

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

ЮУрГУ

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, e-mail: info@susu.ru, www.susu.ru
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

10.02.2026

№ 18-308-392

УТВЕРЖДАЮ

На № _____ ОТ _____

Первый проректор-
проректор по научной работе,

д.т.н, доцент

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)»

/А.В. Коржов/

« 10 » 02 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

на диссертационную работу Нюхляева Олега Александровича

на тему

«УПРАВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРОЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТРУБНЫХ
СТАЛЕЙ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.17. Материаловедение

Актуальность темы диссертации

Широкое применение трубных сталей в критически важных отраслях, таких как нефтегазовая промышленность и авиакосмическая техника, предъявляет повышенные требования к качеству и надежности сварных соединений. Существующие традиционные методы сварки (дуговая, газовая) зачастую связаны с введением значительного количества тепла, что приводит к образованию обширной зоны термического влияния, грубой крупнозернистой структуры, химической неоднородности и пористости, негативно влияющих на механические свойства.

Лазерная сварка, особенно с использованием мощных волоконных лазеров, является перспективной альтернативой, позволяющей повысить производительность и снизить тепловложение. Однако управление микроструктурой и свойствами металла шва остается сложной задачей. В этой связи комбинирование лазерной сварки с дополнительными внешними воздействиями, в частности ультразвуковыми колебаниями, для целенаправленного управления формированием структуры является актуальным научным и практическим направлением. Таким образом, тема

диссертационной работы Нюхляева Олега Александровича является своевременной и не вызывает сомнений в своей актуальности.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной 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.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1) Установление закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов, получаемых в процессе лазерной сварки конструкционных трубных сталей с дополнительным воздействием ультразвуковыми колебаниями.

2) Установление 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.

Поставленные цель и задачи являются важными с точки зрения фундаментальных основ управления структурой материалов и имеют высокую практическую значимость для современных производств.

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 работы

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).

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Нюхляева О.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 143 наименований и приложений. Работа изложена на 169 страницах, содержит 108 рисунков и 25 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. В первой главе проведен обширный аналитический обзор литературных источников по методам сварки, преимуществам лазерной сварки и применению ультразвуковых воздействий в технологиях соединения материалов.

В первой главе Проанализированы работы отечественных и зарубежных ученых в области применения ультразвуковых колебаний для обработки металлических расплавов. Установлено, что ультразвуковая обработка способствует интенсификации конвективных потоков, дроблению растущих кристаллов, подавлению газовыделения и снижению пористости. Выявлено, что подавляющее большинство исследований ультразвуковой обработки при сварке проводится в узком диапазоне частот 20–40 кГц. Исследования влияния более широкого спектра частот, включая звуковые и высокочастотные ультразвуковые колебания, на процессы структурообразования и свойства сварных швов практически отсутствуют. Это позволило автору корректно определить направление собственного исследования. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание методов исследования включая металлографический анализ с применением оптического микроскопа Axiovert-200M и электронной микроскопии. Для контроля внутренних дефектов применялся компьютерный промышленный 3D-томограф NSI X5000 с пространственным разрешением 100 мкм. Исследование химического состава и распределения элементов по сечению шва выполнялось методом энергодисперсионной спектроскопии. Механические испытания на статическое растяжение проводились на машине Instron 5884, испытания на трехточечный изгиб выполнены для оценки прочности и пластичности сварных соединений. Измерение микротвердости осуществлялось на автоматическом твердомере НХ-1000ТМ с построением профилей распределения по сечению шва и зоны термического влияния. Все ключевые эксперименты проводились не менее трех раз для подтверждения воспроизводимости результатов. Экспериментальный комплекс включал роботизированную систему на базе промышленного робота KUKA KR 120 R2700 extra HA с оптической сварочной головкой KUGLER и иттербиевым

волоконным лазером мощностью до 30 кВт. Для введения ультразвуковых колебаний использовались аппараты U-Sonic с комплектом сменных волноводов, обеспечивающих частоты 15, 22, 40, 80 и 100 кГц при мощности 1,5 кВт.

