и биологии / В.Г. Широконосов. – Ижевск: Изд-й дом «Удмуртский университет», 2001. – 92 с.
46. Мурзин, С.П., Осетров, Е.Л., Никифоров, А.М. Сварка жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе импульсным лазерным излучением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. – №3. – С. 884-886.
47. Макаров, Э.Л. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 487 с.

48. *Прохоров, Н.Н.* Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации / Н.Н. Прохоров. – Москва: Металлургия, 1979. – 249 с.
49. *Lin Chen, Chunming Wang, Xiong Zhang, Gaoyang Mi.* Effect of parameters on microstructure and mechanical property of dissimilar joints between 316L stainless steel and GH909 alloy by laser welding // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 65. – Pp. 60–69.
50. *Ceyhun Kose, Ceyhun Topal.* Effect of heat input and post-weld heat treatment on surface, texture, microstructure, and mechanical properties of dissimilar laser beam welded AISI 2507 super duplex to AISI 904L super austenitic stainless steels // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 73. – Pp. 861–894.
51. *Mazar Atabaki, M., Yazdian, N., Ma, J., Kovacevic, R.* High power laser welding of thick steel plates in a horizontal butt joint configuration // Optic Laser Technol. – 2016. – Vol. 83. – Pp. 1–12.
52. *Mazar Atabaki M., Yazdian N., Kovacevic R.* Hybrid laser/arc welding of thick high-strength steel in different configurations // Advances in Manufacturing. – 2017. – Vol. 1. – Pp. 1–13.
53. *Mazar Atabaki M., Ma J., Yang G., Kovacevic R.* Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations // Mater Des. – 2014. – Vol. 64. – Pp. 573–587.
54. *Sun, J., Feng, K., Zhang, K., Guo, B., Li, Z.* Fiber laser welding of thick AISI 304 plate in a horizontal (2G) butt joint configuration // Mater Des. – 2017. – Vol. 118. – Pp. 53–65.
55. *Zhou, J., Tsai, H.L.* Porosity formation and prevention in pulsed laser welding // J Heat Tran. – 2007. – № 129. – Pp. 1014–1024.
56. *Lu, F., Li, X., Li, Z., Tang, X., Cui, H.* Formation and influence mechanism of keyholeinduced porosity in deep-penetration laser welding based on 3D transient modeling // Heat Mass Tran. – 2015. – Vol. 90. – Pp. 1143–1152.
57. *Mazar Atabaki M., Ma J., Liu W., Kovacevic R.* Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel // Mater Des. – 2015. – Vol. 67. – Pp. 509–521.

58. *Wang, C., Chen, H., Zhao, Z., Cao, L., Jiang, P., Mi, G.* Influence of axial magnetic field on shape and microstructure of stainless steel laser welding joint / Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – Vol. 91. – Pp. 3050–3060.
59. *Chen, R., Jiang, P., Shao, X., Mi, G., Wang, C., Geng, S., et al.* Improvement of lowtemperature impact toughness for 304 weld joint produced by laser-MIG hybrid welding under magnetic field // J Mater Process Technol. – 2017. – Vol. 247. – Pp. 306–314.
60. *Cao, X., Wanjar, P., Huang, J., Munro, C., Nolting, A.* Hybrid fiber laser – arc welding of thick section high strength low alloy steel // Mater Des. – 2011. – Vol. 32. – Pp. 3399–3413.
61. *Seiji, K., Yasuaki, N., Satoru, U., Masam, M.* Physical phenomena and porosity prevention mechanism in laser-arc hybrid welding // Trans JWRI. – 2006. – Vol. 35. – Pp. 13–18.
62. *Deng, D., Kiyoshim, S.* Numerical simulation of residual stresses induced by laser beam welding in a SUS316 stainless steel pipe with considering initial residual stress influences // Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240. – Pp. 688–696.
63. *Ran Hongdong, Chen Zhanpeng, Ma Yunme.* Experimental and numerical studies of laser-welded slender stainless steel I-section columns // Thin-Walled Structures. – 2022. Vol. 171. – Pp. 108832
64. *Gardner, L.* Stability and design of stainless steel structures // Review and outlook, Thin-Walled Struct. – 2019. – Vol. 141. – Pp. 208–216, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.019>.
65. *Arrayago, I., Real, E., Gardner, L.* Description of stress–strain curves for stainless steel alloys // Mater. Des. – 2015. – Vol. 87. – Pp. 540–552, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.001>.
66. *Gardner, L., Yun, X.* Description of stress–strain curves for cold-formed steels // Constr. Build. Mater. – 2018. – Vol. 189. – Pp. 527–538, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.195>.
67. *Yuan, T., Kou, S., Luo, Z.* Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool // Acta Mater. – 2016. – Vol. 106. – Pp. 144–154.

