

На правах рукописи

УДК 621.793

Шмелев Сергей Андреевич

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО
ПРОФИЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНУЮ ОБРАБОТКУ
ГРЕБНЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

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

Научный руководитель

Богданов Александр Владимирович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Аракелян Сергей Мартиросович
доктор физико-математических наук, профессор,
Владимирский государственный университет
им. Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых,
заведующий кафедры Физики и
прикладной математики

Горный Сергей Георгиевич
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Лазерный центр»
Генеральный директор

Ведущая организация:

Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

Защита состоится «23» декабря 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7(499)267-09-63.

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 « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.06
кандидат технических наук, доцент



А. В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Применение лазерных технологий для обработки изделий транспортного машиностроения с целью повышения эксплуатационных свойств, в частности, износостойкости до сих пор остается актуальной задачей. При этом обработка лазерным лучом зачастую используемой круглой формы малопроизводительна и имеет отдельные недостатки. Применение лазерного луча линейной формы позволяет повысить производительность обработки и увеличить износостойкость трущихся поверхностей, таких как гребни железнодорожных колес. Интенсивный износ контактных поверхностей колесных пар, наряду с дефектами контактно-усталостного происхождения, приводит к значительному увеличению расходов на эксплуатацию подвижного состава и способствует снижению безопасности при перевозке грузов и пассажиров на железнодорожном транспорте. Известно, что износ гребня является самым распространенным дефектом колесной пары.

Сегодня на сети железных дорог России и СНГ применяется множество различных способов снижения износа контактных поверхностей железнодорожных колес. Одним из самых эффективных способов повышения износостойкости колес является локальное лазерное воздействие на них.

Работы по исследованию процессов обработки лазерами различных типов проводили отечественные ученые: Сафонов А.Н., Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Югов В.И., Журавель В.М., а также зарубежные: Motoyama H., Seifert M., Dinesh P., Nath A., Sarkar S. и др.

Благодаря интегральному перевесу по совокупности факторов: электрооптическому КПД, долговечности и ресурсу работы, форм-фактору, простоте сервисного обслуживания и эксплуатации, себестоимости владения и цене волоконные лазеры имеют доминирующее преимущество на мировом рынке лазерной техники и являются на сегодняшний день самым современным и технологичным оборудованием, прошедшим необходимую апробацию.

Разработка оборудования и технологического процесса качественной и производительной лазерной обработки с использованием волоконных лазеров является сложной и многофакторной задачей, сопряженной с большим объемом экспериментальных работ. Для оптимизации технологического процесса обработки и увеличения его производительности использовался оптический линейный формирователь -

оптическая схема для гауссовых пучков, позволяющая получить в плоскости обработки распределенный источник излучения – линейный профиль лазерного пятна. Предложенный оптический линейный формирователь состоит из цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля.

Исходя из вышеперечисленного, задача создания оборудования, позволяющего получить линейный профиль излучения для лазерной обработки гребней железнодорожных колес является актуальной.

Цель работы: Создание оборудования, позволяющего формировать линейный профиль излучения волоконного лазера для увеличения производительности обработки гребней железнодорожных колес.

Основные задачи работы:

1. Выполнение анализа повреждаемости колесных пар за период не менее 5 лет и выделение доминирующих типов дефектов, определение геометрии контактной поверхности колеса, требующей упрочнения;
2. Разработка математических моделей и определение конфигураций оптических схем для задачи лазерной обработки железнодорожных колес с учетом требуемой геометрии лазерного пятна;
3. Создание экспериментальной установки для проведения исследований взаимодействия излучения иттербиевого волоконного лазера с колесной сталью. Разработка методики оценки качества процесса лазерной обработки колесной стали;
4. Разработка математических моделей, описывающих процессы лазерной обработки колесной стали для оптимизации проведения экспериментов;
5. Проведение экспериментальных исследований, разработка регрессионных моделей зависимости характеристик зоны лазерного воздействия от параметров технологических режимов;
6. Определение величины интенсивности линейного изнашивания для образцов из колесных и рельсовых сталей;

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Расчетным путем на основе разработанной математической модели установлено, что зона лазерного воздействия, при обработке линейным профилем излучения волоконного лазера колесной стали марки 2, составляет 19 мм на поверхности заготовки и 16 мм на глубине 1,6 мм, а максимальная температура в ЗЛВ не превышает температуры её плавления и составляет 1420 °С, что обеспечивает высокую производительность и требуемое качество обработки.

