

На правах рукописи

Хузнахметов Руслан Маратович



**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ
СЛОЕ МАТЕРИАЛОВ НЕФТЕГАЗОВОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Вологжанина Светлана Антониновна

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, учёный секретарь института.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Нефтегазовое и криогенное оборудование, в том числе предназначенное для хранения и транспорта СПГ (цистерны, трубопроводы, элементы авто- и железнодорожного транспорта, сосуды и баллоны, работающие под давлением), эксплуатируется в сложных атмосферных условиях при переменных температурах от -160 до +60 °С, повышенной влажности и воздействии коррозионно-активных сред. В этих условиях возрастают требования как к надёжности изделий из конструкционных материалов и соединений, так и к сохранению идентификационной информации на поверхности деталей на протяжении всего жизненного цикла — от изготовления и сборки до эксплуатации, включая сервисные работы. Для обеспечения работоспособности в указанных условиях применяются аустенитные коррозионностойкие стали, сочетающие комплекс заданных свойств, в том числе в широком температурном диапазоне. Однако при технологических операциях изготовления и сборки (прежде всего при сварке и других видах локального высокотемпературного нагрева) в поверхностном слое и зоне термического влияния могут происходить структурно-фазовые процессы. При этом возможно выделение карбидов типа $M_{23}C_6$, преимущественно по границам зёрен, образование σ -фазы и δ -феррита. Также при импульсном лазерном воздействии, сочетающем термический цикл с кратковременными механическими (ударно-волновыми) нагрузками, и последующем охлаждении возможно образование ϵ -мартенсита. Лазерная обработка может быть перспективной для решения данных проблем, поскольку она характеризуется высокой локальностью воздействия и широким диапазоном параметров, позволяя целенаправленно формировать термический цикл и, тем самым, предотвращать нежелательные структурно-фазовые превращения. Кроме того, при соответствующем подборе параметров лазерного излучения появляется возможность формирования выпуклого рельефа, который может быть использован в качестве маркировки. Ключевыми требованиями к технологиям маркирования выступают долговечность и читаемость обозначений при отсутствии

негативного влияния на работоспособность изделия. В зоне маркировки не должны формироваться опасные концентраторы напряжений, микродефекты и нарушения сплошности поверхности, недопустимые для ответственных элементов, работающих под давлением. При этом традиционные решения либо недостаточно стойки (таблички, наклейки и др.), либо потенциально снижают надёжность из-за локального повреждения поверхности (клеймение, глубокая механическая гравировка и аналогичные методы). Помимо всего прочего, со стороны производителей оборудования существует запрос на выпуклую, износостойкую и тактильно различимую (осязаемую) маркировку, сохраняющую читаемость и функциональность при транспортировке, монтаже и обслуживании оборудования.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью получения долговечной маркировки на аустенитных сталях при одновременном контроле структурно-фазового состояния, износостойкости и коррозионной стойкости. Разработка воспроизводимой технологии лазерного формирования выпуклой рельефной маркировки для изделий нефтегазового и криогенного назначения, с углублённым пониманием процессов тепло- и массопереноса, перераспределением расплава и последующих структурно-фазовых превращениях при лазерном воздействии создаёт основу для расширения области применения лазерной обработки аустенитных сталей не только в сварочных/сборочных операциях, но и для других технологических задач локальной модификации поверхности.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам лазерной обработки металлических материалов, включая лазерную маркировку, структурирование поверхности и поверхностный переплав, посвящён значительный массив отечественных и зарубежных исследований. Вопросы влияния параметров лазерной обработки на формирование маркировки на различных видах материалов рассматривались в работах М. Švantner, М. Kučera, Е.М. Westin, Р. Laakso и др., где показано, что увеличение тепловложения и особенности формирования оксидных слоёв могут приводить к изменению пассивного состояния и снижению коррозионной

стойкости в зоне маркировки. Существенный вклад в развитие научных основ лазерной микрообработки и маркировки, а также в изучение механизмов формирования и управляемого роста оксидных плёнок внесён работами В.П. Вейко. В отечественной литературе также представлены исследования по читаемости лазерной маркировки в зависимости от параметров обработки и состояния поверхности (Е.И. Пряхин, А.П. Петкова). Однако в большинстве современных публикаций вопросы управляемого формирования выпуклого рельефа в фазе локального плавления и переплава для задач маркирования изделий практически не рассматриваются.

В последние годы заметное внимание уделяется технологиям получения выступающих элементов и текстур без добавления присадочных материалов при многократных проходах энергетического луча. К данному направлению относятся подходы технологии Surf-Sculpt, разработанные в TWI (A.L. Buxton, B.G.I. Dance), а также исследования лазерной реализации процесса (P. Hilton, L. Nguyen) и работы, раскрывающие роль нестабильностей ванны расплава и параметров тепловложения в формирование выступов (C. Earl, P. Hilton, W. O'Neill). Близкими по физической логике являются исследования по структурированию поверхности (WaveShape), путем расплавления и перераспределения расплава без абляции (A. Temmler и соавт.). Вместе с тем значительная часть этих публикаций ориентирована на функциональное текстурирование (смачиваемость, теплообмен, трибологические свойства, соединение разнородных материалов) и не решают проблему формирования выпуклой рельефной маркировки на аустенитных сталях с комплексной оценкой структурно-фазовых превращений и сохранением эксплуатационных свойств зоны воздействия.