68. *Ning, F.D., Cong, W.L.* Microstructures and mechanical properties of Fe-Cr stainless steel parts fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping process // *Mater. Lett.* – 2016. – Vol. 179. – Pp. 61–64.
69. *Zhenglong Lei, Jiang Bi, Peng Li, Qian Li, Yanbin Chen, Dengming Zhang*, Melt flow and grain refining in ultrasonic vibration assisted laser welding process of AZ31B magnesium alloy // *Optics and Laser Technology*. – 2018. – Vol. 108. – Pp. 409–417.
70. *García-Rentería M.A., Lopez-Morelos V.H., González-Sánchez J., García Hernández R., Dzib-Perez L., Curiel-Lopez F.F.* Effect of electromagnetic interaction during fusion welding of AISI 2205 duplex stainless steel on the corrosion resistance // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – Vol. 396. – 1187–1200, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.109>.
71. *Xu, C., Sheng, G., Cao, X., Yuan, X.* Evolution of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Ultrasonic Assisted Welded-Brazed Mg/Ti // *Joint*, *J. Mater. Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 32 (12). – Pp. 1253–1259, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.029>.
72. *Jian, X., Meek, T.T., Han, Q.* Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration // *Scr. Mater.* – 2006. – Vol. 54 (5). – Pp. 893–896, <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.11.004>.
73. *Sun, Q.J., Lin, S.B., Yang, C.L., Zhao, G.Q.* Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding // *Sci. Technol. Weld. Joining*. – 2009. – Vol. 14 (8). – Pp. 765–767, <https://doi.org/10.1179/136217109X12505932584772>.
74. *Watanabe, T., Shiroki, M., Yanagisawa, A., Sasaki, T.* Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration // *J. Mater. Process. Technol.* – 2010. – Vol. 210 (12). – Pp. 1646–1651, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.015>.
75. *Chen, Q., Lin, S., Yang, C., Fan, C., Ge, H.* Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum // *Ultrason. Sonochem.* – 2017. – Vol. 39. – Pp. 403–413, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.001>.

76. *Chen, Q., Ge, H., Yang, C., Lin, S., Fan, C.* Study on pores in ultrasonic-assisted TIG weld of aluminum alloy // *Metalsbasel.* – 2017. – Vol. 7. – Pp. 53.
77. *Wang, J., Sun, Q., Wu, L., Liu, Y., Teng, J., Feng, J.* Effect of ultrasonic vibration on microstructural evolution and mechanical properties of underwater wet welding joint // *J. Mater. Process. Technol.* – 2017. – Vol. 246. – Pp. 185–197, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.019>.
78. *Krajewski, A., Włosinski, W., Chmielewski, T., Kołodziejczak, P.* Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminum alloys, *B. Pol. Acad. Sci-tech.* – 2012. – Vol. 60. – Pp. 841–852.
79. *Kim, J.S., Watanabe, T., Yoshida, Y.* Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: improvement of laser welding-quality // *J. Laser Appl.* – 1995. – Vol. 7 (1). – Pp. 38–46, <https://doi.org/10.2351/1.4745370>.
80. *Zhenglong Lei, Jiang Bi, Peng Li, Tao Guo, Yaobang Zhao, Dengming Zhang.* Analysis on welding characteristics of ultrasonic assisted laser welding of AZ31B magnesium alloy // *Optics and Laser Technology.* – 2018. – Vol. 105. – Pp. 15–22.
81. *Shi, L., Wu, C.S., Gao, S., et al.* Modified constitutive equation for use in modeling the ultrasonic vibration enhanced friction stir welding process // *Scripta Mater.* 2016;119:21–6.
82. *Devendranath Ramkumar K., Pavan B., Chandrasekar V.* Development of improved microstructural traits and mechanical integrity of stabilized stainless steel joints of AISI 321 // *Journal of Manufacturing Processes* 2018; 32:582–594.
83. *Melde, K., Mark, A.G., Qiu, T., et al.* Holograms for acoustics // *Nature* 2016;537(7621):518–22.
84. *Dai, W.L.* Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6 // *Mater Lett* 2003;57(16):2447–54.
85. *Cui, Y., Xu, C.L., Han, Q.* Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation // *Scripta Mater.* 2006;55(11):975–8.
86. *Verma, J., Taiwade, R.V.* Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments // *Journal of Manufacturing Processes* 2017;25:134–152.