2. Экспериментально установлено, что при обработке колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера с пиками интенсивности на краевых участках оптимальный диапазон варьирования параметров дефокусировки ограничен интервалом 315÷375 мм, плотности мощности излучения - интервалом $7,7 \div 5,3 \cdot 10^3$ Вт/см². В этих диапазонах зона лазерного воздействия представляет собой область с твердыми слоями, чередующуюся по глубине с мягкими и пластичными прослойками толщиной от 30 до 50 мкм в переходной зоне. Это увеличивает прочность сцепления ЗЛВ и основного металла и повышает стойкость к хрупким разрушениям.

3. Теоретически и экспериментально показано, что при воздействии линейным профилем излучения волоконного лазера на колесную сталь скорости охлаждения материала лежат в интервале от 250 до 758 °С/с. Такой характер лазерной обработки приводит к получению износостойкого слоя на поверхности колеса и снижению интенсивности линейного изнашивания в 2,8 раза.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработаны режимы лазерной обработки колесной стали с использованием волоконного лазера и оптического линейного формирователя, позволяющие достигать увеличенной глубины зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) до 1,65 мм без оплавления поверхности при обеспечении средней микротвердости на поверхности обрабатываемого материала 840 HV.

2. Для оптимизации технологического процесса обработки колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера разработаны регрессионные модели зависимости характеристик зоны лазерного воздействия от параметров технологических режимов.

3. Показано, что при обработке колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера скорость изнашивания образцов из колесной и рельсовой стали уменьшается даже при увеличении твердости одного из элементов данной трибосистемы.

4. Разработана технологическая установка, позволяющая формировать линейный профиль излучения волоконного лазера для достижения высокой производительности и качества лазерной обработки гребней железнодорожных колес.

Методы исследования состояли из стандартных и специально разработанных микрометрических, оптико-физических, и расчетных методов, базирующихся на применении разработанной технологической

установки, измерительных приборов и устройств. Эксперименты по лазерной обработке выполнялись с использованием линейного профиля излучения волоконного лазера - оптической схемы для гауссовых пучков.

Расчет температурных полей и скоростей охлаждения заготовки при ее обработке линейным профилем волоконного лазера проводился в интегрированном программном продукте «ANSYS», являющимся готовым решением для моделирования сложных физических процессов, протекающих в различных средах. Разработка регрессионных моделей проводилась на базе стандартных модулей программы Tibco Statistica.

Трибологические испытания образцов на износостойкость проводились на машине трения МТУ-01 по методу искусственных баз в соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 23.301-78 «Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок».

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением общих положений естественных наук при выполнении теоретических и расчетных исследований, использованием современных программных продуктов и алгоритмов, проверена по известным критериям и подтверждается данными экспериментов, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Определение рационального интервала плотности мощности лазерного излучения для формирования в зоне лазерного воздействия закалочной структуры мартенситного типа.
2. Технологические режимы лазерной обработки колесной стали с использованием линейного профиля излучения волоконного лазера, обеспеченные разработанным оборудованием.
3. Установленные зависимости характеристик зоны лазерного воздействия от параметров технологических режимов лазерной обработки.

Апробация работы

Доклад автора на семинаре кафедры лазерных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2020). 12-я всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России - 2019» (Москва, 2019). 5-я международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2018).

