

*На правах рукописи*



**НЮХЛЯЕВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

2.6.17. Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Казань 2025**

Работа выполнена на кафедре лазерных и аддитивных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

Научный руководитель: **Горунов Андрей Игоревич**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Вологжанина Светлана Антониновна**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра «Материаловедения и технологии художественных изделий», профессор

**Прияткин Дмитрий Вячеславович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Оборудование и технология сварочного производства», доцент

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «19» марта 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, Зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте: [https://www.kstu.ru/event.jsp?id=175154&id\\_cat=141](https://www.kstu.ru/event.jsp?id=175154&id_cat=141).

Отзывы на автореферат и диссертацию в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.312.12. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
д.т.н, доцент



Тихонова Н.В.

# **I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность темы исследования**

На сегодняшний день существует большое количество методов получения сварных соединений с повышенными физико-механическими характеристиками и заданной микроструктурой в сварных швах, полученных методами лазерной сварки.

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. Однако 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.Z50.31.0023 №14.z50.31.0023, 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. Абильсиитов, С.А. Астапчик, Г.И. Бровер, А.А. Веденов, В.П. Вейко, Н.В. Грезева, А.Н. Грезев, 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. Смуров, 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 12X18H10T позволяет снизить химическую неоднородность в объеме сварного шва до 15%, размер пластинчатых включений  $\delta$ -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 методики стыковки 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 использованием экспериментальных методов исследования. Металлографические исследования структур проводились с помощью оптического универсального инвертированного микроскопа Axiovert-200M, испытания механических свойств – на маятниковом

копре Instron 600MPX и разрывной машине Instron 5884 в соответствии с требованиями ГОСТ. Замер твердости проводился на микротвердомере НХ–1000ТМ, контроль внутренних дефектов осуществлялся при помощи компьютерной 3D-томографии NSI X5000. Работы по лазерной сварке труб проводились на установке гибридной лазерной сварки LaserWeld 30 R120, оснащенной роботом-манипулятором KUKA KR 120 R2700 extra HA, и иттербиевым 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 диссертационного исследования**

Информационную базу диссертационного 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 и осуществляется отпуск металла шва.

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  $\delta$ -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 с опубликованными результатами 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 методики стыковки 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, имеют 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 наукометрическими базами Web of Science и Scopus, получены 4 сертификата программы ЭВМ, остальные – в статьях и материалах конференции различного уровня.

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

## **II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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 с различными толщинами с применением различных источников концентрированной энергии. Изучены преимущества и недостатки лазерной сварки.

Показано, что использование дополнительных внешних ультразвуковых воздействий позволяет получать благоприятное сочетание структуры и механических свойств в сварном шве и в околшовной зоне термического влияния. На основе проведенного анализа поставлена цель работы 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. Воздействие ультразвуковых колебаний осуществлялось при помощи аппаратов U-Sonic с собственной частотой колебаний волноводов 15, 22, 40, 80 и 100 кГц.

В **главе 3** показаны результаты исследования, связанные с улучшением механических характеристик сварного соединения при воздействии ультразвуковыми колебаниями, а также исследование влияния ультразвуковых колебаний с различной частотой на формирование сварного шва в стали 12Х18Н10Т.

На микрофотографиях можно видеть, что в процессе формирования сварного шва в нижней части наблюдается сужение и шов вытягивается. Данный эффект вызван ультразвуковыми колебаниями, оказывающими значительное влияние при увеличении их частоты с 15 до 22 кГц (рисунок 1, *а, б*).

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 1).

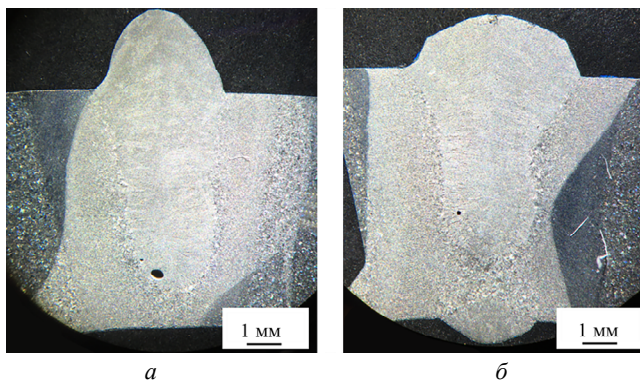


Рисунок 1 – Микрофотографии поперечного сечения наплавленного металла:  
*а* – без ультразвуковой обработки; *б* – с ультразвуковой обработкой

Предел прочности таких образцов остается соответствующим основному металлу, так как при растяжении разрушение происходит по основному металлу (таблица 1).