Таким образом, научная база по лазерной обработке и модификации поверхностного слоя в целом сформирована, однако остаётся недостаточно изученным комплекс вопросов, относящихся к обработке аустенитных коррозионностойких сталей. Недостаточность проявляется в ограниченном числе системных исследований, связывающих параметры лазерного излучения и стратегию обработки со структурно-фазовыми превращениями в

поверхностном слое, эксплуатационными свойствами зоны обработки – прежде всего коррозионной стойкостью и устойчивостью рельефа к внешним воздействиям.

Объект исследования – технология поверхностной лазерной обработки изделий из аустенитной стали.

Предмет исследования - управление перераспределением расплава и фазовыми превращениями при поверхностной лазерной обработке изделий из стали 12Х18Н10Т.

Цель работы – разработка технологии лазерной обработки, сохраняющей аустенитную структуру, предотвращающей выделение карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, образование σ -фазы и δ -феррита и позволяющей получать выпуклую рельефную маркировку с требуемым комплексом эксплуатационных свойств на изделиях нефтегазового и криогенного оборудования.

Идея работы заключается в обеспечении сохранения аустенитной структуры в поверхностном слое изделий из стали 12Х18Н10Т в ходе формирования выпуклой рельефной маркировки с требуемыми эксплуатационными свойствами за счёт выбора режима импульсной лазерной обработки и стратегии сканирования.

Задачи исследования

Поставленная в работе цель достигается решением следующих задач:

1. Проведение научного анализа литературных источников, посвященных выбору способа поверхностной обработки материалов оборудования нефтегазового комплекса и криогенной техники, позволяющих получить маркировку с высокой идентификационной способностью в течение всего срока службы.

2. Определение влияния параметров импульсной лазерной обработки волоконным наносекундным инфракрасным лазером ($\lambda = 1064$ нм) на динамику перемещения расплава и формирование выпуклого рельефа.

3. Установление закономерностей влияния параметров импульсной лазерной обработки и стратегии сканирования на динамику перемещения расплава и формирование геометрии выпуклого рельефа.

4. Проведение исследований структурно-фазового и химического состава в зоне сформированного выпуклого рельефа.

5. Проведение оценки коррозионной стойкости зоны выпуклой рельефной маркировки на изделиях из стали 12X18H10T по результатам электрохимических исследований и ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана (КСТ).

6. Проведение оценки устойчивости выпуклой рельефной маркировки к внешним механическим воздействиям по результатам испытаний на абразивное изнашивание, включая анализ сохранности геометрии рельефа и визуальной читаемости маркировки.

7. Разработка рекомендаций по применению разработанной технологии формирования выпуклой рельефной маркировки изделий из стали 12X18H10T, а также возможности применения лазерной обработки при сварке тонкостенных изделий из стали 12X18H10T.

Научная новизна

1. Установлены закономерности влияния параметров импульсной лазерной обработки наносекундной длительности и стратегии сканирования на формирование выпуклого рельефа на поверхности стали 12X18H10T в режиме управляемого перераспределения расплава, при незначительной абляции, включая влияние траектории сканирования, энергии и степени перекрытия импульсов и числа циклов обработки на геометрические характеристики рельефа.

2. Доказана возможность сохранения аустенитной структуры, а также предотвращения процессов выделения карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, образования σ -фазы и δ -феррита на поверхности изделий из стали 12X18H10T при выбранных режимах лазерной обработки.

3. Экспериментально установлена зависимость высоты рельефа, формируемого на поверхности стали 12X18H10T в результате лазерной обработки методом перераспределения расплава, от параметров траектории сканирования и количества циклов обработки.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение по пунктам: 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. 4. «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических, и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды», п. 8. «Разработка способов повышения коррозионной стойкости металлических, неметаллических и композиционных материалов в различных условиях эксплуатации».

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны технологические рекомендации по выбору режимов наносекундной ИК-лазерной обработки малой мощности для аустенитных коррозионностойких сталей, обеспечивающие формирование выпуклой рельефной маркировки в условиях обработки без применения защитных газов и присадочной проволоки.

2. Практическая реализация результатов позволяет обеспечить сохранность и считываемость выпуклой рельефной маркировки в условиях, характерных для эксплуатации оборудования нефтегазового и криогенного назначения. Коррозионная стойкость и сохранность рельефа/читаемости подтверждены результатами электрохимических исследований,

испытаний в камере соляного тумана, испытаний на истирание и визуальной оценки читаемости маркировки.

3. Зарегистрирована база данных «База данных теплофизических и оптических параметров металлов для подбора режимов лазерной обработки», что подтверждается свидетельством о государственной регистрации базы данных № 2024624959 Российской Федерации от 06.11.2024.

4. Материалы диссертации приняты к внедрению в ООО «Лазерный Центр» (акт от 12.05.2025, утверждён Генеральным директором Горным С.Г.) в виде рекомендаций по параметрам лазерной обработки коррозионностойкой стали 12X18H10T при маркировке деталей оборудования нефтегазового комплекса и изделий машиностроения.

