

В диссертационный совет 24.2.312.12
на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

ОТЗЫВ

официального оппонента Вологжаниной Светланы Антониновны на
диссертационную работу Нюхляева Олега Александровича на тему:
«УПРАВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРОЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ТРУБНЫХ
СТАЛЕЙ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.17. Материаловедение

1. Актуальность темы диссертации

Совершенствование технологий получения неразъемного соединения конструкционных материалов, в частности трубных сталей, является одной из ключевых задач современного машиностроения, энергетики и нефтегазовой отрасли. Традиционные методы сварки, такие как дуговая сварка, зачастую сопряжены с введением значительного количества тепла в зону соединения, что приводит к образованию обширной зоны термического влияния, структурной неоднородности, пористости и трещинообразованию. Лазерная сварка, особенно с использованием волоконных лазеров, позволяет существенно минимизировать эти недостатки, обеспечивая высокую концентрацию энергии, малую зону термического влияния и высокую производительность. Однако управление процессами структурообразования в металле шва для достижения оптимального комплекса механических свойств остается актуальной научной и практической проблемой.

В этой связи тема диссертационной работы Нюхляева О.А., направленная на целенаправленное управление микроструктурой и свойствами сварных соединений трубных сталей с помощью комбинированного лазерно-акустического воздействия, представляется актуальной и соответствующей современным тенденциям развития аддитивных и гибридных технологий в материаловедении.

Актуальность темы обусловлена следующими факторами:

1. Потребностью в ресурсосберегающих технологиях в нефтегазовой и энергетической отраслях, где широко используются бывшие в употреблении (БУ) насосно-компрессорные трубы (НКТ). Их ремонт и восстановление с использованием методов сварки требует обеспечения высокой надежности,

герметичности и долговечности соединений, работающих в условиях экстремальных нагрузок и агрессивных сред.

2. Необходимостью преодоления принципиальных недостатков традиционных методов сварки, таких как высокая погонная энергия, обширная зона термического влияния, формирование крупнозернистой структуры, склонность к образованию горячих и холодных трещин, снижение ударной вязкости.

3. Перспективностью использования высококонцентрированных источников энергии, в частности, волоконных лазеров, для повышения производительности, локализации зоны нагрева и минимизации термических деформаций.

4. Научным и практическим интересом к синергетическим эффектам при комбинировании различных физических полей (лазерного излучения и ультразвуковых колебаний) для целенаправленного воздействия на процессы в сварочной ванне (конвекцию, кристаллизацию, дегазацию), что открывает путь к активному управлению микроструктурой и свойствами сварного соединения.

Таким образом, исследование Нюхляева О.А. направлено на решение актуальной задачи создания высокоэффективной технологии сварки ответственных трубных конструкций с заданным комплексом механических и эксплуатационных свойств.

2. Анализ структуры и содержания диссертации

Во введении представлено развернутое обоснование актуальности выбранной тематики, которая продиктована запросами нефтегазового комплекса в рентабельных и высокопроизводительных способах восстановления целостности насосно-компрессорных труб, включая изделия, выработавшие нормативный ресурс. Проведен критический разбор существующих методов сварки трубных марок стали, продемонстрированы их системные ограничения, не позволяющие целенаправленно влиять на формирование микроструктуры в зоне соединения. Четко обозначена цель научной работы – улучшение прочностных и пластических параметров сварных стыков конструкционных сталей путем регулирования структурных составляющих за счет комплексного применения лазерного нагрева и ультразвукового поля варьируемой частоты. Сформулированы четыре исследовательских задачи, охватывающих выявление закономерностей структурных преобразований, изучение влияния различных частотных режимов УЗК на качество сварных соединений сталей 12Х18Н10Т и 09Г2С, а также разработку применимой в промышленности технологической схемы лазерно-акустической сварки трубных элементов. Определены компоненты

научной новизны, обозначена теоретическая база и прикладная ценность выполненной работы, вынесены на защиту семь основных положений.

