

О Т З Ы В

официального оппонента, доктора технических наук Горунова Андрея Игоревича на диссертацию Хузнахметова Руслана Маратовича на тему: «Влияние режима лазерной обработки на фазовые превращения в поверхностном слое материалов нефтегазового оборудования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

1. Актуальность темы диссертации

Нефтегазовое и криогенное оборудование, в том числе предназначенное для хранения и транспортирования сжиженного природного газа, эксплуатируется в сложных условиях, связанных с воздействием низких и переменных температур, повышенной влажности, хлоридсодержащих и иных коррозионно-активных сред. К таким изделиям относятся трубопроводы, сосуды и баллоны, работающие под давлением, резервуары, трубопроводная арматура, элементы автомобильного и железнодорожного транспорта. Для данной группы оборудования принципиальное значение имеют не только прочность, коррозионная стойкость и структурная стабильность материала, но и сохранение идентификационной информации на поверхности изделий на протяжении всего жизненного цикла. Традиционные способы маркирования металлических изделий, такие как таблички, наклейки, клеймение, ударно-точечная маркировка и глубокая механическая гравировка, не всегда обеспечивают требуемое сочетание долговечности, читаемости и отсутствия негативного влияния на работоспособность изделия. Для ответственных элементов нефтегазового и криогенного оборудования особенно важно исключить образование опасных концентраторов напряжений, микродефектов и нарушений сплошности поверхности в зоне маркировки. Перспективным направлением решения указанной задачи является применение лазерной обработки, позволяющей формировать рельеф непосредственно из материала основы без использования присадочных материалов и защитных газовых сред. Однако при локальном высокотемпературном воздействии на аустенитные коррозионностойкие стали возможно развитие нежелательных структурно-фазовых превращений: выделение карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, образование σ -фазы, δ -феррита, а также мартенситных составляющих. Такие процессы могут снижать коррозионную стойкость, питтингостойкость и эксплуатационную надежность материала.

В связи с этим диссертационная работа Хузнахметова Р.М., направленная на разработку режимов импульсной наносекундной лазерной обработки стали 12X18H10T, обеспечивающих формирование выпуклой рельефной маркировки при сохранении аустенитной структуры и предотвращении нежелательных фазовых превращений, является актуальной. Работа имеет

ОТЗЫВ

значение для развития научных представлений о процессах тепло- и массопереноса, перераспределения расплава и структурно-фазовых превращениях при лазерном воздействии, а также для решения практических задач маркирования изделий нефтегазового и криогенного назначения.

2. Научная новизна диссертации

Диссертационная работа Хузнахметова Р.М. по структуре и содержанию соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. В диссертационной работе достигнута цель по разработке технологии лазерной обработки стали 12X18H10T, обеспечивающей формирование выпуклой рельефной маркировки на поверхности изделий нефтегазового и криогенного назначения при сохранении аустенитной структуры и предотвращении нежелательных фазовых превращений.

Автором 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. Показано, что определяющими параметрами процесса являются энергия одиночного импульса и степень перекрытия импульсов; при энергии импульса 0,225 мДж и степени перекрытия 99,58 % обеспечивается устойчивое формирование выпуклого рельефа. Также экспериментально установлена зависимость высоты рельефа от параметров траектории сканирования, в том числе длины вектора, расстояния между векторами и количества циклов обработки. Кроме того, автором доказана возможность сохранения аустенитной структуры, предотвращения выделения карбидов $Cr_{23}C_6$ по границам зёрен, образования σ -фазы и δ -феррита в зоне лазерного воздействия, что подтверждает возможность получения выпуклой рельефной маркировки без существенного ухудшения структурно-фазового состояния поверхностного слоя стали 12X18H10T.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в результате диссертационного исследования, обеспечивается применением методов математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов, использованием стандартных методик исследования структурно-фазового состояния, микротвёрдости, коррозионной стойкости и износостойкости, проведением достаточного объёма экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, а также апробацией результатов на всероссийских и международных научно-практических конференциях, публикациями в рецензируемых научных изданиях и сопоставлением полученных данных с современными представлениями о процессах тепло- и массопереноса,

перераспределения расплава и фазовых превращений в аустенитных сталях при импульсном лазерном воздействии.

4. Научные результаты, их ценность

По итогам выполнения диссертационной работы соискателем получены следующие результаты.

1) Проведён анализ состояния проблемы, показавший, что при высокотемпературном воздействии на аустенитные стали критически значимыми факторами являются выделение карбидов типа $M_{23}C_6$ по границам зёрен, образование σ -фазы и δ -феррита, приводящие к снижению коррозионной стойкости в зоне воздействия. Обосновано, что перспективным направлением получения долговечной маркировки является использование лазерного воздействия для формирования выпуклого рельефа путём 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. Экспериментально показано, что энергия импульса должна составлять 0,225 мДж, а перекрытие отпечатков импульсов — 99,58 %, что обеспечивает устойчивое перераспределение расплава и формирование выпуклого рельефа.

