

Хриптович Евгений Владимирович

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЛЕГИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ
ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель:

Шиганов Игорь Николаевич

доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

Официальные оппоненты:

Горунов Андрей Игоревич

доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ»

Люхтер Александр Борисович

кандидат технических наук, доцент, директор Научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

Защита состоится «__» _____ 2025 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Телефон для справок: +7 (499) 263-66-33*35-58.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета,

Кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Наиболее широко лазеры применяются для обработки материалов, основанной на тепловом воздействии лазерного излучения различных диапазонов длин волн. Особенно актуально увеличение срока службы изделий, вышедших из строя в процессе эксплуатации. К ним можно отнести валки прокатных станов и посадочные шейки валов. Данного эффекта можно достичь при создании функциональных покрытий методом лазерного легирования поверхностей изделий металлическими и керамическими частицами. Это направление является одним из наиболее актуальных в развитии отечественных технологий металлообработки поверхностей деталей машин. Создание подобных покрытий существенно увеличивает сроки состояния работоспособности деталей и машины или механизма в целом. Применение новых лазерных технологий повышает эффект упрочнения и износостойкости покрытий в сравнении с другими методами.

Лазерное легирование позволяет получать уникальные свойства на поверхности обрабатываемых деталей, однако высокая стоимость присадочных материалов и лазерного оборудования требует совершенствования существующих и разработки новых технологий легирования поверхностей сталей. В основном лазерная обработка поверхностей металлов осуществляется круглым профилем пятна. Однако увеличения производительности и качества процесса можно добиться при использовании специализированных сканирующих систем, а также принципиально новых устройств формирователей профиля пятна прямоугольной или квадратной формы. Также стоит отметить, что до настоящего времени наиболее распространенным методом подачи порошкового материала в ванну расплавленного металла является преимущественно коаксиальная подача. Однако при внеосевой подаче возможно добиться увеличения производительности процесса лазерного легирования поверхностей, а также избежать формирования плазменного факела над обрабатываемой поверхностью металла. При этом возможно увеличение ширины зоны обработки с целью увеличения производительности и уменьшения количества зон перекрытия между областями упрочнения, что позволяет улучшить функциональные свойства изделий.

Разработке указанных выше технологий и устройств до настоящего времени не уделялось должного внимания, в связи с чем исследование закономерностей формирования легированного поверхностного слоя на поверхности углеродистых и низкоуглеродистых посадочных шеек валов и валков прокатных станов, при введении легирующих частиц и воздействии высококонцентрированного лазерного излучения различного профиля, является весьма актуальным.

Цель работы: повышение эффективности технологии лазерного легирования поверхностей посадочных шеек валов и валков прокатных станов, с расширенной зоной обработки, за счёт применения специальных оптических систем и устройств.

Объект исследования: высокоэффективные технологии обработки поверхности металла излучением волоконного лазерного источника.

Предмет исследования: технология лазерного легирования поверхностей стальных изделий, повышающая механические свойства.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Обзор литературы, характеризующий существующие способы упрочнения поверхностей деталей машин, а также используемые материалы и основные направления их применения.

2. Разработка новых оптических систем и широкополосных щелевых сопел для подачи легирующего материала в зону воздействия лазерного излучения, расширяющих площадь и повышающих эффективность обработки.

3. Разработка математической модели процесса широкополосного лазерного легирования поверхности с описанием тепловых полей, индуцированных источником лазерного излучения в процессе лазерного легирования поверхностей сталей, гидродинамики ванны расплава и кинетики движения частиц, с целью выбора научно обоснованных условий процесса и технологических режимов.

4. Создание принципиально новой технологии лазерного легирования различных поверхностей стальных деталей с использованием высокомоощных источников лазерного излучения, оснащенных оптическими головками с функцией высокочастотных колебаний лазерного луча и широкополосными щелевыми соплами, а также разработка рекомендаций по подбору технологических режимов и легирующих материалов процесса модификации поверхностей посадочных шеек валов и валков прокатных станов.

5. Проведение регрессионного анализа процесса по критериям оценки качества лазерного легирования поверхностей углеродистых металлов и сплавов, а также оптимизация режимов обработки и технологических приемов лазерного легирования поверхности при внедрении металлических, керамических и металлокерамических частиц с использованием разработанного оборудования.

6. Оценка механических свойств, металлографические исследования и проведение трибологических испытаний нанесённых слоёв.

7. Разработка технологических рекомендаций по легированию поверхностей посадочных шеек валов (Ст. 20Х, 40ХН2МА) и валков прокатных станов (У16).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе полученных в ходе выполнения работы результатов теоретически и экспериментально доказано, что для легирования приповерхностного слоя стали частицами размером от 40 до 100 мкм необходимо обеспечить их скорость движения от 1 м/с, при расходе газа до 10 л/мин.

2. Теоретически и экспериментально установлено, что при широкополосном лазерном легировании поверхности стали порошками различного состава, за один проход с применением источников лазерного излучения мощностью до 10 кВт и щелевой насадки, легирование возможно на глубину до 1,5 мм с шириной зоны обработки до 60 мм, что обеспечивает

получение микроструктуры, повышающей твёрдость и высокотемпературную износостойкость различных марок сталей до 3 раз.

3. Впервые для упрочнения поверхностей шеек валов и валков прокатных станов из стали 20X, стали 40XH2MA и стали У16, установлены закономерности формирования поверхностных композитных слоев лазерным широкополосным легированием с повышенным содержанием карбидов вольфрама (до 26,25 %), тантала (до 5,30%) и ванадия (до 2,35%), равномерно распределенных на глубину от 0,7 до 1 мм.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Создана оснастка для высокоэффективного лазерного легирования, состоящая из специальной оптики, расширяющей поле обработки до 60 мм, а также разработан, спроектирован и изготовлен опытный образец широкополосного щелевого сопла для внеосевой подачи порошка.