5. Показана возможность распространения полученных результатов поверхностной лазерной обработки на технологии лазерной сварки тонкостенных листовых заготовок аустенитных коррозионностойких сталей.

Методология и методы исследований. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, основанным на современных представлениях о тепло- и массопереносе и структурно-фазовых превращениях в металлах при локальном импульсном лазерном воздействии, а также с применением методов планирования эксперимента и статистической обработки результатов.

Экспериментальные исследования включали импульсную лазерную обработку образцов из стали 12X18H10T на комплексе МиниМаркер 2 (волоконный лазер, длина волны 1064 нм, длительность импульса в наносекундном диапазоне) с варьированием мощности излучения, частоты следования импульсов, скорости сканирования, шага обработки и числа циклов. Структурно-фазовое состояние и свойства поверхностного слоя в зоне лазерного воздействия оценивали методами оптической металлографии и контроля геометрии рельефа (Zeiss Axio Observer 3), измерения микротвёрдости по Виккерсу, рентгенофазового анализа (Rigaku UltimaIV, CuK α) и локального химического анализа методом сканирующей электронной микроскопии с

энергодисперсионной спектроскопией (Tescan Mira 3). Эксплуатационные свойства зоны маркировки определяли ускоренными коррозионными испытаниями в камере соляного тумана (КСТ) по ГОСТ 9.308-85 и ASTM B117, электрохимическими испытаниями методом потенциодинамической поляризации в 5% растворе хлорида натрия на потенциостате VersaSTAT 4, а также испытаниями на абразивное изнашивание и сохранность маркировки по ASTM G65.

Положения, выносимые на защиту

1. 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 %.

2. Разработанные режимы лазерной обработки позволяют сохранить 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.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена необходимым объёмом методов математического планирования эксперимента, использованием стандартных методов исследований, достаточным объёмом экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациях в рецензируемых изданиях.

Апробация результатов диссертации проведена на 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных: Всероссийская научная конференция с международным участием «Невская фотоника-2023» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); Международный семинар «Нанопизика и Наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); XVI Международная

научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2023 г.); Международный семинар «Нанозифика и Наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); Международная научно-техническая конференция «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (г. Брест, 2025 г.); Международная научно-практическая конференция им. Д.И. Менделеева (г. Тюмень, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе отечественных и зарубежных источников, в выборе рациональных режимов за счет установления зависимостей геометрии выпуклого рельефа от параметров импульсной лазерной обработки; проведении комплекса экспериментальных исследований структурно-фазового состояния и химического состава, локальных механических свойств в зоне сформированного выпуклого рельефа, эксплуатационных свойств зоны маркировки; обработке и интерпретации результатов, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях - 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), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 160 страниц машинописного текста, содержит 55 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников по материалам изделий нефтегазового и криогенного назначения; влиянию структурно-фазовых превращений, протекающих в ходе технологических операций на работоспособность аустенитных сталей; требованиям к современным способам маркирования металлов и сплавов, в том числе при использовании лазерных технологий для формирования рельефа на поверхности. По результатам обзора обоснована возможность применения поверхностной лазерной обработки для получения выпуклой рельефной маркировки на поверхности деталей оборудования нефтегазовой отрасли за счёт управляемого перераспределения расплава, сформулированы цель и задачи исследования. Результаты выполненного анализа послужили основанием для постановки цели работы и задач исследования.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора исследованной аустенитной коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, используемого лазерного оборудования и методики формирования выпуклого рельефа, описанию методов исследований структурно-фазового состояния в зоне сформированного рельефа и эксплуатационных свойств выпуклой рельефной маркировки.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования по формированию выпуклого рельефа методом управляемого перераспределения расплава при импульсной лазерной обработке. Установлено влияние энергии импульса, степени перекрытия и траектории сканирования на образование жидкой фазы, динамику перераспределения расплава и геометрию рельефа; определены параметры для получения устойчивого выпуклого рельефа без существенной абляции.

В четвертой главе представлены результаты исследования структурно-фазового состояния и химического состава сформированного выпуклого рельефа. Приведены результаты

анализа микроструктуры, распределения микротвёрдости, локального элементного и фазового состава.

В пятой главе представлены результаты комплексной оценки эксплуатационных свойств сформированной выпуклой рельефной маркировки. Проведены исследования коррозионной стойкости зоны лазерного воздействия методами электрохимических испытаний и испытаний в камере соляного тумана (КСТ); выполнена оценка стойкости к абразивному износу и считываемости маркировки с целью обоснования её долговечности в условиях эксплуатации оборудования нефтегазового и криогенного назначения.

В заключении отражены основные выводы по результатам работы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. 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 %.

По результатам аналитического обзора и анализа физической природы импульсной лазерной обработки установлено, что формирование выпуклого рельефа принципиально отличается от традиционной гравировки: в данном случае ключевой задачей является не удаление материала, а формирование жидкой фазы и её направленное перемещение без существенной абляции. Экспериментальные исследования выполнены на образцах из коррозионностойкой аустенитной стали 12X18H10T с применением маломощного волоконного наносекундного лазерного комплекса МиниМаркер 2 ($\lambda = 1064$ нм) с использованием обоснованной схемы сканирования по траектории чередующихся параллельных векторов (рисунок 1) при варьировании параметров лазерного излучения (таблица 1). Установлено, что при формировании выпуклого рельефа определяющими являются энергия одиночного импульса и степень перекрытия импульсов, которые должны обеспечивать устойчивое плавление материала без существенной абляции.