Первая глава содержит масштабный аналитический обзор научно-технических публикаций, включающий 146 наименований отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам получения неразъемных соединений конструкционных сталей. Подробно разобраны особенности структурообразования и эксплуатационных характеристик сварных стыков, выполненных электродуговым, газовым, контактным способами, а также под флюсом и лазерной сваркой с концентрированным подводом энергии. Систематизированы и обобщены основные недостатки традиционных сварочных технологий применительно к трубам: повышенное тепловложение, приводящее к размягчению металла в околошовной зоне, возникновение грубой литой структуры с крупными зернами, существенная химическая неоднородность вследствие ликвации легирующих компонентов, высокая вероятность образования трещин различного генезиса. Доказано, что лазерная сварка благодаря высоким показателям плотности мощности, локализации теплового воздействия и незначительному суммарному тепловложению позволяет минимизировать отмеченные негативные явления, гарантируя минимальную протяженность ЗТВ, высокую скорость выполнения работ и возможность стыковки без предварительной разделки кромок. Аргументирован выбор волоконных лазеров на иттербиевой основе как оптимальных источников для сварки трубных сталей, что обусловлено их высоким коэффициентом полезного действия, возможностью транспортировки излучения по оптоволоконным линиям и превосходными фокусирующими свойствами.

Вторая глава характеризуется тщательным и всесторонним описанием используемых объектов, материалов, приборной базы и экспериментальных подходов, что однозначно свидетельствует о высокой культуре постановки и ведения исследовательского процесса. В качестве ключевых объектов исследования фигурировали: холоднокатаные листы аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T толщиной 3 мм, применявшиеся для выявления фундаментальных зависимостей влияния частоты УЗК на структурные изменения; отработавшие нормативный срок насосно-компрессорные трубы категории прочности «Д» из низколегированной стали 09Г2С с толщиной стенки от 4,5 до 5,0 мм, позиционируемые как условно свариваемые и представляющие значительный практический интерес; присадочным компонентом служила сварочная проволока марки 09Г2С диаметра 1,2 мм. Экспериментальный комплекс базировался на роботизированной платформе с манипулятором KUKA KR 120 R2700 extra NA, оснащенной сварочной оптической головкой KUGLER со встроенным

сканатором для динамического отклонения луча. Генерация лазерного излучения осуществлялась иттербиевым волоконным лазером серии ЛС с выходной мощностью до 30 кВт и рабочей длиной волны 1064–1070 нм. Технологический комплекс дополнялся механизмом подачи проволоки Fronius и газоподготовительным модулем WITT KM 20-3. Для генерации акустических и ультразвуковых полей задействовались установки U-Sonic со сменными волноводами, возбуждающими колебания с частотами 15 (звуковой режим), 22, 40, 80 и 100 кГц при фиксированной мощности 1,5 кВт.

Третья глава аккумулирует обширный экспериментальный материал, полученный при планомерном изучении влияния акустических и ультразвуковых полей различной частоты на процесс формирования сварных стыков аустенитной хромоникелевой стали 12X18H10T. Экспериментально доказано, что частота приложенного колебательного воздействия выступает ключевым фактором, кардинальным образом трансформирующим геометрические параметры шва, его микроструктуру, фазовый состав, степень химической гомогенности и совокупность механических свойств получаемых соединений. Продемонстрировано, что введение в зону сварки колебаний с частотой 15 кГц (звуковая область) провоцирует развитие интенсивного сонокапиллярного эффекта, следствием чего становится активное выталкивание жидкой фазы из сварочной ванны: высота усиления шва со стороны верхнего и нижнего валиков возрастает до 1000 мкм, что втрое превышает аналогичный параметр при сварке без ультразвука. При этом наблюдается образование отчетливой слоистой микроструктуры, представленной чередующимися светлыми аустенитными прослойками и темными участками смеси феррита с промежуточными фазами, ширина полос варьируется в интервале 50–100 мкм. Ширина сварного шва при 15 кГц достигает минимальных значений. Микроструктурные исследования зафиксировали, что в отсутствие ультразвукового поля в объеме шва возникают крупные вытянутые кристаллы δ -феррита, ориентированные вдоль направления отвода тепла, размеры которых достигают 50 мкм. Применение ультразвуковых колебаний с частотами 22 и 40 кГц сопровождается эффективным дроблением пластин δ -феррита, их размер уменьшается до 5–10 мкм, что в 5–10 раз меньше исходного. Наибольшая степень диспергирования и гомогенизации структуры фиксируется при частоте 80 кГц, где формируется тонкодисперсный феррит, распределенный в аустенитной матрице. Увеличение частоты до 100 кГц обеспечивает максимальную структурную однородность, при этом выраженные границы между различными зонами практически не визуализируются.

