

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ.9
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 30.06.2026 № 9

О присуждении Хузнахметову Руслану Маратовичу, гражданину Кыргызской Республики, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Влияние режима лазерной обработки на фазовые превращения в поверхностном слое материалов нефтегазового оборудования» по специальности 2.6.17. Материаловедение принята к защите 27.04.2026, протокол заседания №4, диссертационным советом ГУ.9 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Санкт-Петербургского горного университета о создании диссертационного совета от 10.03.2023 № 312 адм, с изменениями от 13.07.2023 № 1090 адм, от 05.09.2023 № 1227 адм, от 29.07.2024 № 1207 адм, от 03.06.2025 № 673 адм, от 12.09.2025 № 1121 адм.

Соискатель, Хузнахметов Руслан Маратович, 19 января 1999 года рождения, в 2022 году с отличием окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения.

С 1 октября 2022 года по настоящее время является аспирантом очной формы обучения кафедры материаловедения и технологии художественных изделий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре материаловедения и технологии художественных изделий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент **Вологжанина Светлана Антониновна**, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-

Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра материаловедения и технологии художественных изделий, профессор.

Официальные оппоненты:

Горунов Андрей Игоревич – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», научно-образовательный центр «Конструкционные и функциональные материалы», профессор;

Бобкова Татьяна Игоревна – кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», дирекция, ученый секретарь института; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»**, г. Тюмень, в своем положительном отзыве, подписанном Плехановым Владимиром Ивановичем, кандидатом технических наук, заведующим кафедрой материаловедения и технологии конструкционных материалов, Вилковой Татьяной Ефимовной, кандидатом технических наук, специалистом I категории той же кафедры, утвержденном Тверяковым Андреем Михайловичем, кандидатом технических наук, доцентом, проректором по образовательной деятельности, указала, что в диссертации Хузнахметова Руслана Маратовича разработаны научно-технологические решения по формированию выпуклой рельефной маркировки на поверхности стали 12X18H10T в режиме управляемого перераспределения расплава при незначительной абляции. Установлены закономерности влияния параметров импульсной наносекундной лазерной обработки и стратегии сканирования на геометрические характеристики рельефа; доказана возможность сохранения аустенитной структуры и предотвращения образования карбидов Cr_{23}C_6 , σ -фазы и δ -феррита при выбранных режимах. Практическая значимость подтверждена результатами электрохимических исследований, испытаний в камере соляного тумана и на абразивное изнашивание, показавшими сохранение коррозионной стойкости и читаемости маркировки.

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ, в том числе 2 статьи – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы

основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 3 статьи – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Общий объем – 3,56 печатных листа, в том числе 2,63 печатных листа – соискателя.

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Шахназаров, К. Ю. Объяснение аномалий формирования структуры и физико-механических свойств сталей и сплавов / К. Ю. Шахназаров, С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов // Информационно-технологический вестник. – 2023. – № 1(35). – С. 196–209. (№ 1294 Перечня ВАК, ред. 07.03.2023).

Соискателем проведен анализ взаимосвязи диаграмм фазового равновесия и аномалий физико-механических свойств сталей и сплавов, что позволило использовать критерий качественного изменения интервала кристаллизации для интерпретации структурных превращений. На примере железоуглеродистых и железохромистых систем соискателем показано, что особенности свойств могут быть связаны с наличием промежуточных фаз и характером фазовых превращений, протекающих при тепловом воздействии. Полученные положения имеют методическое значение для объяснения поведения сталей при локальном нагреве и охлаждении, в том числе при интенсивном кратковременном лазерном воздействии. Соискателем обоснована возможность использования выявленных закономерностей для интерпретации изменений структуры и свойств в поверхностном слое материалов после термического и лазерного воздействия. Данная работа формирует теоретическую основу для понимания фазовых превращений, исследуемых в диссертации применительно к аустенитным сталям.