Энергия одиночного импульса определяется соотношением средней мощности P (Вт) и частоты следования импульсов F (кГц), а перекрытие — скоростью сканирования V (мм/с), частотой следования импульсов F (кГц) и диаметром пятна D (мкм). Экспериментально показано, что для получения устойчивого выпуклого рельефа заданной геометрии энергия одиночного импульса должна составлять 0,225 мДж, степень перекрытия импульсов 99,58 % за счёт варьирования параметров лазерного излучения: средней мощности P (50-100 Вт), частоты следования импульсов F (100-500 кГц), скорости сканирования V (50-175 мм/с). Выбор таких параметров позволяет стабилизировать перераспределение расплава и сформировать выпуклый рельеф (рисунок 2), предотвращая переход к интенсивной абляции. Выход параметров лазерного воздействия за пределы указанной рабочей области приводит, с одной стороны, к недостаточному тепловложению (прогрев без расплавления и отсутствие выпуклого рельефа), а с другой — к избыточному энерговыделению, приводя к формированию дефектов (пористость, неровности, оксидные включения и ухудшение геометрии). За счёт изменения параметров траектории сканирования (длины вектора L , мм; расстояния между векторами R , мкм; числа проходов N , ед.) при фиксированных параметрах выбранного режима обеспечено управление геометрией рельефа, полученного на основании проведения полного факторного эксперимента 2³. Получено регрессионное уравнение (1) для изменения высоты формируемого рельефа H под конкретное назначение:

$$H = 274,33L - 4,65R + 197,42N - 224,75. \quad (1)$$

На основании проведённых опытов и уравнения регрессии получены зависимости высоты формируемого рельефа от длины вектора сканирования, расстояния между векторами и количества циклов обработки (рисунок 3), а также взаимного влияния исследуемых параметров (рисунок 4). По абсолютной величине коэффициентов уравнения в закодированных переменных установлено, что наибольшее влияние на величину высоты формируемого рельефа оказывают длина вектора сканирования и количество циклов обработки.

2. Разработанные режимы лазерной обработки позволяют сохранить 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.

Обоснование данного положения базируется на том, что при локальном высокотемпературном воздействии на аустенитные коррозионностойкие стали потенциально неблагоприятными являются образующиеся карбиды $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, σ -фаза и δ -феррит, а также возможные мартенситные превращения, способные снижать коррозионную стойкость и долговечность маркировки. Поэтому при выборе параметров лазерного воздействия важным являлось не только формирование выпуклого рельефа заданной геометрии, но и снижение дефектности (пористости, неровностей, оксидных включений) и предотвращение выделения нежелательных фаз, что было заложено в постановку эксперимента для стали 12Х18Н10Т.

Экспериментально доказано, что разработанные режимы обеспечивают сохранение аустенитной структуры и не приводят к образованию вторичных фаз в зоне воздействия, включая карбиды $Cr_{23}C_6$, потенциально провоцирующие межкристаллитную коррозию, а также σ -фазы и δ -феррита; признаки мартенситных превращений также не выявлены. Сохранение аустенитной структуры и отсутствие признаков фазовых превращений в зоне сформированного рельефа подтверждены комплексом структурно-фазовых исследований. По данным рентгеновской дифрактометрии фазовый состав обработанных образцов представлен преимущественно γ -Fe (ГЦК-решётка), а дополнительные слабоинтенсивные максимумы соответствуют оксидным фазам в поверхностном слое рельефа (таблица 2). По результатам элементного анализа (СЭМ–ЭДС) установлено, что повышенное содержание кислорода локализуется преимущественно в приповерхностной зоне сформированного рельефа. В объёме рельефа распределение основных легирующих элементов основного материала остаётся однородным и соответствует исходному составу

материала (рисунок 5). На рисунке 6 показаны зоны исследования, а в таблице 2 результаты измерения микротвёрдости в этих зонах. Анализ полученных данных показал, что в отдельных локальных участках наблюдаются повышенные значения микротвёрдости, однако в целом её уровень остаётся сопоставимым с основным материалом. Анализ микроструктуры в нескольких характерных зонах сформированного рельефа позволил установить, что в исследуемой области формируется преимущественно мелкозернистая структура, а в отдельных участках — ультрамелкозернистая, что связано с высокими скоростями нагрева и охлаждения при локальном лазерном воздействии. Установлено, что размер зерна в зоне рельефа составляет 0,72...3,56 мкм (рисунок 7).

Эксплуатационные свойства сформированной маркировки оценивались ускоренными коррозионными испытаниями и электрохимическими исследованиями, поскольку коррозионная стойкость, сохранение геометрии рельефа и считываемости являются определяющими для изделий нефтегазового и криогенного назначения. Установлено, что выдержка образцов в КСТ в течение 240 часов (в нейтральном и кислом солевом тумане) не приводила к деградации зоны маркировки и не сопровождалась потерей считываемости. Электрохимические исследования подтвердили полученные результаты количественной оценкой пассивации и склонности к локальному разрушению пассивной плёнки в зоне лазерного воздействия. Испытания на абразивное истирание (ASTM G65), имитирующее абразивно-механические воздействия в процессе эксплуатации, также подтвердили сохранность рельефа и считываемость маркировки (рисунок 8).