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах рецензируемых научных изданий, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 2,1 п.л., из них 1 работа опубликована в издании, индексируемом в базе данных SCOPUS.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 138 наименований и 1 Приложения. Диссертация содержит 166 страниц машинописного текста, в том числе 22 таблицы и 88 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, обозначена цель работы, основные задачи, научная новизна и защищаемые положения, практическая значимость, дано обоснование достоверности полученных данных, информация о структуре, объеме и апробации работы.

В **Главе 1** выполнена оценка современного состояния вопроса повреждаемости колесных пар, а также рассмотрены основные подходы и способы повышения износостойкости колесных пар.

Отмечено, что бороться различными способами с дефектами, связанными с равномерным износом колес на круге катания нецелесообразно, поскольку переточка колес является простым способом устранения дефекта, а равномерный прокат поверхности катания колеса удаляет зародыши контактно-усталостных повреждений, способных привести к возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения. Особое внимание следует обратить на дефекты гребня колеса, как наиболее распространенные и опасные повреждения, способные привести к выкатыванию колеса на головку рельса и крушению подвижного состава.

Технологии увеличения износостойкости гребней железнодорожных колес, такие как плазменная и ТВЧ закалка, вносят в изделие значительные растягивающие остаточные напряжения. Также существенным недостатком традиционных технологий является сложность получения контролируемой твердости и структуры обработанной поверхности.

Особенность технологии лазерного упрочнения с использованием оптического линейного формователя заключается в недостаточной изученности процессов оптимизации технологических режимов обработки, а также влияния однородного распределения с пиками интенсивности в краевых областях линейного профиля, исследованных непосредственно

после линейного формирователя, на структуру и свойства колесной стали после проведения лазерной обработки.

В **Главе 2** приведена информация о материале используемых образцов, составе и технических характеристиках основных элементов используемой технологической установки, методиках и результатах тестирования волоконного лазера и внешних оптических устройств, а также проведено моделирование оптических схем, расчет и экспериментальная оценка характеристик лазерного пятна, используемого для обработки, разработана методика анализа качественных показателей лазерной обработки колесной стали.

Образцы для исследований были вырезаны из обода вагонного колеса, химический состав и механические свойства материала удовлетворяли требованиям ГОСТ 10791-2011 - Колеса цельнокатаные. Технические условия.

Для выполнения экспериментальных исследований лазерной обработки образцов из колесной стали была создана технологическая установка, в состав которой входил непрерывный иттербиевый волоконный лазер со средней выходной мощностью 10 кВт и диаметром сердечника волокна 200 мкм, оптический линейный формирователь на базе призмы Френеля и ортогонально расположенной ей цилиндрической линзы. Оптический формирователь перемещался по заданной траектории с помощью роботизированного манипулятора KUKA KR-60 HA. Образцы закреплялись неподвижно на монтажном столе. Лазерный источник и оптическая головка охлаждались с использованием чиллера типа вода – воздух. Выбор основных компонентов экспериментальной технологической установки был сделан исходя из необходимой плотности мощности и требуемой геометрии лазерного пятна.

Для определения оптимальной конфигурации и дефокусировки профиля оптического формирователя было проведено его моделирование в среде ZEMAX и Mathcad. На Рисунках 1, 2 и 3 представлены результаты моделирования оптического линейного формирователя.