2. Полирование поверхности изделий из латуни импульсным инфракрасным волоконным лазером / С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов, К. Ю. Шахназаров, Д. В. Амяга, А. Рамос-Веласкес // Дизайн. Материалы. Технологии. – 2024. – № 4(76). – С. 194–201. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_4(76)_194_201. (№ 1135 Перечня ВАК, ред. 09.12.2024).

Соискателем проведены экспериментальные исследования по подбору режимов лазерной обработки, обеспечивающих полирование металлической

поверхности без разрушения исходного рельефа. Установлено, что при обработке латуни и нержавеющей стали маломощным импульсным инфракрасным волоконным лазером наблюдаются различные условия перехода от необрабатываемого состояния к устойчивому подплавлению поверхности, что связано с особенностями поглощения излучения и формирования оксидной пленки. Соискателем разработана многостадийная схема обработки, включающая предварительное окисление, предварительное и финишное полирование, что позволило обеспечить снижение шероховатости поверхности при сохранении геометрии микрорельефа. Полученные результаты имеют практическое значение для задач управляемой лазерной модификации поверхностного слоя и показывают, что даже при использовании маломощных лазерных источников возможно целенаправленное изменение состояния поверхности за счет контролируемого подплавления. Данная работа дополняет диссертационные исследования в части понимания механизмов перераспределения материала и изменения качества поверхности при лазерной обработке металлов.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Влияние условий эксплуатации на формирование нано- и ультрадисперсных зернограницных дефектов в сварных соединениях / Б. С. Ермаков, С. Б. Ермаков, С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов // Цветные металлы. – 2023. – № 8. – С. 80–85. – DOI 10.17580/tsm.2023.08.13.

Соискателем выполнен анализ влияния эксплуатационных и тепловых факторов на структурное состояние сварных соединений хромоникелевых аустенитных сталей, применяемых в низкотемпературном и криогенном оборудовании. Обобщены и интерпретированы данные о роли высокотемпературных нагревов, остаточных сварочных напряжений и локальной пластической деформации в формировании нано- и ультрадисперсных зернограницных дефектов, способствующих развитию межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания. Соискателем показано, что зоны термического влияния, прилегающие к линии сплавления, являются наиболее чувствительными к структурной деградации и локальному снижению коррозионной стойкости. Полученные результаты использованы для обоснования необходимости контроля термического воздействия на аустенитные стали при локальной обработке поверхности, в том числе при лазерном воздействии, что непосредственно связано с тематикой диссертации и задачей предотвращения образования неблагоприятных структурных состояний в поверхностном слое.

4. The peculiarities of ablation and deposition of brass by nanosecond laser pulses at the LIBT-scheme / A. Ramos-Velazquez, J. Amiaga, V. Veiko, R. Khuznakhmetov, D. Polyakov // Optics & Laser Technology. – 2025. – Vol. 181. – P. 112006. – DOI 10.1016/j.optlastec.2024.112006.

Особенности абляции и осаждения латуни наносекундными лазерными импульсами по LIBT-схеме / А. Рамос-Веласкес, Д. В. Амяга, В. Вейко, Р. М. Хузнахметов, Д. Поляков // Optics & Laser Technology. – 2025. – Т. 181. – С. 112006. – DOI 10.1016/j.optlastec.2024.112006.

Соискателем проведены экспериментальные исследования особенностей взаимодействия наносекундного лазерного излучения с металлическим материалом в условиях абляции, переотложения и переноса вещества. Определены закономерности влияния энергии импульса, режима многократного сканирования и скорости перемещения луча на количество удаленного и осажденного материала, а также на морфологию образующихся структур. Соискателем выполнен анализ пороговых условий абляции и установлена связь между режимами обработки и характером перераспределения материала в зоне воздействия. Полученные результаты имеют существенное значение для понимания граничных условий перехода между плавлением и испарением металла при наносекундной лазерной обработке. Эти данные легли в основу интерпретации процессов, происходящих при формировании рельефа на поверхности металлов, и потому непосредственно связаны с диссертационной задачей управления состоянием поверхностного слоя при лазерном воздействии.