В третьей главе представлены результаты исследований микроструктуры и выявлено, что без ультразвукового воздействия в металле шва присутствуют крупные пластины δ -феррита размером до 50 мкм. Применение ультразвуковых колебаний с частотой 22–40 кГц обеспечивает фрагментацию пластин δ -феррита, снижая их размер до 5–10 мкм. Наиболее эффективное измельчение структуры достигается при частоте 80 кГц, где формируется высокодисперсный игольчатый феррит на фоне аустенитной матрицы. Рентгеновская томография убедительно показала, что при сварке без УЗК в шве стабильно образуются газовые поры размером более 100 мкм. Применение ультразвуковых колебаний с частотой 80 кГц позволяет полностью устранить обнаруживаемые поры, что подтверждено трехкратным повторением экспериментов и анализом трех различных сечений каждого образца. Энергодисперсионный анализ распределения химических элементов показал, что ультразвуковая обработка способствует снижению химической неоднородности по сечению сварного шва. Наиболее равномерное распределение хрома, никеля и железа достигается при частотах 22 и 80 кГц. Сегрегация никеля и углерода, ответственных за стабилизацию аустенита, минимизируется. Испытания на трехточечный изгиб продемонстрировали, что образцы, сваренные с применением УЗК 80 кГц, характеризуются максимальными значениями прочности и пластичности. Напряжение и деформация при изгибе для данных образцов соответственно в 1,3 и 1,5 раза выше по сравнению с образцами, сваренными без ультразвуковой обработки. Повышение механических свойств связано с фрагментацией δ -феррита, снижением пористости и гомогенизацией химического состава.

В четвертой главе разработана и апробирована технологическая схема лазерно-акустической сварки бывших в употреблении насосно-компрессорных труб, показана ее эффективность и результаты промышленных испытаний. Технологическая схема включает два последовательных прохода. Первый проход выполняется на полную толщину стенки с программируемым снижением мощности лазера по мере нагрева трубы для предотвращения перегрева на последней четверти диаметра. Второй проход представляет собой наплавку присадочной проволоки 09Г2С поверх сформированного шва, что позволяет устранить усадочную раковину и одновременно выполняет функцию низкого отпуска металла шва. Экспериментально установлено, что скорость подачи проволоки 3,0 мм/с является оптимальной для получения шва

с минимальным количеством пор. Разработан специальный импульсный режим в месте начала сварки (мощность импульса 10 кВт, длительность 30 мс), который в сочетании с ультразвуковыми колебаниями частотой 22 кГц позволяет полностью устранить сквозной канал, образующийся при стартовом прожиге. Механические испытания показали, что средний предел прочности сварного соединения, полученного по двухпроходной технологии, составляет 637,4 МПа, что лишь на 4% ниже прочности основного металла (661,5 МПа). Производственные испытания, проведенные в ООО «ТЕХНОФОРДЖ», подтвердили герметичность сварных соединений: опытные образцы труб выдержали гидравлическое давление 300 и 700 атм. Сваренные трубы были установлены в нефтяные скважины и находятся в эксплуатации. Исследовано также влияние ультразвуковых колебаний на процесс лазерной наплавки и аддитивного выращивания образцов из проволоки 09Г2С. Установлено, что применение УЗК с частотой 22 кГц позволяет снизить размер зерен в 3 раза, уменьшить пористость в 3–5 раз и повысить предел прочности и пластичности в 1,5 раза. Разработанная технология апробирована для сварки разнородных материалов, полученных аддитивными методами, на примере изделия типа «Баллон».

В заключении диссертационной работы сформулированы четыре итоговых положения, в полной мере раскрывающих поставленную цель и решенные задачи. Доказано, что применение ультразвуковых колебаний частотой 80 кГц при мощности 1,5 кВт в процессе лазерной сварки аустенитной стали 12Х18Н10Т обеспечивает формирование сварного соединения с гомогенной микроструктурой и равномерным распределением легирующих элементов по сечению шва, полное отсутствие газовых пор и трещин, а также повышение предела прочности при изгибе в 1,2 раза за счет диспергирования пластинчатых выделений δ -феррита и нитридов титана. Установлено, что ультразвуковая обработка с частотой 22 кГц при сварке низколегированной стали 09Г2С, ориентированная параллельно поверхности, сокращает ширину сварочной ванны в 1,3 раза и увеличивает глубину проплавления в 1,5 раза, а при лазерной наплавке присадочной проволоки 09Г2С повышает временное сопротивление разрыву и относительное удлинение в 1,5 раза благодаря трехкратному уменьшению размера зерна и снижению пористости в 3–5 раз. Определены рациональные режимы лазерной сварки стали 09Г2С: расфокусировка в интервалах $0 < \Delta f < 10$ и $-10 < \Delta f < 0$, мощность излучения 10 кВт при длине волны 1064 нм, обеспечивающие стабильное проплавление кромок толщиной до 5 мм при ширине шва 4 мм, при этом прочность двухпроходного сварного соединения достигает 96 % от прочности основного металла. Показано, что инициирование процесса сварки

импульсным воздействием мощностью 10 кВт длительностью 30 мс при скорости подачи проволоки 2,2 мм/с в сочетании с ультразвуковыми колебаниями частотой 22 кГц полностью ликвидирует сквозной канал, газовые поры и усадочные пустоты в стартовой зоне сварного шва стали 09Г2С. Все выводы базируются на репрезентативном экспериментальном материале, логически вытекают из содержания глав диссертации и подтверждены актами внедрения разработанных технологических решений в производственную деятельность ООО «ТЕХНОФОРДЖ» и в учебный процесс кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей формирования структуры и свойств сварных швов трубных сталей под воздействием ультразвуковых колебаний в процессе лазерной сварки. Выявлены механизмы влияния частоты ультразвука на фрагментацию δ -феррита, снижение химической неоднородности и пористости.