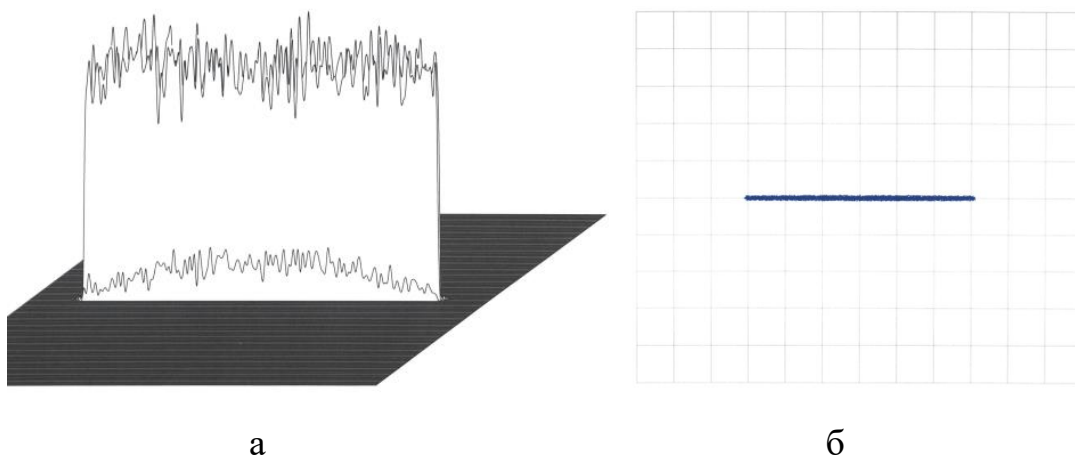


Рисунок 1.

Моделирование оптической схемы на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля (а) и пятно, получаемое в фокальной плоскости(б)

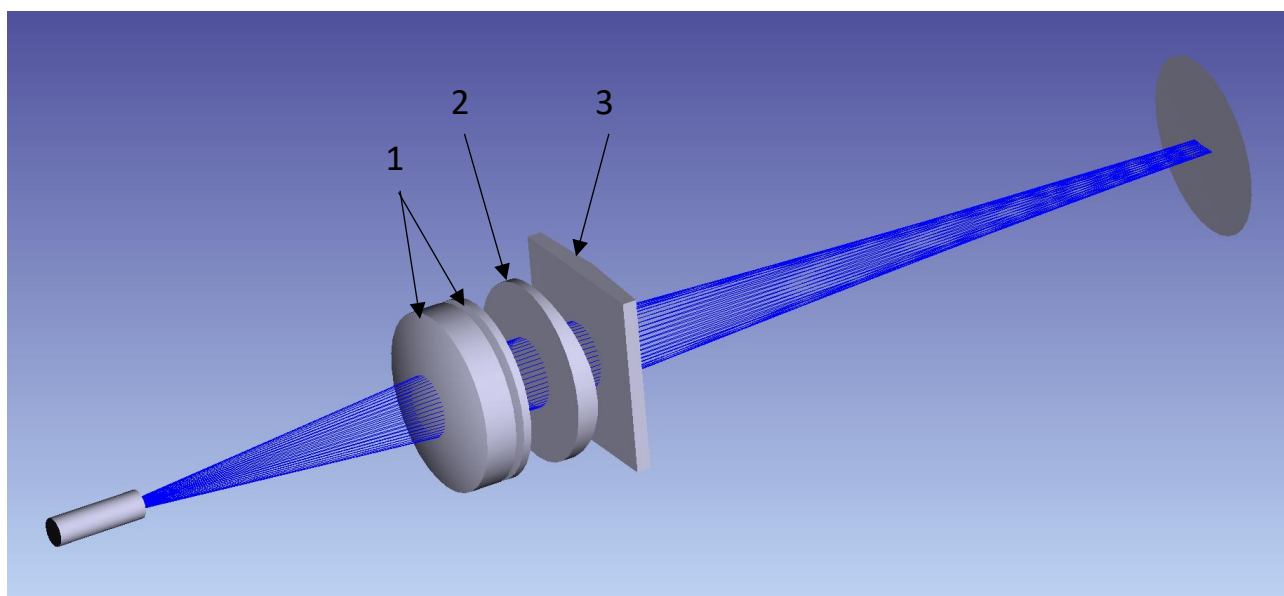


Рисунок 2.