87. *Lei, Y., Xue, H.L., Hu, W.X., et al.* Effects of ac arc ultrasonic on plasma arc in situ welding of SiCp/6061Al MMCs // *Sci Technol Weld Joi* 2011;16(6):561–6.
88. *Krajewski, A., Włosinski, W., Chmielewski, T., et al.* Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminum alloys // *B Pol Acad Sci-tech* 2012;60(4):841–52.
89. *Padhy, G.K., Wu, C.S., Gao S., et al.* Local microstructure evolution in Al 6061- T6 friction stir weld nugget enhanced by ultrasonic vibration // *Mater Design* 2016;92: Pp. 710–23.
90. *Yuan, T., Kou, S., Luo, Z.* Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Mater* 2016;106: Pp. 144–54.
91. *Siyu, Zhou, Guangyi, Ma, Dongjiang, Wu, Dongsheng, Chai, Mingkai, Lei.* Ultrasonic vibration assisted laser welding of nickel-based alloy and Austenite stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes* 31 (2018). Pp. 759–767.
92. *Zhang, C., Gao, M., Zeng, X.* Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 231 (2016). Pp. 479–487.
93. *AlShaer, A.W., Li, L., Mistry, A.* The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture // *Opt. Laser Technol.* 64 (2014). Pp. 162–171.
94. *Mazar Atabaki, M., Nikodinovski, M., Chenier, P., Ma, J., Liu, W., Kovacevic R.* Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration, *Opt* // *Laser Technol.* 59 (2014). Pp. 68–92.
95. *Zhang, C., Gao, M., Wang, D., Yin, J., Zeng, X.* Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy // *J. Mater. Process. Technol.* 240 (2017). Pp. 217–222.
96. *Hagenlocher, C., Stritt, P., Weber, R., Graf, T.* Strain signatures associated to the formation of hot cracks during laser beam welding of aluminum alloys // *Opt. Lasers Eng.* 100 (2018). Pp. 131–140.
97. *Shi, L., Wu, C.S., Liu, X.C.* Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding // *J. Mater. Process. Technol.* 222 (2015). Pp. 91–102.

98. *Kumar, S., Wu, C.S., Padhy, G.K., Ding, W.* Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review // *J. Manuf. Processes* 26 (2017). Pp. 295–322.
99. *Abramov, O.V.*, High-intensity Ultrasonics: Theory and Industrial Applications, Applied & Industrial Physics, 1999.
100. *Ji, S., Meng, X., Liu, Z., Huang, R., Li, Z.* Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic, *Mater. Lett.* 201 (2017). Pp. 173–176.
101. *Xie, W., Fan, C., Yang, C., Lin, S.* Effect of acoustic field parameters on arc acoustic binding during ultrasonic wave-assisted arc welding // *Ultrason. Sonochem.* 29 (2016). Pp. 476–484.
102. *Rostamiyan, Y., Seidanloo, A., Sohrabpoor, H., Teimouri, R.* Experimental studies on ultrasonically assisted friction stir spot welding of AA6061 // *Arch. Civ. Mech. Eng.* 15 (2) (2015). Pp. 335–346.
103. *Chen, Q., Lin, S., Yang, C., Fan, C., Ge, H.* Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum // *Ultrason. Sonochem.* 39 (2017). Pp. 403–413.
104. *Padhy, G.K., Wu, C.S., Gao, S.* Precursor ultrasonic effect on grain structure development of AA6061-T6 friction stir weld // *Mater. Des.* 116 (2017). Pp. 207–218.
105. *Hua, C., Lu, H., Yu, C., Chen, J.-M., Wei, X., Xu, J.-J.* Reduction of ductility-dip cracking susceptibility by ultrasonic-assisted GTAW // *J. Mater. Process. Technol.* 239 (2017). Pp. 240–250.
106. *Xu, H., Jian, X., Meek, T.T., Han, Q.* Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration // *Mater. Lett.* 58 (29) (2004). Pp. 3669–3673.
107. *Wu, M., Wu, C., Gao, S.* Effect of ultrasonic vibration on fatigue performance of AA 2024–T3 friction stir weld joints, *J. Manuf. Processes* 29 (2017). Pp. 85–95.