Таким образом, совокупность экспериментальных данных позволяет утверждать, что разработанные режимы лазерной обработки обеспечивают формирование выпуклой рельефной маркировки с требуемыми эксплуатационными свойствами при сохранении аустенитной структуры и отсутствии признаков образования вторичных фаз: карбидов $Cr_{23}C_6$, σ -фазы, δ -феррита и мартенситных превращений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены новые научно-технологические решения по разработке технологии лазерной обработки, сохраняющей аустенитную структуру, предотвращающей выделение карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, образование σ -фазы и δ -феррита и обеспечивающей формирование выпуклой рельефной маркировки с требуемым комплексом эксплуатационных свойств на изделиях нефтегазового и криогенного назначения.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы.

1. Проведённый анализ состояния проблемы показал, что при высокотемпературном воздействии на аустенитные стали критически значимыми факторами являются выделение карбидов типа $M_{23}C_6$ по границам зёрен, образование σ -фазы, δ -феррита, приводящие к снижению коррозионной стойкости в зоне воздействия. Показано, что перспективным направлением получения маркировки является использование лазерного воздействия для формирования выпуклого рельефа путем перераспределения расплава.

2. Установлено, что при формировании выпуклого рельефа определяющими параметрами являются энергия одиночного импульса и степень перекрытия импульсов, обеспечивающие плавление без перехода к интенсивной абляции: энергия импульса должна составлять 0,225 мДж, а перекрытие отпечатков импульсов 99,58 %, что обеспечивает устойчивое перераспределение расплава.

3. Получены зависимости высоты формируемого выпуклого рельефа от длины вектора сканирования, расстояния между векторами и от количества циклов обработки, а также взаимного влияния исследуемых факторов. Установлено, что наибольшее влияние на величину высоты формируемого выпуклого рельефа оказывают длина вектора сканирования и количество циклов обработки.

4. Комплекс структурно-фазовых исследований подтвердил сохранение аустенитной структуры в зоне выпуклого рельефа с формированием мелкозернистой (в отдельных зонах — ультрамелкозернистой) структуры. Отмечены слабоинтенсивные

максимумы, соответствующие незначительному количеству оксидных фаз.

5. Доказана возможность применения лазерной обработки для формирования выпуклой рельефной маркировки на поверхности стали 12X18H10T результатами электрохимических исследований и ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана, которые не выявили коррозионных дефектов.

6. Испытания по стандарту ASTM G65 показали, что выпуклая рельефная маркировка сохраняет читаемость после абразивного изнашивания. Несмотря на локальное стачивание отдельных вершин рельефа, элементы маркировки остаются различимыми, что свидетельствует о достаточной износостойкости маркировки для выполнения идентификационной функции в условиях эксплуатации нефтегазового и криогенного оборудования.

7. Даны рекомендации по практическому использованию лазерной обработки для получения выпуклой рельефной маркировки на изделиях из стали 12X18H10T и возможному применению лазерной сварки тонкостенных листовых изделий из аустенитных коррозионных сталей.

Перспективой дальнейших исследований является уточнение технологических операций, направленных на формирование сложного совмещенного рельефа с корректной симметрией, повышенной устойчивостью к механическим и ударным воздействиям и улучшенной читаемостью, а также на снижение локальной склонности к питтингообразованию в зоне рельефа. Актуальным также представляется расширение технологии на другие материалы и сплавы, применяемые в нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

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.

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

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

3. Влияние условий эксплуатации на формирование нано- и ультрадисперсных зернограничных 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.

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

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, Zhdanova, E.Yu., Ramos-Velazquez, A. // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 30. – pp. 52-58. – DOI 10.17580/cisisr.2025.02.09.

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.

7. Вологжанина, С. А. Влияние наносекундного лазерного воздействия на процессы в поверхностном слое изделий из аустенитной стали 12X18H10T / 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–01 ноября 2025 года. – Брест: БрГТУ, 2025. – С. 234–238.

8. Вологжанина, С. А. Влияние лазерного излучения на формирование рельефа и структурно-фазовое состояние поверхностного слоя аустенитной стали 12Х18Н10Т / 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.

База 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». – 36 КБ.