5. Influence of laser exposure on the processes occurring in a surface layer of austenitic steel products / S. A. Vologzhanina, R. M. Khuznakhmetov, J. V. Amyaga, E. Yu. Zhdanova, A. Ramos-Velazquez // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 30. – P. 52–58. – DOI 10.17580/cisirs.2025.02.09.

Влияние лазерного воздействия на процессы, протекающие в поверхностном слое изделий из аустенитной стали / С.А. Вологжанина, Р.М. Хузнахметов, Д.В. Амяга, Е.Ю. Жданова, А. Рамос-Веласкес // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Т. 30. – С. 52–58. – DOI 10.17580/cisirs.2025.02.09.

Соискателем выполнен основной комплекс экспериментальных исследований по формированию выпуклого рельефа на поверхности аустенитной стали 12Х18Н10Т при воздействии наносекундного лазерного излучения. Экспериментально подобраны режимы обработки, обеспечивающие направленное перераспределение расплава и формирование линейного рельефа без перехода процесса в выраженный испарительный режим. Соискателем исследовано влияние параметров лазерной обработки на геометрические характеристики рельефа, микроструктуру

поверхностного слоя, содержание оксидной фазы и фазовый состав обработанной зоны. Показано, что в выбранном диапазоне режимов лазерное воздействие не приводит к образованию карбидных фаз, а сформированный рельеф характеризуется мелкозернистой и ультрамелкозернистой аустенитной структурой. Данный результат является одним из ключевых для темы диссертации, так как подтверждает возможность управления структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя аустенитной стали при лазерной обработке с сохранением требуемой аустенитной основы.

Публикации в прочих изданиях:

6. Амяга, Д. В. Возможности лазерной обработки при получении выпуклого рельефа на поверхности стальных изделий / Д. В. Амяга, С. А. Вологжанина, В. О. Волох, Р. М. Хузнахметов, А. Рамос-Веласкес, А. Ф. Иголкин // Перспективные машиностроительные технологии : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 499–505.

Соискателем проведен анализ возможностей применения импульсной лазерной обработки для получения выпуклого рельефа на поверхности стальных изделий без использования присадочного материала. Экспериментально выбраны траектории перемещения лазерного луча и режимы обработки, обеспечивающие управляемое перераспределение расплава и формирование устойчивых линейных и точечных рельефных элементов. Показано, что применение трохоидальной траектории позволяет получать линейный выпуклый рельеф, а спиральной — точечные элементы, пригодные в том числе для тактильной маркировки. Соискателем обоснована перспективность использования лазерной обработки для получения выпуклого рельефа на поверхности стальных изделий как альтернативы традиционным методам маркирования и локального формообразования. Данная работа заложила экспериментальную основу дальнейших исследований по управлению геометрией рельефа и состоянием поверхностного слоя при лазерном воздействии.

7. Вологжанина, С. А. Влияние наносекундного лазерного воздействия на процессы в поверхностном слое изделий из аустенитной стали 12Х18Н10Т / С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов, Т. С. Курилова, М. Р. Смирнова, А. Г. Янусова // Новые технологии и материалы, автоматизация производства (НТиМАП–2025) : сборник статей международной научно-технической конференции, Брест, 30 октября – 1 ноября 2025 года. – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 234–238.

Соискателем выполнен комплекс экспериментальных исследований процессов, протекающих в поверхностном слое аустенитной стали 12X18H10T при воздействии наносекундного лазерного излучения. Установлены особенности формирования рельефа за счет управляемого перемещения расплава в зоне обработки и выявлено влияние режимов лазерного воздействия на геометрические параметры рельефа и характер структурных изменений в поверхностном слое. Соискателем показано, что при выбранных режимах обработки возможно формирование выпуклого рельефа на поверхности аустенитной стали с сохранением аустенитной основы и без образования карбидных фаз, что является принципиально важным для обеспечения эксплуатационной надежности материала. Полученные результаты непосредственно связаны с темой диссертации и подтверждают возможность целенаправленного управления процессами, протекающими в поверхностном слое аустенитной стали при лазерной обработке.