108. *Xu, C., Sheng, G., Cao, X., Yuan, X.*, Evolution of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of ultrasonic assisted welded-brazed Mg/Ti joint // *J. Mater. Sci. Technol.* 32 (12) (2016). Pp. 1253–1259.
109. *Ma, G., Yan, S., Wu, D., Miao, Q., Liu, M., Niu, F.* Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad yttria stabilized zirconia coating // *Ceram. Int.* 43 (13) (2017). Pp. 9622–9629.
110. *Akbari Mousavi, S.A.A., Sufizadeh, A.R.* Metallurgical investigations of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels // *Materials and Design* 2009;30: Pp. 3150–3157.
111. *Li, Liqun, Xi, Hongbo, Ma, Guolong, Peng, Genchen.* Flow dynamics during single- and dual-spot laser welding with one common keyhole of 321 stainless steel // *Journal of Materials Processing Tech.* 2018;255: Pp. 841–852.
112. *Meng, Wei, Xu, Zhenlin, Ma, Qunshuang, Yin, Xiaohui, Fang, Junfei.* Pulse fiber laser welding of AISI 321-AISI 405 stainless steel thick plates butt joints // *Journal of Materials Processing Tech.* 2019;271: Pp. 214–225.
113. *Sayiram, G., Arivazhagan, N.* Microstructural characterization of dissimilar welds between Incoloy 800H and 321 Austenitic Stainless Steel // *Materials Characterization.* – 2015. – Vol. 102: Pp. 180–188
114. *Devendranath Ramkumar, K., Pavan, B., Chandrasekar, V.* Development of improved microstructural traits and mechanical integrity of stabilized stainless steel joints of AISI 321 // *Journal of Manufacturing Processes* 2018; 32: Pp. 582–594.
115. *Hajitabar Ali, Naffakh-Moosavy Homam.* Electron beam welding of difficult-to-weld austenitic stainless steel/Nb-based alloy dissimilar joints without interlayer // *Vacuum.* – 2017. – Vol. 146: Pp. 170-178.
116. *Chen, Y.J., Yue, T.M., Guo, Z.N.* Fatigue behaviour of titanium/PET joints formed by ultrasound-aided laser welding // *Journal of Manufacturing Processes* 2018;31: Pp. 356-363.
117. *Chen, Y.J., Yue, T.M., Guo, Z.N.* Laser joining of metals to plastics with ultrasound vibration // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2017. – Vol. 249: Pp. 441-451.