Таблица 1 – Механические характеристики образцов с ультразвуковой обработкой и без ультразвуковой обработки

Образец	Параметры образца, мм		Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа
	ширина	толщина		
Без ультразвуковой обработки	7,70	2,02	9,768	527,998
Ультразвуковая обработка	8,75	2,02	11,961	628,704

Звуковые колебания вводились в широком диапазоне частот: 15 (ниже ультразвука), 22, 40, 80 и 100 кГц. На рисунке 2 показано изменение микротвердости в поперечном сечении образцов, полученных при различных акустических колебаниях. Однако структура и размеры сварного шва значительно меняются при воздействии акустического поля на звуковой частоте 15 кГц (рисунок 2, б). На рисунке 2 также показано распределение микротвердости в сварном шве. Небольшое увеличение твердости в центральной части сварного шва наблюдается без воздействия акустической вибрации (рисунок 2, а).

Темные и светлые полосы стали тоньше, а их число значительно увеличилось (рисунок 2, з). Наиболее равномерное распределение твердости в сварном шве наблюдается при воздействии акустических колебаний с частотой 80 кГц (рисунок 2, д). В то же время увеличение частоты колебаний до 100 кГц приводит к снижению равномерного распределения твердости в центральной части сварного шва (рисунок 2, е).

При детальном изучении микроструктуры металла, полученного в результате сварки с применением акустических колебаний (рисунок 3, а), можно видеть, что в микроструктуре сварного шва наблюдается пластина  $\delta$ -феррита, размер пластины составляет до 50 мкм. Воздействие акустических колебаний с частотой 80 кГц (рисунок 3, д) приводит к фрагментации  $\delta$ -феррита.

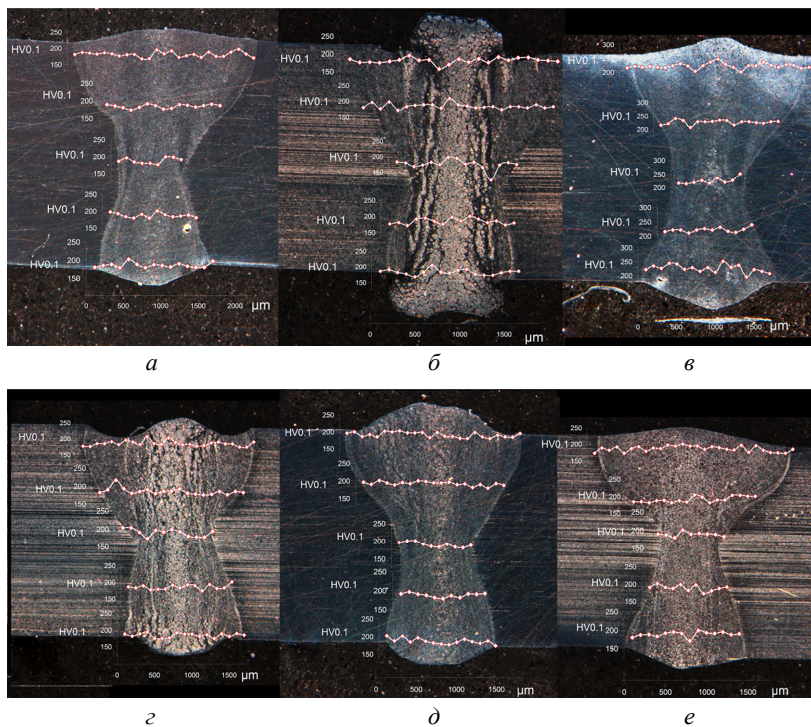


Рисунок 2 – Изображения поперечных сечений сварных соединений и распределение микротвердости на различной глубине сварного шва:  
*a* – без акустического воздействия и с воздействием различных звуковых частот, кГц: *б* – 15; *в* – 22; *г* – 40; *д* – 80; *е* – 100

На рисунке 4 показаны результаты испытаний, сваренных образцов на трехточечный изгиб, полученные при различных лазерно-акустических условиях. Повышение пластичности и прочности связано с отмеченным снижением пористости, фрагментацией пластин  $\delta$ -феррита и снижением химической неоднородности в сварном шве.