Практическая значимость работы имеет выраженный внедренческий характер и подтверждена конкретными результатами:

Промышленное внедрение: Разработанная технология ЛАС НКТ передана компании ООО «ТЕХНОФОРДЖ». Сваренные по данной технологии трубы успешно прошли приемочные испытания на герметичность под давлением 300 и 700 атм и были введены в эксплуатацию в нефтяных скважинах, где продолжают работу. Рассчитан суммарный экономический эффект от использования технологии восстановления труб.

Разработка программного обеспечения: Автором (в соавторстве) созданы и зарегистрированы 4 программы для ЭВМ (свидетельства № 2020662243, 2019619392, 2019619138, 2019619137) для управления процессами лазерно-акустической и гибридной сварки на роботизированных комплексах, что обеспечивает воспроизводимость и автоматизацию технологии.

Учебно-методическое применение: Материалы диссертации включены в учебный процесс и используются при проведении производственных практик на кафедре лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Создание задела для новых технологий: Результаты работы открывают перспективы для ЛАС разнородных материалов, полученных аддитивными методами (продемонстрировано на примере изделия типа «Баллон»), а также для комбинированной обработки (сварка + наплавка с УЗ-воздействием).

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

Применением современных сертифицированных методов и оборудования для проведения экспериментов и исследований (металлография, рентгеновская томография, механические испытания).

Репрезентативным объемом экспериментальных данных и статистической обработкой результатов.

Внедрением разработанной технологии и ее успешной апробацией в промышленных условиях.

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.

Замечания

Отмечая безусловные достоинства диссертационной работы Нюхляева Олега Александровича, в качестве замечаний следует указать:

1) В литературном обзоре, несмотря на его объем, недостаточно критически проанализированы и сопоставлены количественные результаты и модели, предлагаемые в работах зарубежных авторов.

2) В описании методики эксперимента отсутствуют данные о погрешностях измерений при определении механических характеристик и микротвердости.

3) В тексте автореферата и, вероятно, диссертации встречаются опечатки (например, указание скорости подачи проволоки 3 м/с на стр. 21 автореферата, что представляется завышенным).

4) Проводилась ли оценка качества сварных швов согласно требованиям конкретных ГОСТ или отраслевых стандартов (например, для трубной продукции), и каким именно?

5) К какому конкретному материалу (09Г2С или 12Х18Н10Т) и условиям сварки относится микрофотография на Рисунке 3.8, так как в подписи это не указано?

6) Какую функцию выполняет баллон, изображенный на одной из схем, и является ли он частью системы подачи защитного газа или имеет иное назначение?

Указанные замечания носят уточняющий характер и не снижают общей высокой оценки представленной работы.

Отмеченные недостатки не снижают общего высокого уровня диссертационной работы и ее научно-практической значимости. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 2.6.17.Материаловедение, п. 1, 3, 4:

п. 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).

п. 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.

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

Заключение

Диссертационная работа Нюхляева Олега Александровича «Управление микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки» представляет собой завершенное научное исследование, в котором решена актуальная научная задача, имеющая важное практическое значение для машиностроения, полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским

диссертациям (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013), а ее автор Нюхляев Олег Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Информационно-измерительная техника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (протокол № 14 от 09.02.2026)

Заведующий кафедрой

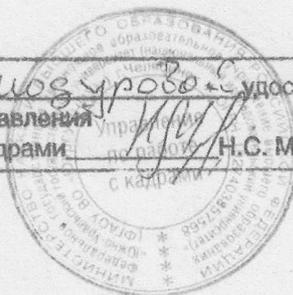
«Информационно-измерительная

техника», д.т.н., доцент

/Самодурова Марина Николаевна/

Самодурова Марина Николаевна, доктор технических наук (технические науки), 05.03.05 Технологии и машины обработки давлением, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Тел.: +7 (351) 267-99-00, e-mail: samodurovamn@susu.ru, <https://www.susu.ru>

Подпись *Самодурова* удостоверяю
Начальник управления
по работе с кадрами *Н.С. Минакова*



Вход. № *05-8837*
« *20* » *02* 20*26* г.
подпись *Минакова*