118. *Gureev, D.M.* Prospects for laser-ultrasound treatment for surface modification, welding modification, welding, and pattern cutting // *Journal of Russian Laser Research.* – 1999. – № 20. Pp. 28-66.
119. *Tarasov, S.Yu., Vorontsov, A.V., Fortuna, S.V., Rubtsov, V.E., Krasnoveikin, V.A., Kolubaev, E.A.* Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel // *Welding in the World.* – 2019. – №63,3: Pp. 875–886.
120. *Hung, J.C., Tsai, Y.P., and Hung, C.* Development of a new apparatus for ultrasound vibration-assisted glass hot embossing process // *Precision Engineering.* – 2013. – Vol. 37. – Pp. 222–227.
121. *Tsai, Y.P., Hung, J.C., Yin, L.C., and Hung, C.* Ultrasound vibration-assisted optical glass hot embossing process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2012. – №60,12. – Pp. 1207–1213.
122. *Mousavi, S.A., Feizi, H., and Madoliat, R.* Investigations on the effects of ultrasound vibrations in the extrusion process // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2007. – Vol. 187: Pp. 657–661.
123. *Laugier, P., Haïat, G.* Introduction to the Physics of Ultrasound // In *Bone Quantitative Ultrasound*, Springer, Dordrecht, Netherlands. – 2011: Pp. 29–45.
124. *Babitsky, V.I., and Kalashnikov, A.N.* Ultrasoundally assisted turning of aviation materials // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2003. – Vol. 132,1. – Pp. 3157–3167.
125. *Shen, X.H., Zhang, J., Xing, D., and Zhao, Y.* A study of surface roughness variation in ultrasound vibration-assisted milling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2012. – Vol. 58,5: Pp. 533–561.
126. *Liao, Y.S., Chen, Y.C., and Lin, H.M.* Feasibility study of the ultrasound vibration assisted drilling of Inconel superalloy // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2007. – Vol. 47,12. – Pp. 1988–1996.
127. *Zheng, H.Y., and Huang, H.* Ultrasound vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes // *Journal of Micromechanics and Microengineering.* – 2007. – Vol. 17,8: Pp. 58–61.

128. *Alavi, S.H., and Harimkar, S.P.* Melt expulsion during ultrasound vibration assisted laser surface processing of austenitic stainless steel // Ultrasounds. – 2015. – Vol. 59. – Pp. 21–30.
129. *Abdullah, A., Shabgard, M.R., Ivanov, A., and Shervanyi-Tabar, M.T.* Effect of ultrasound-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co) // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 41, 3–4. – Pp. 268–280.
130. *Li, Meiyang, Han, Bin, Wang, Yong, Song, Lixin, Guo, Lanyang.* Investigation on laser cladding high-hardness nano-ceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2016. – Vol. 127, 11. – Pp. 4596-4600.
131. Patent RU 2618287 Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. A method for laser product treatment (variants) and device for its implementation (variants), Application submission date: 04.08.2015, Published in bulletin No. 13, 05.03.2017.
132. Patent RU 165178 Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. Device for casting of products from metals from metals and alloys, Application submission date: 04.07.2015, Published in bulletin No. 28: 10.10.2016.
133. *Rosenberg, D.* Physics and technology of powerful ultrasound. Volume 2. Powerful ultrasonic fields / Rosenberg D. – Moscow: Book on Demand, 2012. – 268 p.
134. *G. Eskin Dmitry, Mi Jiawei.* Solidification Processing of Metallic // Alloys Under External Fields, Part of the Springer Series in Materials Science book series (SSMATERIALS, – Vol. 273), 2018.
135. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А., Кудимов, О.В., Гильмутдинов, А.Х.* Лазерная сварка образцов, полученных методами аддитивного производства // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 52-56.
136. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А., Гильмутдинов, А.Х.* Особенности формирования структуры сварных швов в процессе лазерно-акустической сварки нержавеющих сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 57-60.

137. *Gorunov, A.I., Nyukhlaev, O.A., Gilmutdinov, A.K.* Investigation of microstructure and properties of low-carbon steel during ultrasonic-assisted laser welding and cladding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 99(9-12). – Pp. 2467-2479.
138. *Gilmutdinov, A.K., Gorunov, A.I., Nyukhlaev, O.A., Schmidt, M.* Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – Pp. 3033–3043.
139. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Изучение особенностей лазерной сварки со сканированием луча применительно к деталям лопаточного аппарата турбины // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: сб. докл. всероссийской научно-практической конференции с международным участием: В 2-х т. 2016. – С. 551-553.
140. *Лещева, А.С., Нюхляев, О.А., Гильмутдинов, А.Х.* Влияние лазерно-акустической обработки на структуру деталей, полученных лазерной сваркой и наплавкой // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: сб. докл. всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2018. – С. 574-577.
141. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А., Попов, Е.С., Низамов, Р.А., Гильмутдинов, А.Х.* Исследование влияния ультразвуковых воздействий на лазерную сварку нержавеющей стали // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы V Международной конференции. – 2019. – С. 74-79.
142. *Нюхляев, О.А., Лещева, А.С.* Лазерная резка и лазерная сварка в один проход толстостенных листов стали при помощи оптоволоконных лазеров высокой мощности // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). Тек. докл. В 6 т. – 2019. – С. 607-610.
143. *Гильмутдинов, А.Х., Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Лазерно-акустическая сварка образцов из нержавеющей стали // XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых

