

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 Прияткина Дмитрия Вячеславовича на
диссертационную работу Нюхляева Олега Александровича «Управление
микроструктурой конструкционных трубных сталей в зоне лазерной сварки»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.17. Материаловедение.

Диссертационная работа О.А. Нюхляева посвящена решению важной
научно-практической задачи – разработке технологии лазерно-акустической
сварки конструкционных трубных сталей с целью управления
микроструктурой и повышения механических свойств сварных соединений.
Исследование направлено на совершенствование методов соединения
ответственных конструкций, таких как насосно-компрессорные трубы для
нефтяной промышленности, и обладает высокой актуальностью.

Актуальность темы диссертации

Развитие критических отраслей промышленности, таких как
нефтегазовый комплекс, атомная энергетика и авиастроение, требует
постоянного совершенствования технологий создания неразъёмных
соединений с гарантированным ресурсом и надёжностью. Сварные
соединения трубопроводов, работающие под высоким давлением и в
агрессивных средах, являются наиболее уязвимыми элементами конструкций.
Несмотря на высокую степень распространенности, классические методы
сварки (электродуговая, газовая и т.д.) характеризуются целым рядом
существенных недостатков, к которым можно отнести большую
протяженность зоны термического влияния, значительные остаточные
напряжения и деформации, химическую и структурную неоднородность
металла шва. Эти факторы напрямую влияют на срок службы и безопасность
эксплуатации опасных технических объектов.

Лазерная сварка, характеризующаяся высокой плотностью мощности,
локальностью воздействия и возможностью глубокого проплавления, является
логичной альтернативой классическим способам. Однако эффективность её
применения для ответственных сталей зачастую ограничена из-за
нестабильности процесса (пористость, разбрызгивание) и формирования

неоптимальных структур, например, крупных столбчатых кристаллов, грубых выделений интерметаллидных фаз, образованием крупных пластинок δ -феррита в сталях аустенитного класса.

Таким образом, поиск методов, позволяющих осуществлять активное управления процессами кристаллизации и структурообразования при лазерной сварке является актуальнейшей научно-технической задачей.

Тема диссертационного исследования является своевременной, соответствует мировым тенденциям развития аддитивных и гибридных технологий и имеет важное значение для отечественной промышленности.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем комплексе полученных результатов:

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).

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в создании и внедрении технологии, позволяющей восстанавливать и соединять отбракованные насосно-компрессорные трубы, что имеет существенное экономическое

значение для нефтяной промышленности. Разработанные технологические схемы сварки труб НКТ и программы для ЭВМ внедрены в ООО «Технофордж», и также используются в учебном процессе КНИТУ-КАИ, что подтверждается соответствующими документами.

Анализ содержания диссертации

Диссертация объемом 132 страницы включает введение, четыре главы, список литературы из 146 источников, содержит 70 рисунков и 15 таблиц. Работа логически стройна, все разделы взаимосвязаны.

Во введении диссертационной работы Нюхляевым О.А. обоснована актуальность темы, определяемая необходимостью создания надежных и долговечных сварных соединений трубных сталей для нефтегазовой отрасли. Выполнен анализ современного состояния проблемы сварки насосно-компрессорных труб, показаны ограничения традиционных методов, не позволяющих в полной мере управлять микроструктурой металла шва. Сформулирована цель работы – повышение прочностных и пластических характеристик сварных соединений за счет комбинированного воздействия лазерного излучения и ультразвуковых колебаний. Поставлены четыре конкретные исследовательские задачи, охватывающие изучение закономерностей формирования структуры, установление влияния частоты УЗК на свойства сварных швов сталей 12Х18Н10Т и 09Г2С, а также разработку технологической схемы лазерно-акустической сварки труб. Определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов, структуре и объеме диссертации, личном вкладе автора.

В первой главе проведен аналитический обзор научно-технической литературы, включающий 146 источников отечественных и зарубежных авторов. Детально рассмотрены особенности формирования сварных соединений при использовании электродуговой, газовой, контактной сварки, сварки под флюсом и лазерной сварки. Выявлены принципиальные недостатки классических методов: повышенное тепловложение, обширная зона термического влияния, формирование крупнозернистой структуры, склонность к образованию горячих и холодных трещин, а также высокая химическая неоднородность металла шва. Показано, что лазерная сварка благодаря высокой плотности мощности и локальности нагрева позволяет минимизировать указанные недостатки, обеспечивая узкую ЗТВ и высокую производительность. Обоснован выбор иттербиевых волоконных лазеров как наиболее эффективных источников излучения для сварки трубных сталей.

Во второй главе подробно описаны объекты исследования, в качестве которых выбраны листы из коррозионно-стойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм и бывшие в употреблении насосно-компрессорные трубы группы прочности «Д» из стали 09Г2С с толщиной стенки 4,5–5,0 мм. В качестве присадочного материала использована сварочная проволока Св-

09Г2С диаметром 1,2 мм. 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 фирмы U-Sonic с комплектом сменных волноводов, обеспечивающих частоты 15, 22, 40, 80 и 100 кГц при мощности 1,5 кВт.

В третьей главе представлены комплексные результаты исследований влияния ультразвуковых колебаний различных частот на формирование сварных швов стали 12Х18Н10Т. Установлено, что частота акустического воздействия является определяющим фактором, влияющим на геометрию шва, микроструктуру, химическую однородность и механические свойства соединений. Показано, что на частоте 15 кГц наблюдается ярко выраженный сонокапиллярный эффект, приводящий к вытеснению металла из сварочной ванны: высота выпуклости шва достигает 1000 мкм, что в три раза превышает соответствующие значения при сварке без УЗК. При этом формируется полосчатая структура с чередованием светлых (аустенит) и темных (феррит+бейнит) областей шириной 50–100 мкм.