3D модель оптической схемы на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля
1 – линзы коллиматора, 2 – цилиндрическая линза, 3 – призма Френеля

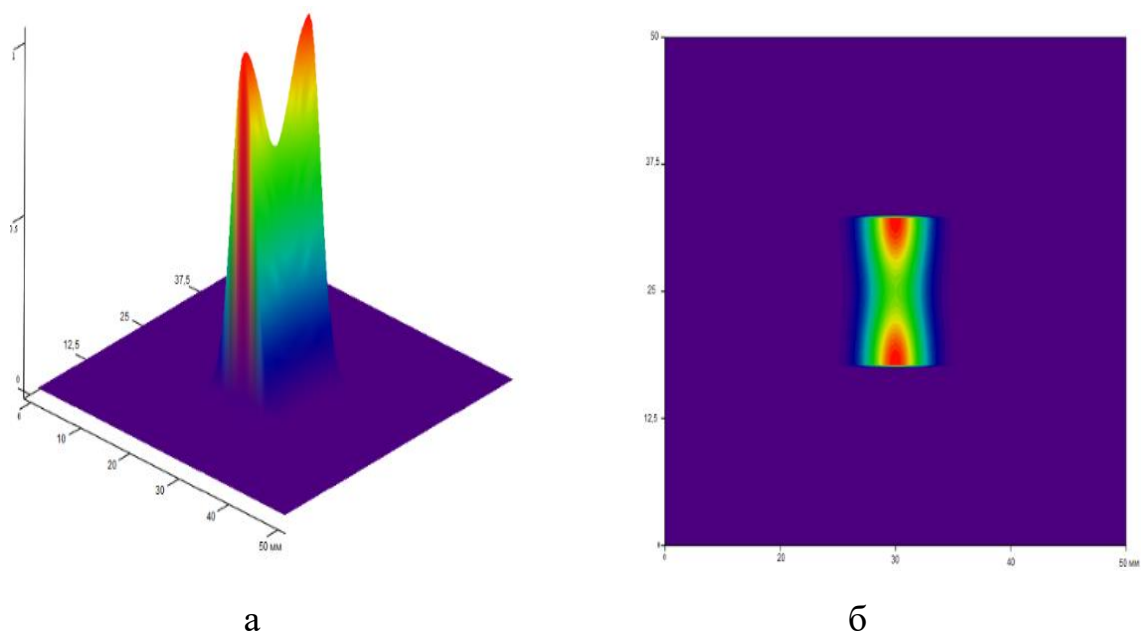


Рисунок 3.

Моделирование профиля (а) и пятна (б) оптического формирователя с учетом дефокусировки излучения

Экспериментальная оценка профиля лазерного излучения после оптического формирователя проводилась на специализированном стенде с применением измерительного оборудования: измерителя качества лазерного пучка Primes focus monitor FM 120 и измерителя средней выходной мощности Primes power monitor PM 48, а также иттербиевого волоконного лазера ЛС-10 с диаметром жилы волокна 200 мкм и оптического линейного формирователя.

В результате тестирования получен линейный профиль излучения волоконного лазера на выходе оптического формирователя с пиками интенсивности при дефокусировке. Оптимальная ширина профиля с учетом дефокусировки составляет от 17 до 19 мм. На Рисунке 4 представлены параметры линейного профиля оптического формирователя, определенные экспериментально. Данные параметры хорошо согласуются с расчетными значениями.