2. На основании регрессионного анализа выбраны оптимальные режимы лазерного легирования нескольких видов сталей (ст.20X, 40XH2MA, У16) металлокерамическими частицами (FeVC, TaC, TiB₂, TiC, WC) с целью повышения износостойкости легированных поверхностей валков прокатных станов и посадочных шеек валов.

3. Разработаны технологические рекомендации по легированию поверхностей шеек валов (Ст. 20X, 40XH2MA) и валков прокатных станов (У16).

Методы исследования: В работе использовались как экспериментальные так и теоретические методы исследований. При математическом моделировании процесса лазерного легирования поверхностей, использовано программное обеспечение COMSOL-Multiphysics. Моделирование и расчёт оптической системы выполнялись с использованием ПО Zemax. Подготовку и исследование легированных образцов проводили на оборудовании испытательной лаборатории. Химический анализ выполнялся на спектрометре Q8 MAGELLAN. Шлифоподготовку осуществляли при помощи отрезной машины Discotom-6 и шлифовально-полировальной машины Tegramin-30. Микрошлифы образцов подготавливались в специализированном прессе CitoPress-1. Анализ макрошлифов осуществляли с использованием измерительной системы для контроля качества WELDING EXPERT. Микроструктурный анализ выполнялся на микроскопе OLYMPUS GX51. Исследования по определению значений микротвердости легированных слоев выполнялись на микротвердомере DuraScan-70. Контроль температуры образцов осуществлялся при помощи ручного промышленного тепловизора FLIR T640 и термопар.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением основных положений естественных наук при проведении расчётов, использованием современных программ и проверенных алгоритмов при моделировании процесса, а также выполнением измерений на поверенном оборудовании с использованием стандартных методик и проверенных принципов, при создании новых приспособлений. Работа также подтверждена экспериментальными данными, полученными в ходе проведения исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод моделирования и расчёта оптической системы формирования пятна лазерного излучения прямоугольной и квадратной формы для широкополосного легирования поверхностей стальных изделий, позволяющий определять требуемые размеры, положения и параметры оптических элементов.
2. Математическая и физическая модель лазерного легирования поверхности с описанием тепловых полей, гидродинамики ванны расплава и кинетики движения в ней твёрдых частиц, позволяющая осуществлять прогнозирование технологических параметров процесса.
3. Принципиально новая технология широкополосного лазерного легирования, повышающая износостойкость поверхностей посадочных шеек валов и валков прокатных станов, с применением специализированных оптических формирователей профиля пятна и внеосевой подачи порошка.

Апробация работы:

1. XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2021 г.).
2. XIV всероссийская научно-техническая конференция «Будущее машиностроения России» (Москва, 2021 г.).
3. XXVII Международная научная конференция «Ломоносов» (Москва, 2021 г.).
4. Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные Технологические системы» METS 21 (Азов, 2021 г.).
5. 19 Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов (Москва, 2021 г.).
6. X международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2021 г.).
7. XIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2022).
8. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии МГТУ им. Баумана» (Москва, 2023)
9. 15-я Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023).
10. XI международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2024).
11. Работа доложена на научно-техническом семинаре кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Москва, 2025).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS и 3 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок и 45 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов к каждой главе, заключения и списка литературы из 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, приведена цель работы, указаны основные задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, дано обоснование достоверности полученных данных и информация об апробации работы.

В **Главе 1** рассмотрены известные области применения лазерной модификации поверхностей сталей. Описаны основные способы лазерного легирования поверхностей металлов. Приведены основные материалы, применяемые для легирования поверхностей.

Вопросами лазерной модификации поверхности занимались как отечественные учёные (Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н., Туричин Г.А., Шиганов И.Н., Петровский В.Н., Бирюков В.П. и др.) так и зарубежные (G. Kartay, C. Hu, K. Mohammed Jasim и др.). Предложенные к изучению направления лазерного легирования поверхности, могут найти свое применение в различных областях промышленности. Одним из примеров их применения является продление срока службы валков прокатных станов. Задача заключается в увеличении износостойкости прокатных валков. В среднем, на производстве до выхода из строя, прокатные валки эксплуатируются менее 1 смены. Далее производится их наплавка или механическая обработка. В случае увеличения стойкости валков от 2 до 5 раз появляется экономическая эффективность. Перспективным направлением также является упрочнение посадочных шеек крупногабаритных валов, изготовленных из Стали 20 или Стали 40. Повышение их ресурса приводит к значительному снижению стоимости эксплуатации дорогостоящего оборудования, связанной с остановкой технологического процесса для замены деталей машин, а также с дополнительным приобретением дорогостоящих комплектующих.

Для достижения, указанных выше целевых эксплуатационных показателей, в процессе лазерного легирования поверхностей изделий используются различные способы подачи материалов. Существуют несколько основных методов введения керамических, металлокерамических и металлических частиц в ванну расплавленного металла, полученную при воздействии на поверхность лазерным излучением: 1) предварительное нанесение легирующих материалов; 2) внеосевая подача; 3) коаксиальная подача. Дано подробное описание этих способов, а также указаны их основные преимущества и недостатки.

Выполнено описание различных легирующих материалов, позволяющих добиться повышения механических свойств модифицированного слоя. К ним можно отнести порошковые материалы на основе Fe, Ni, Cr, Co, Ti, Ta, W, B, Si, V, Nb.