В **главе 4** представлена технологическая схема лазерной сварки бывших в употреблении насосно-компрессорных труб (БУ НКТ) для нефтяной промышленности.

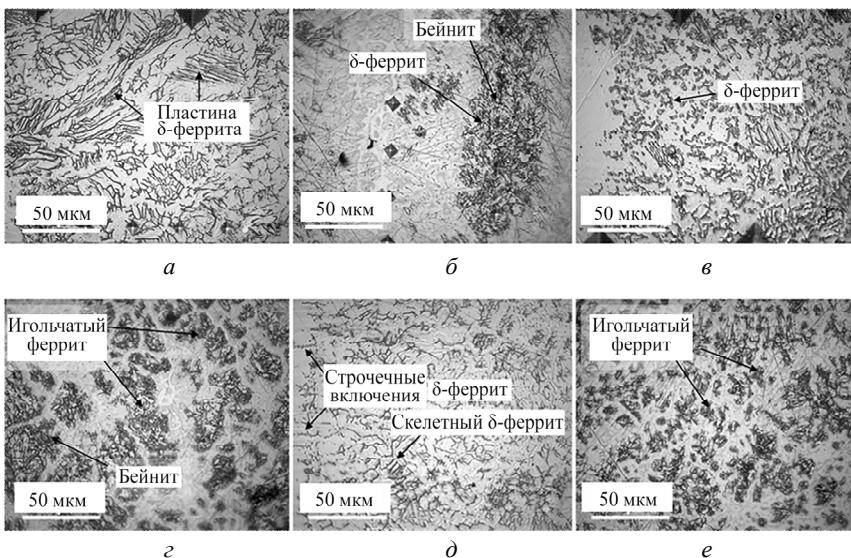


Рисунок 3 – Микроструктура сварного сплава: *a* – без применения акустических колебаний и при разных частотах акустических колебаний, кГц: *b* – 15 кГц; *в* – 22 ; *г* – 40; *д* – 80; *е* – 100

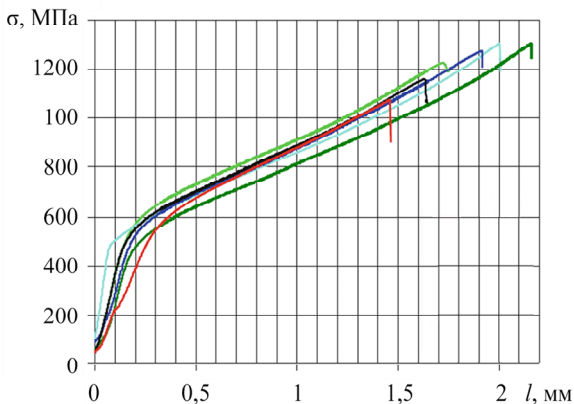


Рисунок 4. Кривые трехточечного изгиба в координатах нагрузка-перемещение для образцов, сваренных при различных частотах ультразвуковой обработки: — 0 кГц; — 15 кГц; — 22 кГц; — 40 кГц; — 80 кГц; — 100 кГц

Сварка производилась с помощью волоконного лазера мощностью до 30 кВт, с длиной волны излучения 1070 нм. Сборочная схема с оснасткой для стыковки труб показана на рисунке 5. В процессе 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.

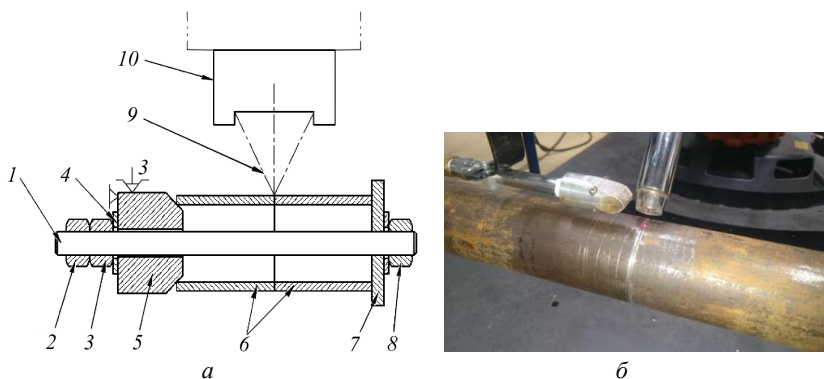


Рисунок 5. Приспособление для лазерной сварки труб: *а* – общий вид; *б* – сборочная схема; 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – контргайка; 4 – шайба; 5 – конусный упор; 6 – стыкуемые трубы; 7 – зажимная шайба; 8 – зажимная гайка; 9 – схема фокусировки лазера; 10 – лазерная сварочная голова Kugler

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 (рисунок 6).