В четвертой главе изложена разработанная экспериментально обоснованная и адаптированная к промышленным условиям технологическая

схема лазерно-акустической сварки насосно-компрессорных труб, исчерпавших установленный ресурс, выполненных из стали 09Г2С, ориентированная на предприятия нефтегазового профиля. Детально охарактеризована оригинальная конструкция сборочно-стыковочного приспособления, включающего систему конусных центрирующих элементов, прижимных шайб и резьбовых фиксаторов, гарантирующих прецизионную соосность и равномерное поджатие торцов свариваемых труб по всему периметру. Проведена планомерная оптимизация сварочных режимов на репрезентативных образцах — линейных сегментах труб, подвергнутых предварительной механообработке и обезжириванию. Варьированию подвергались основные управляющие параметры: мощность лазерного излучения, скорость относительного перемещения источника, величина расфокусировки пятна, объемный расход защитной газовой смеси, темп подачи присадочной проволоки. В результате определены оптимальные технологические окна: расфокусировка в границах $0 < \Delta f < 10$ и $-10 < \Delta f < 0$, мощность лазера 10 кВт, при которых достигается воспроизводимое проплавление стенки толщиной 5 мм при ширине ванны расплава порядка 4 мм.

Заключение аккумулирует четыре развернутых итоговых положения, всесторонне отражающих суть выполненных исследований и полностью коррелирующих с заявленными целью и задачами. В первом итоговом положении аргументировано, что применение ультразвуковых колебаний оптимальной частоты 80 кГц и мощностью 1,5 кВт при лазерной сварке стали марки 12Х18Н10Т гарантирует формирование сварного стыка с однородной микроструктурой и равномерным распределением химических компонентов по всему поперечному сечению, абсолютным отсутствием пор и трещин любого генезиса, а также приростом предела прочности при изгибе в 1,2 раза, что непосредственно обусловлено диспергированием выделений δ -феррита и нитридов титана. Второе итоговое положение фиксирует, что ультразвуковая обработка частотой 22 кГц при сварке стали 09Г2С, ориентированная коллинеарно поверхности, обеспечивает сокращение ширины сварочной ванны в 1,3 раза и интенсификацию проплавления в 1,5 раза, а в режиме лазерной наплавки присадочной проволоки 09Г2С способствует росту предела прочности и пластичности в 1,5 раза вследствие трехкратного уменьшения размера зерна и снижения пористости в 3–5 раз. Третье итоговое положение констатирует, что в интервалах расфокусировки $0 < \Delta f < 10$ и $-10 < \Delta f < 0$, при мощности излучения 10 кВт и длине волны 1064 нм реализуется устойчивое проплавление свариваемых кромок стали 09Г2С на глубину до 5 мм при ширине шва 4 мм, причем прочность двухпроходного сварного соединения достигает 96% от прочности исходного трубного металла. Четвертое итоговое

положение свидетельствует, что задействование импульсного режима сварки с пиковой мощностью импульса 10 кВт, продолжительностью 30 мс и темпом подачи проволоки 2,2 мм/с в комбинации с ультразвуковыми колебаниями частотой 22 кГц обеспечивает полную элиминацию пустот, газовых пор и сквозного канала, локализованных в стартовой области сварного шва стали 09Г2С. Сформулированные выводы опираются на репрезентативный экспериментальный базис, логически проистекают из содержания глав и подкреплены официальными актами о внедрении результатов в производственную деятельность компании ООО «ТЕХНОФОРДЖ» и в образовательный процесс кафедры лазерных и аддитивных технологий КНИТУ-КАИ.

3. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются научно обоснованными. Они базируются на глубоком анализе современной научной литературы, результатах комплексных экспериментальных исследований с применением современного оборудования (волоконный лазер, роботизированный комплекс, ультразвуковые установки, металлографические микроскопы, рентгеновский томограф, машины для механических испытаний) и корректной статистической обработке данных. Полученные результаты хорошо согласуются с фундаментальными закономерностями металловедения и физики сварочных процессов.

Обоснованность и достоверность подтверждаются:

Методологией исследований: использован полный цикл от анализа исходного состояния материалов (химический состав, геометрия, твердость) до комплексной оценки свойств готовых соединений (металлография, рентгеновская томография, механические испытания, ресурсные испытания на герметичность).