На основании проведенного литературного обзора сформулированы задачи научной работы и составлен план исследовательских работ.

В Главе 2 представлен состав используемого оборудования, а также приведены результаты разработки и тестирования оптических головок, специализированной оснастки для подачи легирующего материала в область лазерного воздействия. Также в главе рассмотрены основные применяемые материалы и использованное оборудование.

Работа выполнена на стенде лазерной обработки производства ООО НТО «ИРЭ-Полус». Лазерное легирование осуществлялась с использованием оптической головки IPG High power scanner и формователя прямоугольного профиля пятна лазерного излучения, установленных на фланце робота KUKA KR 60 HA, оснащенных мощным волоконным лазером ЛС-10К (10 кВт) и щелевым соплом для подачи металлокерамического порошка.

С целью усовершенствования процесса лазерного легирования поверхностей сталей возможно применение новой оптической схемы, которая способствует равномерному высокотемпературному нагреву области воздействия лазерного излучения, расположенной на поверхности обрабатываемой металлической детали, и обеспечивает равномерное распределение энергии, а также повышенную производительность процесса. Наиболее подходящей геометрической формой пятна в данном случае является прямоугольник. Распределение энергии в нем должно быть близким к равномерному вдоль длинной его стороны с точностью $\pm 15\%$, или, при наличии мелкомасштабной модуляции, должно быть таким при усреднении по периоду модуляции.

В ходе работ выполнена разработка формователя линейного пятна. Способом получения прямоугольного профиля пятна лазерного излучения является простая схема оптической головки для лазерной обработки с фокальной перетяжкой в форме прямоугольника и с близким к равномерному распределению интенсивности излучения по длинной стороне. Это достигается путем деления гауссовского распределения на две части вдоль его оси симметрии и сдвигом обеих половин навстречу друг другу на размер радиуса гауссовского пучка. Полученное распределение будет близко к равномерному с размером плоской части, равной радиусу гауссовского пучка (Рисунок 1).

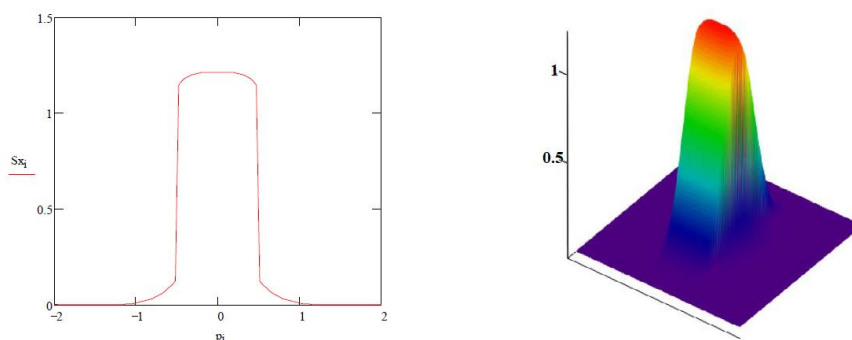


Рисунок 1. Распределение плотности мощности излучения по одной поперечной координате в гауссовском пучке (радиус пучка в центре равен 1)

Конструкция разработанной оптической головки состоит из коллиматора с фокусным расстоянием 120 мм и цилиндрических линз, а также призмы Френеля,

что позволяет значительно упростить и удешевить оптическую головку. Это делает ее более эффективной для применения в процессах лазерной модификации. Для получения требуемого размера в пятне фокусировки по длинной стороне, необходимо иметь размер коллимированного гауссовского пучка $18 \text{ мм} < D < 22 \text{ мм}$. Отсюда следует, что при использовании световодов с диаметром волокна 100 и 200 мкм (BPP соответственно 4 и 8 мм·мрад), необходимо иметь фокусное расстояние коллиматора 100 – 120 мм. Для получения по меньшей стороне распределения в перетяжке пучка размера 0.5 или 1 мм (при использовании тех же световодов) необходимо иметь 5-кратный коэффициент увеличения в оптической системе коллиматор – цилиндрическая линза ($M=5$). Таким образом, фокусное расстояние цилиндрической линзы должно быть 500-600 мм. Размер оптики для гауссовского пучка должен быть не менее 2.5-кратного размера его диаметра, поэтому диаметр цилиндрической линзы и размер призмы Френеля должны быть равными 50 мм.

В ходе работ выполнено тестирование разработанной головки. Определено её рабочее расстояние WD , а также выполнен поиск фокуса оптической системы. Параметры сторон прямоугольного пятна определяются по соотношению:

$$a = 0.1159 \cdot WD + 15.329; b = -0.0161 \cdot WD + 8.9855, \quad (1)$$

где, a – длина прямоугольного пятна, b – ширина пятна.

Тестирование на температурный нагрев проводилось путём подачи непрерывного лазерного излучения, в течении определённого времени, с последующим замером температуры головки с применением ручного пирометра или тепловизора FLIR 650. Температура в процессе тестирования не поднимается выше $\sim 30^\circ\text{C}$. Результаты тестирования можно считать успешными.

Также выполнено тестирование высокомоощного сканатора IPG 2D High Power Scanner. Определено его рабочее расстояние и размеры пятна лазера при различном расфокусе. Скорость сканирования в фокусной плоскости в диапазоне 1-12 м/с определялась по высокоскоростной камере с частотой записи кадров 52000 кадров/с при нанесении линий длиной 20 мм в непрерывном режиме с мощностью излучения 2-3 кВт. При исследовании записей с высокоскоростной камеры установлено, что имеется задержка перед началом движения зеркал и включением излучения. На Рисунке 2 представлены кадры в момент включения излучения, при обработке с различными значениями скорости движения луча. По результатам анализа снимков установлено, что излучение включается на разном расстоянии от начала линии обработки.