Лазерная сварка производилась в два этапа: на первом осуществлялась сварка трубы 09Г2С лазером, а на втором – наплавка проволоки сверху предварительно полученного сварного шва. График распределения мощности лазерного излучения в зависимости от времени в процессе получения сварного шва показан на рисунке 7.

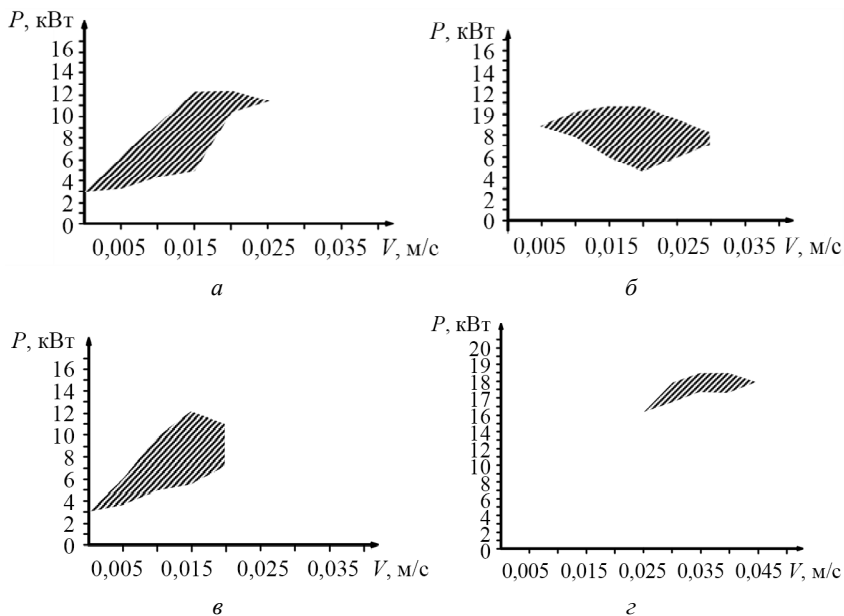


Рисунок 6 – Зависимость наличия проплава сварного шва от скорости и мощности лазера: *а* – фокус –10 мм; *б* – фокус –15 мм; *в* – фокус +15 мм; *г* – фокус –30 мм

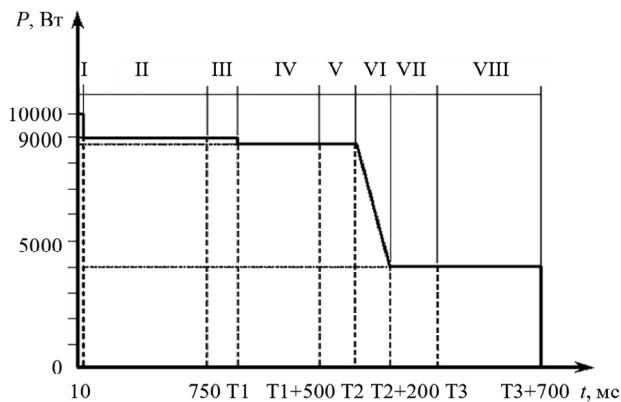


Рисунок 7 – Оптимальный режим сварки: 0 – начало сварки; T1 – точка начала последней четверти; T2 – конец первого прохода и начало второго прохода; T3 – конец второго прохода



Можно видеть, что мощность лазерного излучения периодически изменяется, это обусловлено тем, что при первом и втором проходах необходимы разная мощность излучения и снижение мощности при прогреве трубы при термическом воздействии в процессе сварки.

Результаты томографического исследования сварных швов представлены на рисунке 8. 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.

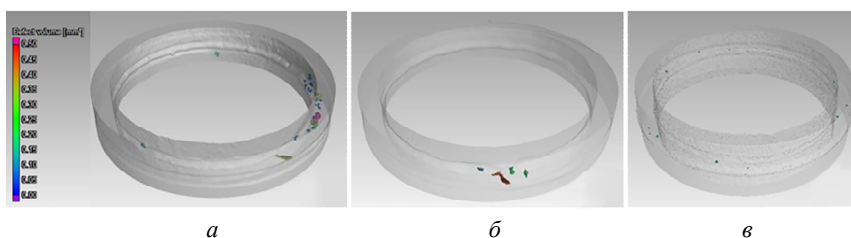


Рисунок 8. 3D-снимок трубы, сделанный с помощью рентгеновского томографа: а – скорость подачи проволоки 2,2 мм/с; б – 2,6 мм/с; в – 3 мм/с

Появление пористости в сварном шве объясняется нехваткой присадочного материала, вследствие чего 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.