Статистической значимостью: режимы сварки отрабатывались на плоских образцах, эксперименты с ультразвуком повторялись для проверки воспроизводимости. Представлены графики допустимых режимов сварки и количественные данные по твердости, прочности (с указанием средних значений и разброса).

Применением современных средств контроля: использование промышленного 3D-томографа NSI X5000 для детектирования внутренних дефектов (пор, трещин), электронной микроскопии для анализа микроструктуры и элементного состава, универсальной испытательной машины Instron.

Сопоставлением с практическими результатами: проведенные испытания на герметичность сваренных труб под давлением до 700 атм и их успешная опытная эксплуатация в скважинах являются убедительным доказательством эффективности разработанной технологии.

Выводы работы логично вытекают из представленных результатов и являются корректными.

4. Достоверность и научная новизна диссертационной работы

Положения, выводы и результаты диссертационной работы Нюхляева О.А. являются новыми, достоверными и подтвержденными экспериментально.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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 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).

5. Значимость результатов диссертации для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в установлении фундаментальных связей между параметрами лазерно-акустического

воздействия (мощность, частота), кинетикой процессов кристаллизации в сварочной ванне и формирующейся микроструктурой и свойствами сварных соединений. Полученные результаты вносят существенный вклад в теорию управления структурообразованием при сварке концентрированными потоками энергии.

Практическая значимость исследования подтверждена внедрением разработанной технологии в ООО «ТЕХНОФОРДЖ» для ремонта и стыковки насосно-компрессорных труб. Результаты работы использованы при создании программ для ЭВМ, управляющих процессами лазерно-акустической сварки, и внедрены в учебный процесс КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. Разработанная технология позволяет повысить надежность и долговечность сварных соединений, работающих под высоким давлением.

6. Оценка содержания диссертации, степень ее завершенности в целом и качество оформления

Диссертационная работа Нюхляева О.А. представляет собой законченное научное исследование, в котором решена значительная научно-практическая задача. Содержание работы логически выстроено, все разделы взаимосвязаны. Диссертация и автореферат оформлены в полном соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научных изданиях

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.

8. 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.

9. Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы, ее основные идеи, выводы и положения, выносимые на защиту.

10. Замечания и критический анализ содержания работы:

1. Каковы предполагаемые физико-химические причины неожиданного образования бейнита в высоколегированной аустенитной стали 12X18H10T под действием ультразвука, поскольку при обычной лазерной сварке такой структуры не возникает?

2. Желательно уточнить все ключевые режимы лазерной сварки (мощность, скорость, диаметр пятна, шаг) и параметры ультразвукового воздействия (амплитуда, время) для каждого эксперимента?

3. Не указана конкретная модель и тип лазера, использованного в исследовании, а также его основные технические характеристики (максимальная мощность, длина волны).

4. Для какого именно материала (сплава) и условий приведена микрофотография «наплавленного металла» на рисунке 1, стр. 9 автореферата, и чем (проволокой, порошком) осуществлялась сама наплавка?

5. Какая конкретная марка стали использовалась для бывших в употреблении насосно-компрессорных труб (БУ НКТ), упомянутых на стр. 11 автореферата, и подтвержден ли ее химический состав?

6. Как согласуется утверждение об «однородной структуре» шва в стали 12X18H10T с одновременным наличием в нем δ -феррита и нитридов титана, которые по своей природе являются неоднородностями?

7. Каков предполагаемый источник азота для образования нитридов титана в сварном шве, если сварка проводилась в контролируемой среде защитных газов?

11. Заключение

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа **Нюхляева Олега Александровича** является завершенным квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном и методическом уровне.

Полученные результаты обладают значительной научной новизной и практической ценностью. **Нюхляев Олег Александрович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Диссертационная работа Нюхляева Олега Александровича «Управление микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013).

Я, Вологжанина Светлана Антониновна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Профессор кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий», доктор технических наук, доцент

/Вологжанина Светлана Антониновна/ 13.02.2026

Вологжанина Светлана Антониновна, доктор технических наук, профессор, специальность (05.02.01. Материаловедение (машиностроение)), профессор кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21 линия д. 2, тел.: +7(812) 382-01-28, e-mail: rectorat@spmi.ru



С.А. Вологжаниной
Директор
Управления делопроизводства
и контроля документооборота

Е.Р. Яковлева
13 ФЕВ 2026

Вход. № 05-2836
« 20 » 02 20 26 г.
подпись