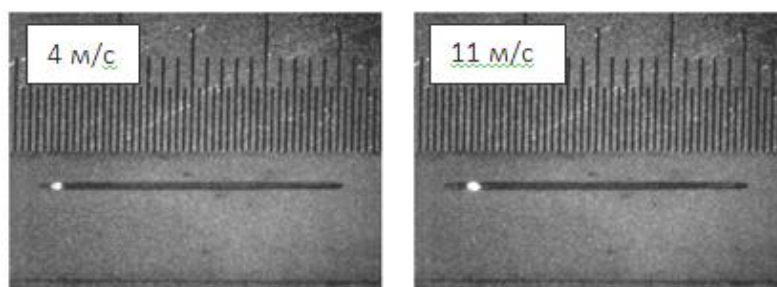


Рисунок 2. Кадры с записи высокоскоростной камеры в момент включения излучения, при обработке на различной скорости сканирования

Данная особенность работы оборудования предусмотрена для предотвращения пережога на краях линий, до момента полного разгона зеркал головки и достижения заданной скорости движения, с выключенным излучением.

В конце линии обработки излучение выключается раньше остановки зеркал. После выполнения каждого отдельного элемента исполнительной программы излучение выключается и включается при начале выполнения следующего элемента через 5 мс. Такой простой на концах линий обработки ограничивает максимально возможную частоту осцилляций. Общее время простоя за период осцилляции составляет 10 мс, при этом частота сканирования не может быть больше 100 Гц. С учетом времени простоя, скорости сканирования и длины линии обработки, частота осцилляций рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \frac{1}{2 \cdot (\frac{A}{V} + t_p)} = \frac{1}{2 \cdot (\frac{B}{V_{\text{расфокус}}} + t_p)}, \quad (2)$$

где A – длина линии в фокусе, V – скорость сканирования в фокусе, B – длина линии в расфокусе, $V_{\text{расфокус}}$ – скорость сканирования в расфокусе, t_p – длительность простоя после выполнения элемента программы.

Время выхода мощности излучения на стационарное значение составляет ~100 мкс, а время выключения излучения составляет ~50 мкс.

При выполнении работ также осуществлена разработка и тестирование щелевого сопла для подачи порошкового материала. Протяженность выходной щели 60 мм. Расход транспортного газа, используемого для подачи порошкового материала составляет до 30 л/мин. Частицы подаются из статически нейтральных трубок подачи порошка между элементами первого ряда делителя потока порошка. Щелевая насадка выдерживает воздействие отраженного лазерного излучения на расстоянии от 20 до 30 мм (от зоны воздействия) в течении более 60 мин. Максимальная мощность используемого источника лазерного излучения 10 кВт. При работе с щелевой насадкой обеспечивается принудительное водяное охлаждение. В качестве хладагента используется неионизированная (дистиллированная) вода. В контуре водяного охлаждения исключена возможность контактной (гальванической) коррозии при этом он выдерживает давление охлаждающей жидкости до 5 бар. Ввод воды в контур охлаждения осуществляется через стандартные, покупные, термостойкие, быстроразъемные соединения.

В окончании главы представлены основные и легирующие материалы, а также использованное исследовательское оборудование.

В Главе 3 приведены основные результаты математического моделирования процесса с описанием тепловых полей, а также результаты сопряженной задачи теплопроводности и гидродинамики ванны расплава, моделирования газопорошкового потока и кинетики движения частиц.

Математическое моделирование распределения температурных полей позволяет упростить работу технолога. Его применение приводит к оптимизации процесса и упрощению подбора технологических параметров, необходимых для

осуществления лазерного легирования с равномерным распределением теплового фронта в приповерхностном слое.

Моделирование тепловых полей для процесса лазерного легирования осуществлялось в программном обеспечении COMSOL-Multiphysics.

Задача по расчету температурных полей решается с применением нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности (3).

$$C_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \vec{q} = Q, \quad (3)$$

где Q – источник тепла, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, тепловой поток согласно закону Фурье пропорционален градиенту температуры $\vec{q} = -k(T) \cdot \nabla T$, ρ – плотность материала, T – температура.

Так как энергия лазерного излучения поглощается металлами в тонком приповерхностном слое толщиной 1 мкм, то в уравнении (3) $Q = 0$, а при моделировании лазерного нагрева источник тепла определялся как поверхностный движущийся со скоростью V с гауссовым распределением плотности мощности $Q_L(x, y)$ с центром в точке (x_0, y_0) :

$$Q_L = A(T) \cdot \frac{2P}{\pi D^2} \exp\left(-8 \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{D^2}\right) \quad (4)$$

где A – коэффициент поглощения лазерного излучения, P – мощность лазерного излучения, D – диаметр пятна на поверхности.

Движение задавалось при изменении координаты центральной точки луча $(x_0 + x_{\text{лин}}, y_0 + y_{\text{осц}})$. Колебания луча осуществлялись в направлении оси y со скоростью V_2 . При изменении направления движения знак значения скорости изменяется на противоположный в точках поворота с заданным ускорением при торможении и разгоне. Ускорение зеркал определялось при тестировании сканатора. Угловое ускорение при пересчете составило $a = 18000 \text{ м/с}^2$.

Итогом решения уравнения теплопроводности с определенными граничными условиями стало получение температурного распределения в объеме материала (время обработки от 0 до 20 с).