8. Вологжанина, С. А. Влияние лазерного излучения на формирование рельефа и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя аустенитной стали 12X18H10T / С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов, Т. С. Курилова // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева : сборник статей. В 3 т., Тюмень, 20–22 ноября 2025 года. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2025. – С. 197–199.

Соискателем экспериментально исследовано влияние параметров лазерной обработки на формирование рельефа и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя аустенитной стали 12X18H10T. Установлено, что многопроходная обработка с чередованием формирующих и «чистящих» проходов позволяет получать выпуклый рельеф заданной конфигурации, а также снижать количество оксидной фазы на поверхности. Соискателем выявлено формирование в зоне рельефа мелкозернистой и ультрамелкозернистой аустенитной структуры, показано отсутствие карбидных фаз и подтверждена возможность сохранения благоприятного структурного состояния поверхностного слоя при локальном тепловом воздействии. На основании выполненных исследований сделан вывод о возможности управления не только геометрией рельефа, но и фазово-структурным состоянием поверхностного слоя аустенитной стали, что составляет одно из ключевых положений диссертационной работы.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных:

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624959 Российская Федерация. База данных теплофизических и

оптических параметров металлов для подбора режимов лазерной обработки. Заявка № 2024624795: заявл. 29.10.2024: опубл. 06.11.2024 / С. А. Вологжанина, Р. М. Хузнахметов, Б. С. Александрук; заявитель/правообладатель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Соискателем выполнены сбор, систематизация и структурирование справочных данных по теплофизическим и оптическим параметрам металлов, используемых при подборе режимов лазерной обработки. Сформирована база данных, включающая сведения, необходимые для оценки условий поглощения лазерного излучения, теплопереноса, плавления и испарения металлов при локальном высокоэнергетическом воздействии. Соискателем обоснован состав включенных параметров с точки зрения их практической значимости для выбора режимов лазерной обработки и интерпретации процессов, протекающих в поверхностном слое материалов. Разработанная база данных используется как инструмент для предварительного выбора и научного обоснования режимов лазерного воздействия, в том числе применительно к задачам формирования рельефа и управления структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя металлов. Полученный результат имеет непосредственную связь с темой диссертационного исследования и является существенным элементом ее методического обеспечения.

Апробация работы проведена на 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в следующих мероприятиях:

1. Всероссийская научная конференция с международным участием «Невская фотоника-2023» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.);
2. Международный симпозиум «Нанофизика и Наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.);
3. XVI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2023 г.);
4. Международный симпозиум «Нанофизика и Наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.);
5. Международная научно-техническая конференция «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (г. Брест, 2025 г.);
6. Международная научно-практическая конференция им. Д. И. Менделеева (г. Тюмень, 2025 г.).

В диссертации Хузнахметова Руслана Маратовича отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: доцента кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», д.т.н., доцента **О.С. Молочковой**; инженера-технолога ООО «Лазерный Центр», к.т.н. **Е.Ю. Ждановой**; профессора кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», д.т.н. **К.Ю. Нагулина**; ведущего научного сотрудника лаборатории физики прочности ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, к.ф.-м.н. **М.В. Нарыковой**; ведущего научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», к.т.н. **М.В. Голубевой**; профессора Учебно-научного центра системной инженерии Уральской передовой инженерной школы «Цифровое производство» УрФУ, д.т.н. **М.А. Филиппова**; профессора кафедры «Технология промышленной и художественной обработки материалов» ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», д.т.н., профессора **М.М. Черных**; профессора кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» ФГБОУ ВО «СамГТУ», д.т.н., профессора **В.С. Муратова**.