превращений при создании материалов нового поколения»: материалы всероссийской конференции. – 2020. – С. 52-59.

144. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А., Гильмутдинов, А.Х.* Лазерно-акустическая сварка образцов из стали 12Х18Н9Т // Вестник Югорского государственного университета, 2023. – № 4. – С. 112-119.

145. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А., Гильмутдинов, А.Х.* Лазерная сварка труб из стали 09Г2С // Вестник Югорского государственного университета, 2024. – № 1. – С. 35-45.

146. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Влияние акустических колебаний на структуру и свойства образцов из стали 12Х18Н10Т // Известия ВолгГТУ, 2025. – № 6 (301). – С. 81-86.

ПРИЛОЖЕНИЕ



АКТ

об использовании в учебном процессе
результатов диссертационного исследования

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Нюхляева Олега Александровича «Управление микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки» легли в основу создания курса «Лазерные акустические технологии» и используются при чтении лекций и выполнения лабораторных работ для магистров по направлению «Лазерная техника и лазерные технологии», профиль «Аддитивные технологии» на кафедре «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Заведующий кафедрой «Лазерных и
аддитивных технологий», доктор
физ.-мат. наук, профессор, академик
АН РТ

А.Х. Гильмутдинов



ТЕХНОФОРДЖ

ООО «ТЕХНОФОРДЖ»

ИНН 5948075430 КПП 594801001

Тел.: +7 952 319 1993, E-mail: In@tforge.ru

Адрес: 614065, г. Пермь, ул. Пыжевская, д. 19

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ТЕХНОФОРДЖ»

А.И. Курнев

ТЕХНОФОРДЖ

АКТ ВНЕДРЕНИЯ от 15.05.2025г.

результатов диссертационной работы Нюхляева Олега Александровича на тему:
«Управление микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки»

Научно-техническая комиссия в составе инженера по научно-технической информации Бондаренко Олеси Сергеевны, заместителя директора Кизика Николая Вячеславовича составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Нюхляева О.А. приняты к внедрению ООО «ТЕХНОФОРДЖ».

В производственный процесс ООО «ТЕХНОФОРДЖ» внедрены результаты диссертационного исследования Нюхляева Олега Александровича на тему: «Управление микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки», а именно:

- 1) Оптимальные режимы лазерной сварки насосно-компрессорных труб (в т.ч. с ультразвуковыми колебаниями частотой 22–80 кГц);
- 2) Технология лазерно-акустической сварки, обеспечивающая снижение пористости в 3–5 раз и увеличение прочности сварных швов на 20–30%;
- 3) Методика контроля структуры и механических свойств сварных соединений.

Результаты внедрения

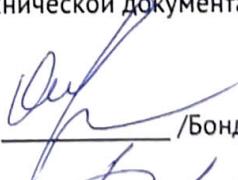
Внедрение технологии позволило:

- 1) Обеспечить сварные соединения НКТ с повышенными прочностными характеристиками;
- 2) Снизить количество брака благодаря уменьшению пористости и химической неоднородности;
- 3) Увеличить срок службы восстановленных труб.

Заключение

Результаты диссертационного исследования Нюхляева О.А. успешно внедрены в производственный процесс ООО «ТЕХНОФОРДЖ», подтвердили свою эффективность и соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Инженер по научно-технической
информации


/Бондаренко О.С./

Заместитель директора


/Кизик Н.В./