Глубина оценивалась в сечении параллельном направлению колебаний по изотерме, соответствующей температуре плавления или аустенизации. Аналогично производится расчет при обработке линейно движущимся лазерным лучом. Однако, необходимо учитывать, что сечение с максимальной глубиной воздействия находится в конце области воздействия лазера, что наблюдается по сечению вдоль линейного движения высокоомощного лазерного сканатора (Рисунок 3).

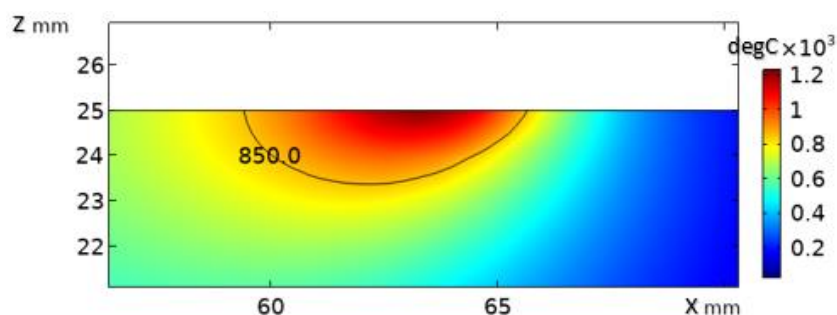


Рисунок 3. Сечение центра области обработки вдоль движения луча, через 20 с

Из-за низкой скорости охлаждения может образовываться мартенсит с другими структурами, имеющими более низкую твердость. С помощью полученной модели можно сделать оценку по глубине зоны теплового воздействия и работоспособности модели в целом. Под зоной теплового воздействия в данном случае следует понимать область нагрева выше температуры A_{c3} с последующим самоохлаждением.

Основным отличием решения сопряженной задачи теплопередачи и гидродинамики ванны расплава является то, что к уравнению теплопроводности добавляется уравнение Навье-Стокса. Перемещение жидкости инициируется вследствие эффекта Марангони, суть которого состоит в изменении поверхностного натяжения в связи с появлением градиента температур.

Закон сохранения импульса в данном случае можно записать как уравнение Навье-Стокса, которое можно решить в Comsol в модуле гидродинамики.

$$\rho_0 \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} \right] = \nabla [-pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \vec{F}_{buoyancy} + \vec{F}_{Darcy}, \quad (5)$$

где ρ_0 – плотность твердого материала, $\vec{u}$ – вектор скорости жидкости, p – давление, μ – динамическая вязкость, t – время, $\vec{F}_{buoyancy}$ – сила плавучести, $\vec{F}_{Darcy}$ – сила Дарси.

Математическое представление жидкой и твердой фазы производится путем изменения вязкости материала. Вязкость твердого тела, где температура ниже точки плавления, устанавливается много большей чем после достижения температуры плавления.

Эффект Марангони задается как граничное условие в следующем виде:

$$\mathbf{n}[-pI + \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] = \sigma(\nabla_t \mathbf{n})\mathbf{n} - \nabla_t \sigma, \quad (6)$$

где σ – поверхностного натяжение, которое задается в виде функции от температуры, $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали.

Благодаря этому эффекту расплав материала начинает двигаться от центра лазерного пучка к периферии (или наоборот при положительной производной поверхностного натяжения), так как поверхностное натяжения там выше. Горячий материал из центра замещается более холодным, что приводит к постоянному смешиванию и конвективному теплообмену.

Для моделирования процессов, связанных с подачей порошкового материала в зону лазерного воздействия, необходимо рассматривать задачу динамики газопорошковой струи. Задача разбивалась на два этапа:

1. Решение задачи газодинамики.
2. Решение задачи динамики порошковых частиц в поле скоростей газа, рассчитанных на первом этапе.

Задачу газодинамики можно рассматривать в Comsol аналогично задаче гидродинамики при решении уравнения Навье-Стокса. Полученное в ходе решения поле скоростей газа ставится начальным условием в задаче динамики порошковых частиц, для каждой из которых решается уравнение Ньютона:

$$m_p \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{F}. \quad (7)$$

где V – скорость частиц порошка, m_p – масса частицы порошка, F – сила сопротивления струи.

В ходе проведения работы получено распределение полей как начальное условие расчета движения траектории частиц. На рисунке 4 показано распределение массы порошка на удалении 10 мм от грани сопла через 5 секунд после начала падения частиц в щелевую насадку.