В отзывах дана положительная оценка диссертационного исследования, отмечены актуальность выбранной темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обоснованность и достоверность полученных результатов, однако отмечен ряд замечаний:

1. В положении 1 указано, что «формирование выпуклого рельефа ... реализуется при энергии импульса 0,225 мДж и степени перекрытия импульсов 99,58 %». Вместе с тем при лазерной обработке следует учитывать большее количество параметров (д.т.н. **О.С. Молочкова**);

2. В автореферате неоднократно подчеркивается, что аустенитная сталь применяется в широком температурном диапазоне, однако отсутствуют сведения о поведении стали после лазерной обработки при низких, в том числе криогенных, температурах (д.т.н. **О.С. Молочкова**);

3. В автореферате установлены параметры лазерной обработки, обеспечивающие формирование выпуклого рельефа при энергии импульса 0,225 мДж и степени перекрытия импульсов 99,58 %. Вместе с тем было бы полезно дополнительно уточнить, насколько чувствителен процесс к изменению фокусного положения, диаметра пятна и качества фокусировки лазерного излучения, поскольку данные параметры существенно влияют на

плотность энергии и повторяемость формирования рельефа (**к.т.н. Е.Ю. Жданова**);

4. Разработанные режимы получены для конкретного лазерного комплекса и определенных оптических характеристик системы. Было бы полезно дополнительно указать, какие параметры следует считать определяющими при переносе технологии на другое лазерное оборудование: энергию импульса, среднюю мощность, частоту следования импульсов, диаметр пятна, длительность импульса, скорость и степень перекрытия (**к.т.н. Е.Ю. Жданова**);

5. Было бы интересно более подробно раскрыть влияние «чистящих» или финишных проходов при лазерной обработке на соотношение между удалением или снижением оксидной фазы и дополнительным тепловым воздействием на сформированный рельеф (**д.т.н. К.Ю. Нагулин**);

6. В работе показана стойкость маркировки к абразивному износу по ASTM G65. Вместе с тем для практического применения было бы полезно дополнительно оценить сохранность маркировки после ударных, вибрационных или монтажных воздействий (**д.т.н. К.Ю. Нагулин**);

7. В работе выявлено присутствие оксидных фаз в зоне сформированного рельефа. Целесообразно дополнительно уточнить их роль: являются ли они преимущественно технологически неизбежным следствием обработки на воздухе или могут частично влиять на пассивное состояние поверхности (**д.т.н. К.Ю. Нагулин**);

8. На странице 15 указано, что «признаки мартенситных превращений также не выявлены». В то же время во введении упоминается, что при импульсном лазерном воздействии возможно образование ε -мартенсита. Учитывая высокие скорости охлаждения при лазерной обработке, следовало бы ожидать хотя бы локального образования деформационного или термического мартенсита. Какими методами, кроме рентгенофазового анализа, оценивалось отсутствие мартенсита? Не противоречат ли повышенные значения микротвердости локальному упрочнению, которое может быть связано в том числе с мартенситными превращениями (**к.ф.-м.н. М.В. Нарыкова**);

9. Поскольку технология ориентирована на изделия нефтегазового и криогенного назначения, представляло бы интерес в дальнейшем оценить особенности формирования рельефа не только на плоских образцах, но и на цилиндрических или криволинейных поверхностях, характерных для труб, сосудов и баллонов (**к.ф.-м.н. М.В. Нарыкова**);

10. В автореферате недостаточно подробно отражен вопрос подготовки поверхности перед лазерной обработкой. Между тем исходная шероховатость, наличие оксидной пленки или следов механической обработки могут влиять на поглощение лазерного излучения и стабильность формирования рельефа (**к.т.н. М.В. Голубева**);

11. На рисунке 5а приведено многослойное изображение наплавленного материала и при этом приводится суммарный EDS-спектр элементной карты. Следует ли из приведенного результата, что состав всех слоев одинаков (**к.т.н. М.В. Голубева**);

12. На рисунке 6 отсутствует нумерация измерений, поэтому неясно, к какому участку рельефа относится измерение № 5, свидетельствующее о явном разупрочнении стали (**к.т.н. М.В. Голубева**);

13. С учетом прикладной направленности работы представляло бы интерес проведение дальнейших испытаний сформированной маркировки в условиях температурного циклирования, характерного для эксплуатации криогенного оборудования (**к.т.н. М.В. Голубева**);