3) Получены зависимости высоты формируемого выпуклого рельефа от длины вектора сканирования, расстояния между векторами и 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, а в отдельных зонах — ультрамелкозернистой структуры. При этом отмечены только слабоинтенсивные максимумы, соответствующие незначительному количеству оксидных фаз. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии признаков образования нежелательных фаз, способных существенно ухудшить структурную стабильность и коррозионную стойкость стали 12X18H10T.

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. Проведённые испытания не выявили коррозионных дефектов, что подтверждает возможность использования разработанной технологии для формирования маркировки на аустенитной коррозионностойкой стали в исследованных условиях.

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) По результатам работы даны рекомендации по практическому использованию лазерной обработки для получения выпуклой рельефной маркировки на изделиях из стали 12X18H10T, а также показана возможность применения подходов лазерной обработки при сварке тонкостенных листовых изделий из аустенитных коррозионностойких сталей.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных. Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на 6 научно-практических мероприятиях, в том числе на 5 международных.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Установлено, что при формировании выпуклого рельефа на поверхности стали 12X18H10T определяющее влияние оказывают энергия одиночного импульса, степень перекрытия импульсов, длина вектора сканирования, расстояние между векторами и количество циклов обработки. На основании этого разработаны технологические рекомендации по выбору режимов наносекундной ИК-лазерной обработки малой мощности, обеспечивающие формирование выпуклой рельефной маркировки за счёт управляемого перераспределения расплава без применения защитных газовых сред и присадочных материалов. Теоретическая значимость работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами лазерной обработки, динамикой перемещения расплава, геометрией формируемого рельефа и структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя стали 12X18H10T. Практическая значимость подтверждена результатами электрохимических исследований, испытаний в камере соляного тумана и испытаний на абразивное изнашивание, показавшими сохранность рельефа и читаемость маркировки. Материалы диссертации приняты к внедрению в ООО «Лазерный Центр» в виде рекомендаций по параметрам лазерной обработки коррозионностойкой стали 12X18H10T при маркировке деталей оборудования нефтегазового комплекса и изделий машиностроения, а также подтверждены свидетельством о государственной регистрации базы данных № 2024624959 от 06.11.2024.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Представленные в диссертации Хузнахметова Р.М. выводы и результаты рекомендуются к производственному использованию при разработке и применении технологий лазерной обработки изделий из аустенитной коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, для формирования долговечной выпуклой рельефной маркировки оборудования нефтегазового и криогенного назначения. Кроме того, результаты представляют интерес для предприятий, занимающихся изготовлением, маркированием и эксплуатацией трубопроводов, сосудов, резервуаров, трубопроводной арматуры, авто- и железнодорожных цистерн, где требуется сохранение идентификационных признаков изделий в условиях воздействия коррозионных и механических факторов. Материалы диссертации также могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и образовательных учреждениях при выполнении работ, связанных с лазерной обработкой металлических материалов и управлением структурно-фазовым состоянием поверхностных слоёв.

7. Замечания и вопросы по работе

1) Целесообразно более подробно раскрыть границы применимости установленного технологического окна лазерной обработки при изменении марки лазерного оборудования, диаметра фокального пятна и длительности импульса.

2) Уточните, какой из параметров лазерной обработки является наиболее чувствительным при переходе от устойчивого перераспределения расплава к режиму выраженной абляции.

3) В диссертации показано влияние длины вектора, расстояния между векторами и числа циклов обработки на высоту выпуклого рельефа. Вместе с тем было бы полезно дополнительно указать, насколько полученная математическая зависимость применима за пределами исследованного диапазона параметров.

4) Целесообразно дополнительно уточнить, как подготовка исходной поверхности – шероховатость, наличие оксидной плёнки, следы проката или механической обработки – влияет на повторяемость формирования выпуклого рельефа.

Указанные замечания не снижают важности основных научных выводов и практических результатов работы, носят уточняющий характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

8. Заключение по диссертации

Диссертация Хузнахметова Руслана Маратовича «Влияние режима лазерной обработки на фазовые превращения в поверхностном слое материалов нефтегазового оборудования», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о

присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор – Хузнахметов Руслан Маратович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Официальный оппонент

Профессор научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук

Подпись Горунова А.И. заверяю
М.П.



Горунов Андрей Игоревич

ДОСТОВЕРЯЮ
специалист
Горунов
05 2026 г.

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Почтовый адрес: 194064, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, дом 29

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.spbstu.ru/>

эл. почта: gurunov_ai@spbstu.ru; телефон: +7 (812) 552 66 23