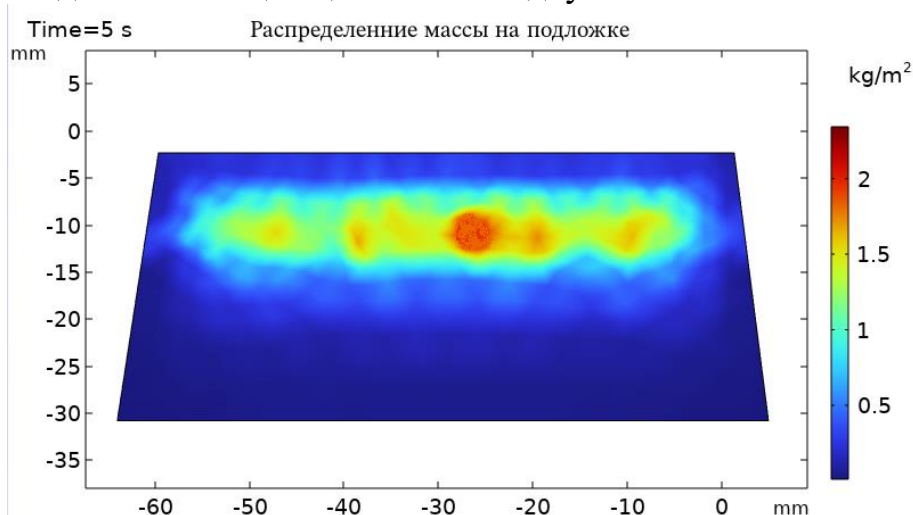


Рисунок 4. Распределение массы порошка на выходе из насадки

Согласно проведенному расчету и полученным экспериментальным данным, рекомендуемая начальная скорость частиц диаметром до 100 мкм при прохождении границы раздела находится в интервале от 1,0 м/с и более, что позволяет определять оптимальные режимы подачи порошкового материала при моделировании процесса в программном обеспечении Comsol-Multiphysics. При меньшем значении скорости движения частиц их проникновение в расплав происходит с некоторой задержкой, в результате смачивания их поверхности. Далее конвекционные потоки равномерно распределяют легированный материал по глубине ванны расплава.

В **Главе 4** приведены результаты работ по легированию поверхностей с использованием различных оптических головок и способов подачи материала. Проведен регрессионный анализ технологических режимов. Выбраны основные диапазоны режимов и приведены результаты по легированию образцов.

Основной принцип разрабатываемой технологии заключается в создании на поверхности изделия линейной протяженной зоны расплавленного металла в области воздействия лазерного излучения и её непрерывном смещении по поверхности при внедрении примесей порошковых веществ по всей длине ванны расплава. Скорость процесса лазерного легирования, при установленной мощности лазерного излучения, выбирается таким образом, чтобы обеспечивалось проплавление основного металла на заданную глубину. Основным условием является то, что доля внедренных в расплав частиц существенно не изменяет размер детали после кристаллизации расплавленного металла.

Уравнения регрессии для определения глубины, твердости зоны легирования и ЗТВ в кодированных переменных имеют вид:

$$\begin{aligned}
H1 &= 0,758 + 0,0862 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) - 0,0938 \cdot (V - 3) + 0,0388 \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) + 0,043 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \\
&\quad \cdot (V - 3) - 0,0188 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) + 0,0112 \cdot (V - 3) \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) \\
H2 &= 711,25 - 17,5 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) + 6,25 \cdot (V - 3) - 33,75 \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) - 5 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) \\
&\quad + 31,25 \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) \cdot (V - 3) - 15 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \cdot (V - 3) \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) \\
H3 &= 3,6075 + 0,21 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) - 0,215 \cdot (V - 3) + 0,15 \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) + 0,0225 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \\
&\quad \cdot (V - 3) - 0,0175 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right) + 0,025 \cdot \left(\frac{W - 9500}{500}\right) \cdot (V - 3) \\
&\quad \cdot \left(\frac{d - 7}{1,5}\right)
\end{aligned} \tag{8}$$

Изменяемыми параметрами являются: W – мощность лазерного излучения, V – скорость процесса, d – диаметр пятна лазерного излучения. Откликами на эти параметры являются $H1$ – глубина легирования, $H2$ – твердость зоны термического влияния, $H3$ – глубина зоны термического влияния.

На Рисунке 5 представлены графики зависимостей глубины легирования, твердости и зоны термического влияния (ЗТВ) от скорости процесса и мощности лазерного излучения при диаметре пятна лазера 8,5 мм.