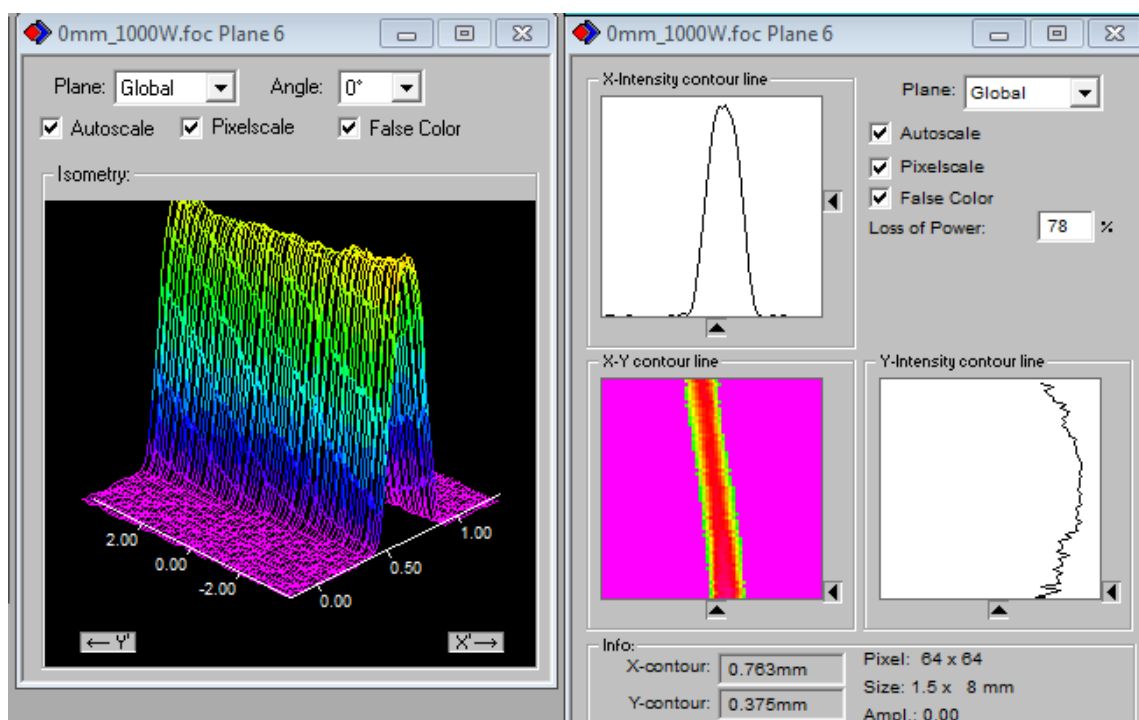


Рисунок 4.

Измерение профиля лазерного излучения после оптического линейного формователя с помощью измерителя качества пучка Primes focus monitor FM 120 и измерителя мощности Primes power monitor PM 48

Результаты измерений свидетельствуют о равномерности профиля вдоль широкой стороны. Плоская часть профиля имеет неравномерность, не превышающую 5%. Радиус профиля в поперечном сечении по оси X равен 174 мкм. Расчетный радиус равен 167 мкм. Параметры линейного профиля излучения соответствуют расчетным параметрам, что говорит о хорошей аппроксимации коллимированного излучения иттербиевого волоконного лазера гауссовым пучком. В результате измерения крутизны боковых фронтов линейного профиля излучения непосредственно после линейного формователя обнаружен пик излучения на краю профиля, возникающий вследствие дифракции излучения на ребре призмы Френеля. Величина данного пика составляет 15%.

В результате проведенного моделирования, расчетов и экспериментальных исследований установлено, что параметры качества лазерного пучка, расходимости, размеров пятен на оптических элементах и плотности мощности на линзах позволяют использовать лазер ЛС-10 с диаметром жилы волокна 200 мкм с оптическим линейным формователем, а разработанная экспериментальная технологическая установка дает возможность эффективно проводить обработку стальных

изделий, так как плотность мощности в сфокусированном пятне превышает пороговые значения.

Для определения критериев качества процесса обработки колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера были разработаны основные требования и показатели качества, оценка которых выполнялась с использованием современного измерительного оборудования. Оценка зоны лазерного воздействия, структуры стали, наличия дефектов и глубины упрочненного слоя выполнялась с использованием оптического микроскопа Olympus GX-51. Измерения микротвердости на поперечных шлифах приводились микротвердомером DURASCAN – 70 в соответствии с ГОСТ 9450-76.

В **Главе 3** была выполнена расчетная оценка температурных полей и скоростей охлаждения при обработке колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера посредством математического моделирования процессов распространения тепла в объемном теле, используя метод конечных элементов. В работе представлены расчетные зависимости максимальной температуры и скоростей охлаждения в зоне лазерного воздействия для различной глубины в зависимости от расстояния от оси источника нагрева.