14. В автореферате на странице 15 ссылка на таблицу 2 дана для данных рентгеновской дифрактометрии, в то время как таблица 2 содержит данные по микротвердости. Этого бы не случилось, если бы таблицы и рисунки были оформлены по ГОСТ Р 7.0.11–2011, а не вынесены в конец автореферата, где отсутствует нумерация страниц (**д.т.н. М.А. Филиппов**);

15. В работе приведены результаты измерения микротвердости и исследования микроструктуры в зоне сформированного рельефа. Было бы логично исследовать микроструктуру именно там, где измеряли микротвердость, чтобы показать связь между локальным измельчением зерна, распределением микротвердости и различными участками рельефа (**д.т.н. М.А. Филиппов**);

16. В работе высказаны опасения, что по границам зерен могут выделяться потенциально неблагоприятные карбиды Cr_{23}C_6 . В таком случае возникает вопрос, проводились ли испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии (**д.т.н. М.А. Филиппов**);

17. В работе рассмотрено формирование выпуклого рельефа на стали 12X18H10T, стабилизированной титаном. Было бы полезно дополнительно пояснить, учитывалось ли влияние титансодержащих включений и выделений на структурно-фазовое состояние зоны лазерного воздействия после кратковременного переплава (**д.т.н. М.М. Черных**);

18. В работе подтверждена сохранность читаемости маркировки после абразивного изнашивания. В дальнейшем целесообразно дополнительно оценить изменение геометрии отдельных элементов рельефа

после поэтапного износа и связать эти данные с критериями визуальной или автоматизированной считываемости (д.т.н. М.М. Черных);

19. В автореферате не приводятся исходное структурно-фазовое состояние стали и режимы ее обработки до исследуемых воздействий, что затрудняет анализ полученных результатов (д.т.н. В.С. Муратов);

20. На странице 15 автореферата при ссылке на таблицу 2 указано, что в ней приведены «данные рентгеновской дифрактометрии», однако приводятся результаты измерения микротвердости. Также большинство номеров мест измерения микротвердости на рисунке 6 не идентифицируются (д.т.н. В.С. Муратов).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетентностью в области диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый научный подход к формированию долговечной выпуклой рельефной маркировки на поверхности аустенитной стали 12X18H10T посредством импульсной наносекундной ИК-лазерной обработки в режиме управляемого перераспределения расплава без применения присадочных материалов и защитной газовой среды;

предложены оригинальные суждения по обеспечению устойчивого формирования выпуклого рельефа без перехода к интенсивной абляции посредством выбора параметров лазерной обработки и стратегии сканирования, основанные на согласовании энергии одиночного импульса 0,225 мДж, степени перекрытия импульсов 99,58 %, длины и шага расположения векторов, а также количества циклов обработки;

доказана перспективность использования на практике выпуклого рельефа в качестве маркировки изделий из стали 12X18H10T с сохранением преимущественно аустенитной структуры без выделения карбидов $Cr_{23}C_6$, σ -фазы, δ -феррита и мартенситных превращений, с учётом проведённого комплекса структурно-фазовых исследований и эксплуатационных испытаний;

введено изменение трактовки старого понятия «технологическое окно наносекундной лазерной обработки», отличающееся управляемым процессом перераспределения жидкой фазы при незначительной абляции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений об изучаемом явлении и представляющие собой решение актуальной научно-

технической проблемы, в частности, формирование выпуклого рельефа на поверхности стали 12X18H10T достигается при лазерной обработке в режиме управляемого перераспределения расплава, реализуемом при энергии импульса 0,225 мДж и степени перекрытия импульсов 99,58 %; разработанные режимы лазерной обработки позволяют сохранить преимущественно аустенитную структуру, предотвратить выделение карбидов Cr_{23}C_6 по границам зёрен, образование σ -фазы и δ -феррита в зоне лазерного воздействия, что обеспечивает структурную стабильность и требуемые эксплуатационные свойства выпуклой рельефной маркировки;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использован комплекс методов математического планирования и статистической обработки эксперимента, оптической и электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгеновской дифрактометрии, измерения микротвердости, электрохимических и ускоренных коррозионных испытаний, а также испытаний на абразивное изнашивание;