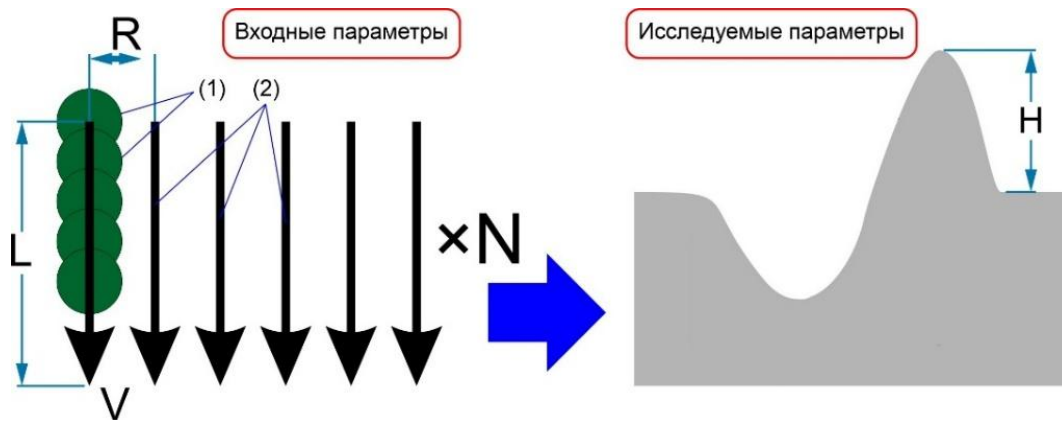


Рисунок 1 – Схема параметров лазерной обработки и геометрических характеристик поперечного сечения выпуклого рельефа, формируемого методом перемещения расплава: 1 – пятна лазерного излучения на поверхности; 2 – линии сканирования; L – длина линий сканирования, мм; R – расстояние между линиями сканирования, мкм; V – скорость сканирования, мм/с; N – количество циклов обработки, ед.; H – высота рельефа, мкм

Таблица 1 – Диапазоны варьирования параметров лазерного излучения

№	Параметр	Диапазон
1	Средняя мощность излучения (P), Вт	50-100
2	Скорость сканирования (V), мм/с	50-200
3	Частота следования импульсов (F), кГц	100-500



Рисунок 2 – Вид рельефа в поперечном сечении, сформированного методом перераспределения расплава при лазерной обработке (увеличение $\times 50$)

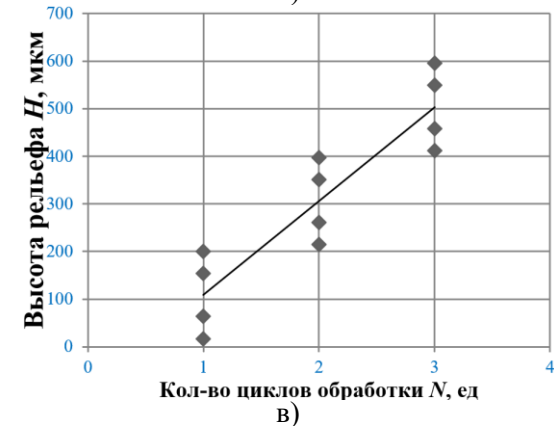
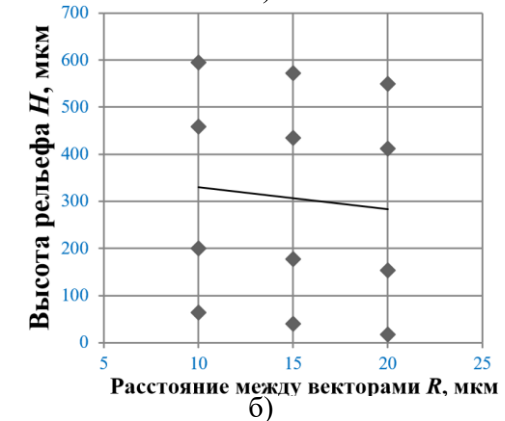
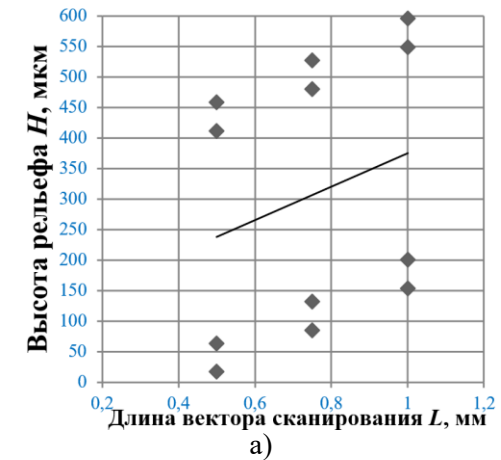


Рисунок 3 – Зависимость высоты рельефа от: длины вектора сканирования (L) (а), расстояния между векторами (R) (б), количества циклов обработки (N) (в)