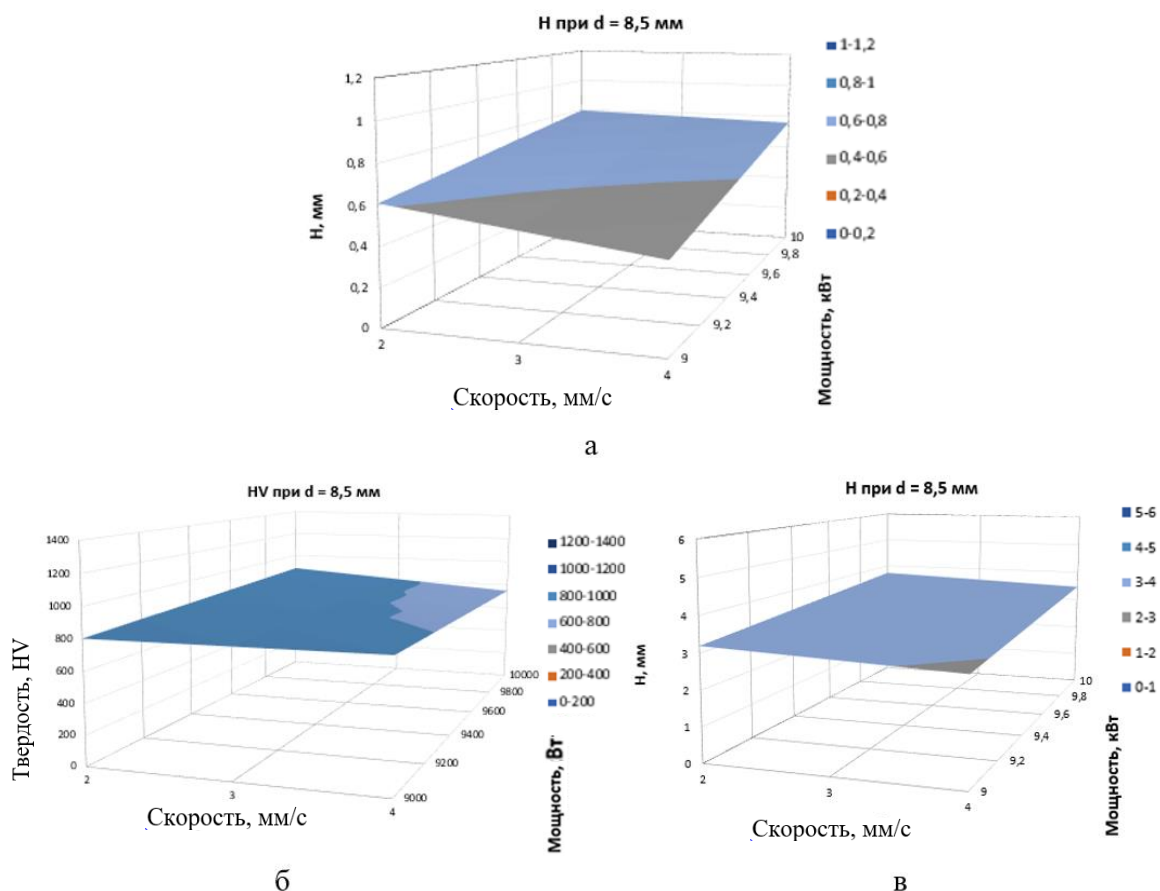


Рисунок 5. Графики зависимости глубины зоны легирования (а), твердости легированного слоя (б) и зоны термического влияния (в) от скорости процесса и мощности излучения при диаметре пятна 8,5 мм

По результатам анализа установлено, что наиболее благоприятный диапазон мощности лазерного излучения составляет от 3000 до 10000 Вт, при скорости процесса от 0,5 до 4 мм/сек, а улучшение требуемых свойств поверхностного легированного слоя возможно при подаче легирующих частиц в диапазоне масс 7,5 – 12,5 грамм на 6500 мм². На основании полученных расчетов определены оптимальные режимы обработки поверхности, использованные в ходе проведения научно-исследовательских работ. Скорость, мм/с

В Главе 5 приведены результаты исследований полученных образцов, выполнен микроструктурный и химический анализ легированной зоны. Определены механические свойства поверхностей легированных образцов. Проведены испытания конструкционных видов сталей 20X и 40XH2MA на абразивный износ, а также испытания инструментальной стали У16 на высокотемпературный износ. Разработаны технологические рекомендации и выполнено легирование поверхностей шеек валов и валков прокатных станов.

С учетом полученных по результатам регрессионного анализа данных, проведено исследование влияния количества порошкового материала на структуру и твердость стали при лазерном легировании. Элементный анализ показал, что во всем легированном слое концентрация легирующих элементов близка по всей глубине, что свидетельствует о равномерном распределении при внедрении в поверхность металла подложки.

Наличие пересыщенного твердого раствора с мелкодисперсными упрочняющими фазами включений в зоне расплава после быстрого остывания способствует не только закалке, но и повышению твердости, жаростойкости и коррозионной стойкости изделий. Лазерное легирование поверхности деталей из жаропрочных сплавов теплостойкими порошками позволяет не только увеличить закалкой твердость материала в зоне обработки, но и повышает термическую стабильность при высоких рабочих температурах и нагрузках.

Легирование стали 20X для увеличения износостойкости целесообразно осуществлять с использованием порошковых материалов на основе железа. Наилучшие результаты получены при легировании порошком FeVCr. Потеря массы легированного образца (0,0164 г.) практически в три раза меньше, чем у эталонного из стали 20X (0,0445 г.), что позволяет сделать вывод о перспективности использования данного материала для увеличения износостойкости деталей, изготовленных из низкоуглеродистых сталей.

Сталь 40XH2MA после легирования поверхности порошком на основе колотого карбида вольфрама обладает повышенными значениями износостойкости. Наилучшие результаты получены при испытании образца, легированного порошковым материалом WC на основе карбида вольфрама (0,0100 г.). Стоит отметить, что в данном случае потеря массы в почти три раза ниже чем при испытании закаленного нелегированного образца из стали 40XH2MA (0,0284 г.), что позволяет сделать вывод о перспективности применения технологии лазерного легирования с применением порошковых материалов на основе высокотвердых карбидов вольфрама.

Легированные образцы из стали У16, при испытании в паре с контртелом из Стали ШХ15 и комнатной температуре имеют средний по длине пробега коэффициент трения в диапазоне от 0,59 до 0,66. Износ легированных образцов на порядок ниже, чем у исходного образца ($6,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}$) и составляет от $2,8 \cdot 10^{-6}$ до $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

Испытания при температуре 800°C проводились в паре с керамическим стойким к высоким температурам шариком из Al_2O_3 . Коэффициент трения в среднем по длине пробега исходного образца стали У16 в паре с ним составлял 0,53, а износ образца - $4,4 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, контртела - $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Образцы Стали У16 с легированной поверхностью (TaC, TiB₂, TiC и закаленный образец) при испытании в паре с контртелом имели средний по длине пробега коэффициент трения в диапазоне от 0,44 до 0,57. Износ легированного образца составил от $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, а износ контртела находился в диапазоне от $4,9 \cdot 10^{-6}$ до более чем $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

По результатам проведенных исследовательских работ были разработаны технологические рекомендации для осуществления процесса легирования поверхностей металлических изделий (валов и валков).

С использованием подобранных режимов выполнено поверхностное лазерное легирование шеек вала порошком WC с предварительным нанесением материала на обрабатываемую поверхность и последующим сканированием лазерным лучом (Рисунок 6).