В четвертой главе представлена разработанная технологическая схема лазерно-акустической сварки бывших в употреблении насосно-компрессорных труб из стали 09Г2С. Подробно описана конструкция сборочно-сварочного приспособления, обеспечивающего точную стыковку труб и их фиксацию в процессе сварки. Проведена отработка режимов сварки на линейных сегментах труб, в ходе которой варьировались мощность лазерного излучения, скорость сварки, положение фокуса, расход защитного газа и скорость подачи присадочной проволоки. Установлены оптимальные параметры: диапазон расфокусировки $0 < \Delta f < 10$ и $-10 < \Delta f < 0$, мощность 10 кВт, обеспечивающие проплавление толщиной 5 мм при ширине сварочной ванны 4 мм.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы, полностью соответствующие поставленным цели и задачам. Первый вывод констатирует, что введение ультразвуковых колебаний с частотой 80 кГц и мощностью 1,5 кВт при лазерной сварке стали 12Х18Н10Т позволяет получить шов с однородной структурой и химическим составом, без дефектов типа пор и трещин, с увеличением предела прочности при изгибе в 1,2 раза за счет фрагментации δ -феррита и нитридов титана. Второй вывод отражает, что воздействие УЗК с частотой 22 кГц при сварке стали 09Г2С сужает сварочную ванну в 1,3 раза и увеличивает глубину проплавления в 1,5 раза, а при лазерной наплавке повышает предел прочности и пластичности в 1,5 раза вследствие снижения размера зерен в 3 раза и пористости в 3–5 раз. Третий вывод устанавливает оптимальные параметры фокусировки и мощности для сварки стали 09Г2С, обеспечивающие проплавление 5 мм при ширине шва 4 мм, при этом прочность сварного соединения составляет 96% от прочности основного металла. Четвертый вывод демонстрирует, что импульсный режим сварки

мощностью 10 кВт и длительностью 30 мс в сочетании с УЗК 22 кГц устраняет пустоты, поры и сквозной канал в месте начала шва. Выводы имеют четкое практическое обоснование и подтверждены внедрением результатов в производство.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

1. Проведением комплексных экспериментальных исследований с использованием современного оборудования (металлография, механические испытания, 3D-томография).

2. Статистической значимостью полученных данных.

3. Верификацией технологии в промышленных условиях (испытания на герметичность под высоким давлением, успешная эксплуатация в скважинах).

4. Соответствием полученных данных известным физическим представлениям.

Публикации и апробация

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 конференций различного уровня.

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы.

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.

Замечания и критический анализ содержания работы:

1. В работе убедительно показано положительное влияние УЗ-воздействия на структуру и свойства сварных швов. Однако, хотелось бы видеть более глубокое раскрытие физико-химических механизмов, лежащих в основе наблюдаемых эффектов (например, влияние акустических колебаний на ликвационные процессы, кинетику зарождения и роста зерен, фрагментацию δ -феррита), что позволило бы более четко отразить в формулировке научной новизны связь между формирующейся структурой металла шва и параметрами УЗ-воздействия при лазерной сварке.

2. На стр. 43 и в табл. 2.1 химсостав не соответствует стали 09Г2С (особенно по углероду), на стр. 73 состав приведен без указания содержания углерода, в табл. 4.4 указаны недостижимые для данной стали значения твердости.

3. В главе 1 (рис. 1.3, 1.4) некорректно используется термин «электрод» вместо «присадочный материал». Отсутствует схема подвода УЗ-колебаний к трубам (в отличие от пластин на рис. 2.2). Неясно, на каком этапе двухпроходной сварки применялось УЗ-воздействие.

4. Неизвестно, поддерживалась ли постоянная амплитуда при смене частот (15-100 кГц) и чем обоснован выбор мощности 1,5 кВт. Требуется объяснение различного влияния частот: почему для стали 09Г2С эффективна частота 22 кГц (увеличение глубины проплавления), а для 12Х18Н10Т — 80 кГц.

5. Отсутствуют количественные данные по изменению размеров зерен и пористости. Идентификация фаз (например, бейнита) без применения соответствующих методов некорректна. Выводы о пористости при 80 кГц противоречивы (стр. 60, 63). Масштаб пор на рис. 3.11 не соответствует описанию.

6. Представленные изображения сварных швов свидетельствуют о неоптимальных режимах сварки, что ставит под сомнение корректность сравнения результатов.

7. Отсутствуют испытания на ударную вязкость — критически важный показатель для трубных конструкций в нефтегазовой отрасли.

Указанные замечания носят частный характер, не снижают общей положительной характеристики работы, её научной и практической ценности, достоверности ее положений и выводов, а также научной новизны.

Заключение

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа **Нюхляева Олега Александровича** является **завершенным** квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном и методическом уровне. Автореферат полно отражает содержание диссертации. 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, **Прияткин Дмитрий Вячеславович**, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

/Прияткин Дмитрий Вячеславович/ 19.02.2026

Прияткин Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, научная специальность 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», 400005, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, д. 28.,
Тел. +7 (8442) 24-81-15
E-mail: priyatkin.dv@mail.ru



Вход. № 05-8835
« 20 » 02 20 26 г.
подпись *Ряев*