изложена идея управления жидкой фазой за счет выбора траектории и последовательности формирующих и чистящих проходов, позволяющие получать выпуклый рельеф заданной конфигурации и одновременно ограничивать образование оксидной фазы;

раскрыто противоречие между традиционным методом наносекундной лазерной обработки как абляционного процесса и установленным механизмом формирования выпуклого рельефа за счет перераспределения жидкой фазы;

изучены причинно-следственные связи между длиной вектора сканирования, расстоянием между векторами, количеством циклов обработки и высотой выпуклого рельефа, а также между скоростью нагрева и охлаждения, измельчением зерна и фазовой стабильностью аустенитной стали;

проведена модернизация существующей математической модели за счёт установления взаимосвязи параметров лазерной обработки с геометрическими параметрами формируемого выпуклого рельефа на поверхности аустенитной стали 12X18H10T.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и приняты к внедрению в обществе с ограниченной ответственностью «Лазерный Центр» рекомендации по параметрам импульсной лазерной обработки коррозионностойкой стали 12X18H10T при

формировании маркировки деталей оборудования нефтегазового комплекса и изделий машиностроения;

определены пределы и перспективы практического использования режимов лазерной обработки для формирования выпуклого рельефа с сохранением преимущественно аустенитной структуры без образования нежелательных фаз;

создана система практических рекомендаций для предварительного выбора и научного обоснования режимов лазерной обработки на основе базы данных теплофизических и оптических параметров металлов;

представлены методические рекомендации по применению выпуклой рельефной маркировки на изделиях из стали 12X18H10T нефтегазового и криогенного назначения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с применением стандартизированных методов исследований, сертифицированного и поверенного оборудования, методов математического планирования эксперимента и статистической обработки данных;

теория построена на известных и проверяемых положениях тепломассопереноса, взаимодействия лазерного излучения с металлическими материалами, кристаллизации расплава и фазовых превращений в хромоникелевых аустенитных сталях;

идея базируется на анализе отечественного и зарубежного опыта лазерного формирования рельефа, лазерной маркировки и управления структурно-фазовым состоянием поверхностных слоев металлов;

использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее передовыми отечественными и зарубежными исследователями по рассматриваемой тематике;

установлено качественное совпадение авторских результатов с известными закономерностями влияния энергии импульса, степени перекрытия и скорости охлаждения на плавление, абляцию, измельчение зерна и образование оксидных фаз;

использованы современные методики измерений, сбора и статистической обработки данных, а также нормативно-техническая документация по исследованию структурно-фазового состояния, коррозионной стойкости и износостойкости материалов.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе отечественной и зарубежной научной литературы; выборе материала и диапазонов варьирования параметров лазерной обработки; планировании и непосредственном участии

в проведении экспериментов по формированию выпуклого рельефа; установлении зависимостей геометрических характеристик рельефа от длины вектора, расстояния между векторами и количества циклов обработки; подготовке образцов и анализе результатов структурно-фазовых исследований, измерений микротвердости, электрохимических, коррозионных и абразивных испытаний; интерпретации полученных данных, формулировании выводов, положений, выносимых на защиту, и практических рекомендаций; подготовке публикаций по теме диссертации.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Хузнахметов Руслан Маратович ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию научной, теоретической и практической значимости полученных результатов диссертации.

На заседании 30.06.2026 диссертационный совет принял решение присудить **Хузнахметову Руслану Маратовичу** ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи по установлению закономерностей влияния параметров импульсной наносекундной лазерной обработки и стратегии сканирования на формирование выпуклого рельефа и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя аустенитной стали 12X18H10T, обеспечивающих сохранение преимущественно аустенитной структуры, коррозионной стойкости, износостойкости и читаемости маркировки, что имеет существенное значение для развития материаловедения и технологий обработки материалов нефтегазового и криогенного оборудования.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Максаров
Вячеслав Викторович

Ефимов
Александр Евгеньевич

30.06.2026 г.