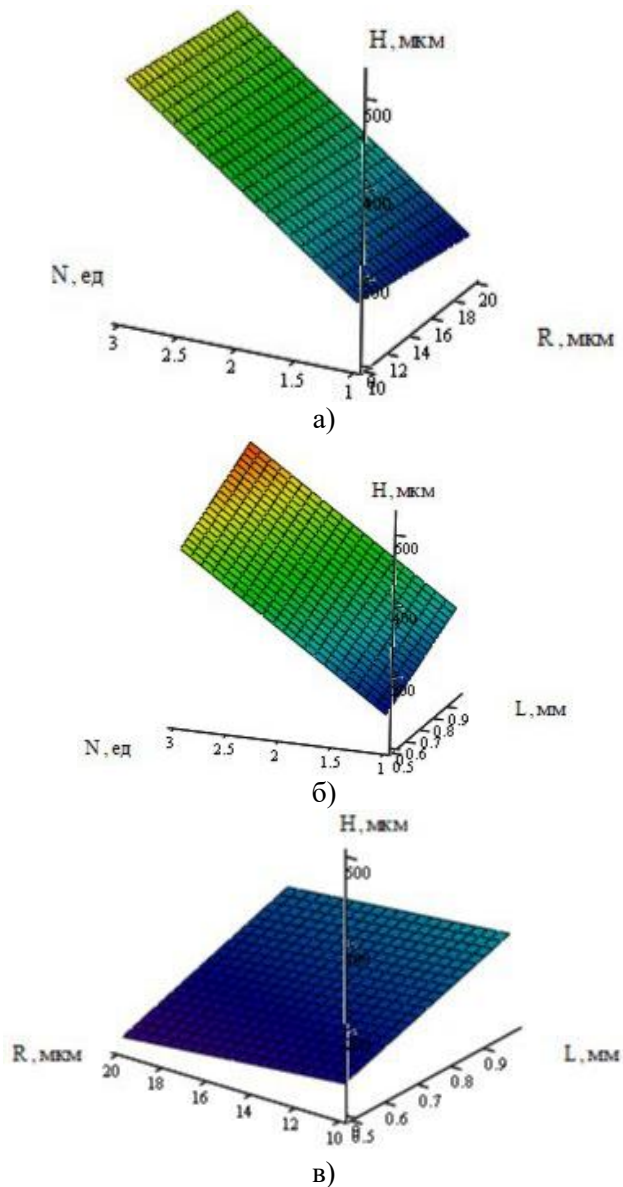
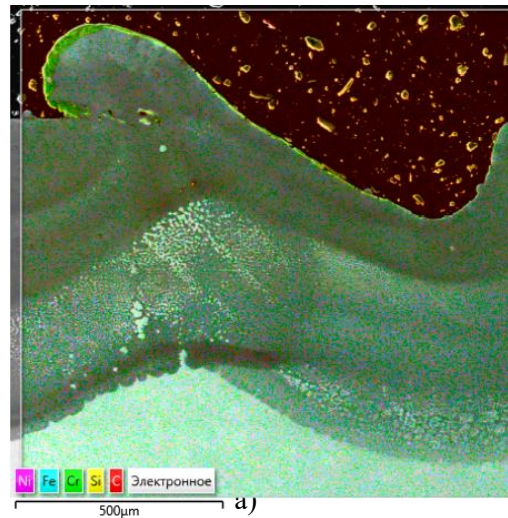


Рисунок 4 – Зависимость высоты рельефа от: количества циклов обработки (N) и расстояния между векторами (R) (а), количества циклов обработки (N) и длина вектора сканирования (L) (б), расстояния между векторами (R) и длина вектора сканирования (L) (в)



Суммарный спектр карты		
	Вес%	σ
Fe	58.1	0.1
Cr	17.6	0.0
Ni	11.9	0.0
O	4.0	0.0
Si	3.4	0.0
Mo	2.6	0.0
Mn	1.0	0.0
Al	0.9	0.0
Mg	0.2	0.0
K	0.2	0.0
Ca	0.1	0.0

Реализовано с помощью Tru-Q®

Рисунок 5 – Результаты СЭМ–EDS-анализа сформированного рельефа в поперечном сечении: а) – многослойное изображение с картой распределения элементов, б) – суммарный EDS-спектр элементной карты

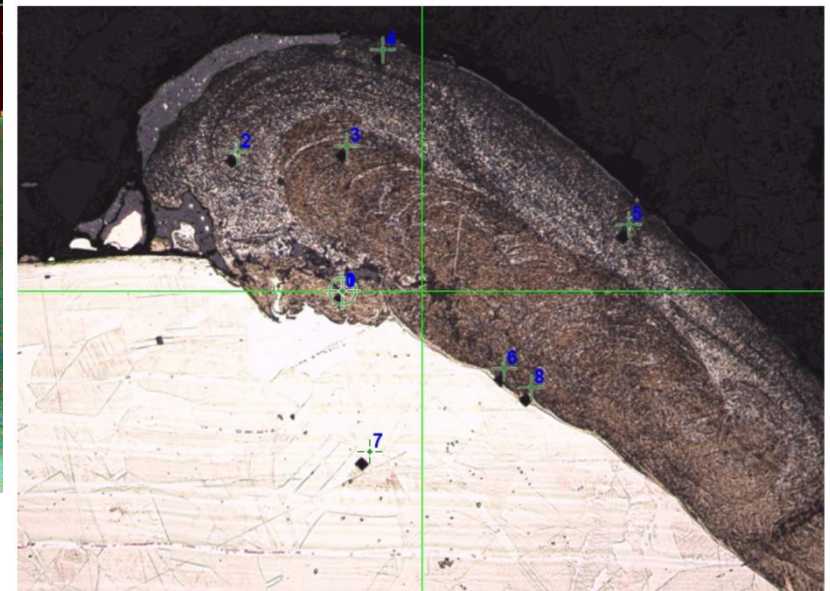


Рисунок 6 — Распределение микротвёрдости по сечению рельефа

Таблица 2 — Результаты измерения микротвёрдости в зоне сформированного рельефа

№ измерения	Микротвердость, HV 0.025
1	346
2	244
3	226
4	257
5	208
6	240
7	239
8	262