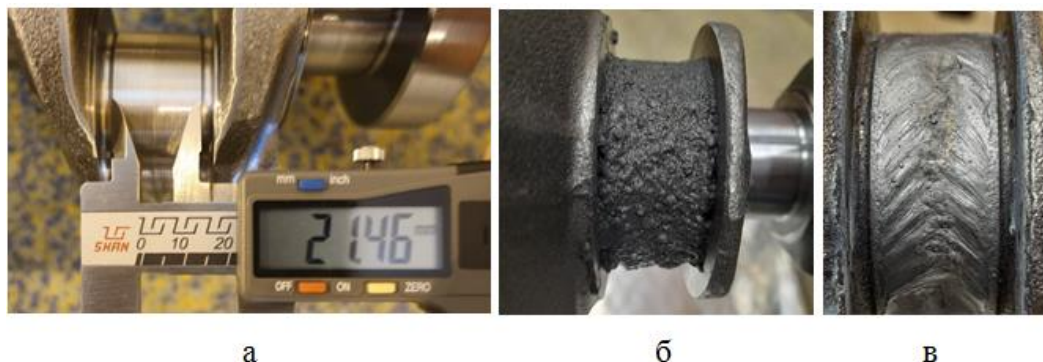


Рисунок 6. Внешний вид шейки вала до лазерной обработки (а), шейка с нанесенным материалом (б) и шейка после легирования (в)

Также с использованием подобранных режимов выполнено поверхностное лазерное легирование рабочих поверхностей валков прокатного стана порошком на основе TaC (Рисунок 7).



Рисунок 7. Внешний вид валка до легирования (а) и после легирования (б)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения высокоэффективных процессов лазерного легирования для повышения механических и химических свойств поверхностей стальных деталей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технология широкополосного лазерного легирования поверхностей сталей различными порошками с использованием высокомоощного сканатора, формирователя линейного пятна, а также щелевой насадки для подачи порошкового материала. Регрессионный анализ процесса позволил определить оптимальные диапазоны технологических параметров, требуемых для обеспечения высокого качества легированного слоя.
2. Для расширения технологических возможностей процесса легирования смоделированы и разработаны новые конструкции оптической головки и щелевой насадки для подачи присадочного материала в область ванны расплава. Это позволило формировать пятна лазерного излучения прямоугольной формы размером до 80×8 мм и квадратной формы размером до 20×20 мм, обеспечивая плотность мощности до $0,08 \cdot 10^6$ Вт/см² и нагрев поверхности металла до температуры плавления свыше 1520 °С при скорости перемещения от 0,03 до 0,6 м/мин. В результате чего ширина легирования увеличилась до 60 мм.
3. Разработана физическая модель процесса широкополосного лазерного легирования поверхности стали. На её основе создана математическая модель, позволившая решить сопряженную задачу теплопроводности, динамики ванны расплава и кинетики движения частиц в ней.
4. С использованием расчётной модели установлено, что минимальная скорость движения частиц диаметром 20 мкм, требуемая для их проникновения в ванну расплава, составляет от 1,75 м/сек, а для частиц диаметром 100 мкм от 1,0 м/сек. Показано, что время проникновения в расплав зависит от их начальной скорости.
5. Теоретически и экспериментально показано, что при широкополосном лазерном легировании поверхности, порошками различного состава, за один проход, с применением высокомоощных источников излучения, легирование возможно на глубину до 1,5 мм с шириной зоны обработки до 60 мм.
6. Структурный и элементный анализ легированных областей показал, что после быстрого остывания наличие пересыщенного твердого раствора с мелкодисперсными упрочняющими фазами включений в зоне расплава способствует не только закалке, но и повышению твердости и износостойкости изделий до 3 раз.
7. Теоретически и экспериментально показано, что разработанная технология эффективна и производительна для получения легированных областей на поверхностях шеек коленчатых валов и валков прокатных станов порошками на основе FeVC, WC, TiB₂, TaC, TiC с фракционным составом от 5 до 150 мкм.
8. Разработаны технологические рекомендации по применению широкополосного лазерного легирования сталей 20Х, 40ХН2МА и У16 порошками WC, FeVCr, TaC применительно к шейкам коленчатых валов и валков прокатных станов.
9. Полученная технология может использоваться для различных видов изделий.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Способ формирования масштабируемого квадратного светового пучка. / Хриптович Е. В. [и др.] // Патент РФ № 2834671, 12.02.2025 г.
2. Хриптович Е. В., Шиганов И. Н., Грезев Н. В. Моделирование процесса широкополосного лазерного легирования. // Технология машиностроения. №02. 2024. С. 26 – 33. (0,5 п. л. / 0,4 п. л.).
3. Повышение эксплуатационных свойств поверхностей металлов с применением высокомоощных волоконных лазеров. / Е. В. Хриптович [и др.] // Технология машиностроения. №03. 2023. С. 19 – 28. (0,63 п. л. / 0,33 п. л.).
4. Сравнительный анализ характеристик бандажей колёсных пар, закалённых с использованием лазерного и плазменного источника тепла. / Е. В. Хриптович [и др.] // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 3(100). С. 6 – 12. (0,44 п. л. / 0,35 п. л.).
5. Высокопроизводительное лазерное легирование низкоуглеродистой стали. / Е. В. Хриптович [и др.] // Сварочное производство. №11. 2022. С.52 – 59. (0,5 п. л. / 0,32 п. л.).
6. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser Processing. / E.V. Khriptovich [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85. № 12. P. 2092-2098. (0,38 п. л. / 0,2 п. л.).
7. Modeling of laser surface modification processes of tool steel to predict the temperature distribution and modification zone. / E.V. Khriptovich [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2036. № 1. P. 012038. (0,29 п. л. / 0,16 п. л.).
8. Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы деталей машин. / Е. В. Хриптович [и др.] // Фотоника. 2017. Т. 63. № 3. С. 28 – 35. (0,44 п. л. / 0,22 п. л.).