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 составило 637,4 МПа. Значение предела прочности при разрыве образцов со швом составило на 4% меньше чем значение в образцах без шва.

Таким образом, было установлено влияние частоты ультразвуковых колебаний на предел прочности сварных швов из сплавов 09Г2С рисунок 9, а и 12Х18Н10Т рисунок 9, б, получаемых методом лазерной сварки.

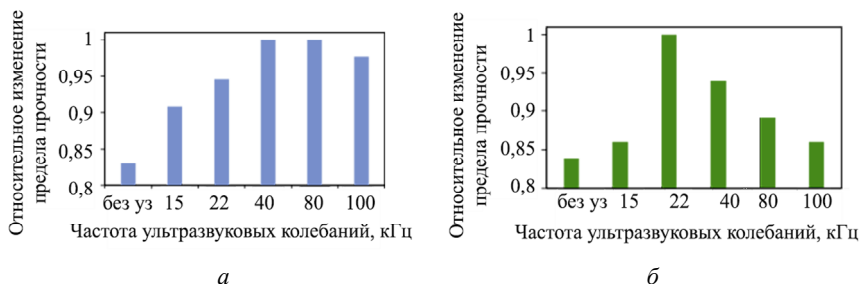


Рисунок 9 – Влияние ультразвуковых колебаний на предел прочности образцов, полученных лазерной сваркой: а – 12Х18Н10Т; б – 09Г2С

Для сплавов с разной степенью легирования частота ультразвуковых колебаний оказывает различное влияние. Данный эффект может быть обусловлен различной вязкостью исследуемых сплавов, определяемых содержанием легирующих примесей и неметаллических включений.

## 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  $\delta$ -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 12X18H10T 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  $\delta$ -феррита и нитридов 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 устранению 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

***Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. *Нюхляев, О.А.* Лазерная сварка образцов, полученных методами аддитивного производства / А.И. Горунов, О.А. Нюхляев, О.В. Кудимов, А.Х. Гильмутдинов // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – № 1. – 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 52-56.

2. *Нюхляев, О.А.* Особенности формирования структуры сварных швов в процессе лазерно-акустической сварки нержавеющей сталей / А.И. Горунов, О.А. Нюхляев, А.Х. Гильмутдинов // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 57-60.

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

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

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

***Статьи, опубликованные в научных изданиях, включенных в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science:***

1. *Nyukhlaev, O.A.* Investigation of microstructure and properties of low-carbon steel during ultrasonic-assisted laser welding and cladding / A.I. Gorunov, O.A. Nyukhlaev, A.K. Gilmudinov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – № 99(9-12). Pp. 2467-2479.

2. *Nyukhlaev, O.A.* Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel / A.K. Gilmutdinov, A.I. Gorunov, O.A. Nyukhlaev, M. Schmidt // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 106. – 2020. – Pp. 3033–3043.

***Публикации в материалах конференций и других изданиях:***

1. *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 т. – 2016. – С. 551-553.

2. *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.

3. *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.

4. *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). Доклады участников международной молодежной научной конференции. В 6 т. – 2019. – С. 607-610.

5. *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.

***Программы ЭВМ:***

1. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Программа управления процессом лазерно-акустической сварки. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020662243, 09.10.2020. Заявка № 2020616544 от 25.06.2020.

2. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Программа управления процессом лазерной сварки с присадочной проволокой, кронштейнов с соединением типа «шип-паз» на роботизированном комплексе. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019619392, 16.07.2019. Заявка № 2019618034 от 02.07.2019.

3. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Программа управления процессом гибридной лазерной сварки на роботизированном комплексе. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019619138, 11.07.2019. Заявка № 2019618006 от 02.07.2019.

4. *Горунов, А.И., Нюхляев, О.А.* Программа лазерной сварки кронштейнов с соединением типа «шип-паз». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019619137, 11.07.2019. Заявка № 2019618003 от 02.07.2019.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл.печ.л.1,16. Тираж 100 экз. Заказ Д51.

---

Издательство КНИТУ-КАИ  
420111, Казань, К. Маркса, 10