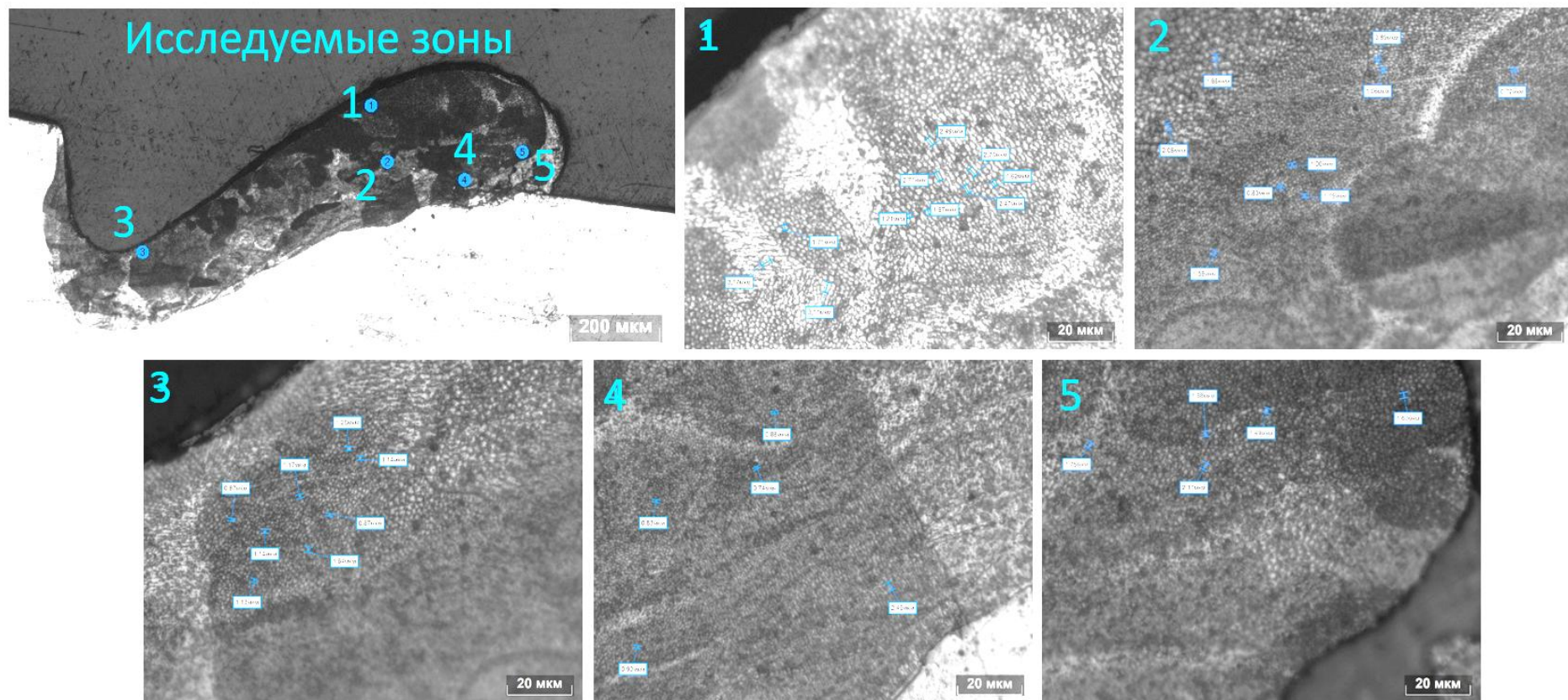
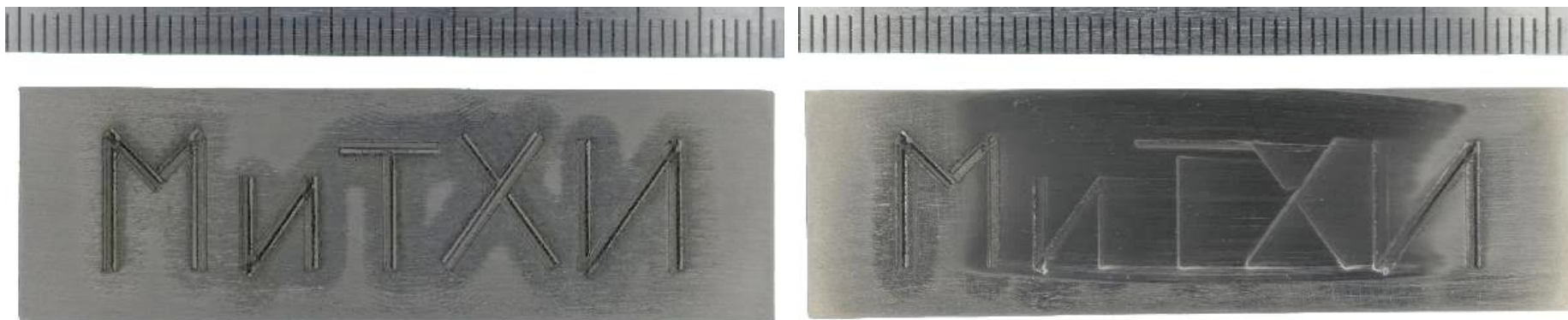


Рисунок 7 — Вид рельефа на поверхности стали 12X18H10T с указанием характерных зон микроструктурного анализа и микроструктура исследованных участков



а) б)
Рисунок 8 — Внешний вид образцов: а) — в исходном состоянии; б) — после абразивного износа