Для рассматриваемой математической модели при скорости движения источника нагрева 20 мм/с, мощности лазерного излучения 8,6 кВт и ширине линейного профиля 19 мм ширина слоя, нагреваемого до температур выше $A_{сз}$, составляет 19 мм на поверхности заготовки и 16 мм на глубине 1,6 мм, а максимальная температура нагрева в зоне лазерного воздействия не превышает температуры плавления колесной стали и составляет 1420 °С, что обеспечивает высокую производительность и требуемое качество обработки.

Установлено, что расчетные скорости охлаждения на оси источника меньше, чем на его краевых участках и лежат в интервале от 250 до 758 °С/с. Таким образом, глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности с образованием мелкодисперсных закалочных структур мартенситного типа может составить до 1,6 мм, а зона лазерного воздействия может представлять из себя геометрию слоя окружности с изменением твердости в переходной зоне.

В **Главе 4** приведена методика и результаты экспериментов по обработке колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера, построены регрессионные модели зависимости характеристик

упрочненного слоя от параметров технологических режимов, исследованы структуры упрочненных слоёв и характеристики упрочненных зон.

На основе расчетов, проведенных в Главе 3, и предварительных экспериментов были установлены диапазоны варьирования технологических параметров: мощности лазерного излучения менялась в диапазоне от 5 до 8,6 кВт, скорость перемещения от 20 до 30 мм/с, а дефокусировка от 285 до 375 мм.

В результате проведения полного факторного эксперимента по лазерной обработке колесной стали были установлены зависимости характеристик зон лазерного воздействия от параметров технологических режимов.

По экспериментальным данным были рассчитаны регрессионные модели зависимости глубины зоны лазерного воздействия (h , мм), ширины зоны лазерного воздействия на заготовке после обработки линейным профилем излучения (l , мм), и среднего значения твердости упрочненного слоя X_{HV} , от мощности лазерного излучения (P , кВт), скорости процесса обработки, (v , мм/с) и положения фокальной плоскости (F , мм). Полученные регрессионные модели записаны в виде уравнений (1), (2) и (3):

$$h = -7,221 - 0,433 \cdot P + 0,058 \cdot F - 0,0027 \cdot P \cdot v + 0,0014 \cdot P \cdot F + 0,015 \cdot P^2 - 0,0001 \cdot F^2 \quad (1)$$

$$l = -66,408 - 2,095 \cdot P + 0,513 \cdot F + 0,012 \cdot P \cdot F - 0,0003 \cdot v \cdot F - 0,095 \cdot P^2 - 0,0008 \cdot F^2 \quad (2)$$

$$X_{HV} = 332,039 - 74,883 \cdot P + 5,063 \cdot F - 0,210 \cdot P \cdot v + 0,113 \cdot P \cdot F + 4,209 \cdot P^2 - 0,010 F^2 \quad (3)$$

Анализ регрессионных моделей показывает, что границы рациональных диапазонов изменения технологических параметров лежат в диапазонах: $P=8,6$ кВт, $F=345 \div 375$ мм при скорости обработки 20 мм/с.

Лазерное упрочнение линейным формирователем на режимах со средней мощностью $P=8,6$ кВт, скоростью перемещения луча 20 мм/с и дефокусировкой $F=345 \div 375$ позволяет достичь характеристик упрочненного слоя, соответствующих основным требованиям и показателям качества обработки колесных пар.

При лазерной обработке с использованием оптического формирователя в упрочненной зоне образуется мелкодисперсная мартенситная структура. В переходной зоне наблюдается мартенситная структура, а также, по границе бывших аустенитных зерен - трооститная структура. В зоне подложки – пластинчатый перлит и ферритная сетка. Средняя микротвердость в упрочненной зоне составляет 840 HV. Обнаружено

наличие в зоне неполной закалки твердых слоев с мягкими и прослойками толщиной от 30 до 50 мкм.

Кривые контактных границ перехода профилей поверхностей «упрочненный слой» и «основной металл» для микрошлифа оптимального режима ($P=8,6$ кВт, $F=345$, $v=20$ мм/с) представлены на Рисунке 5 и 6.

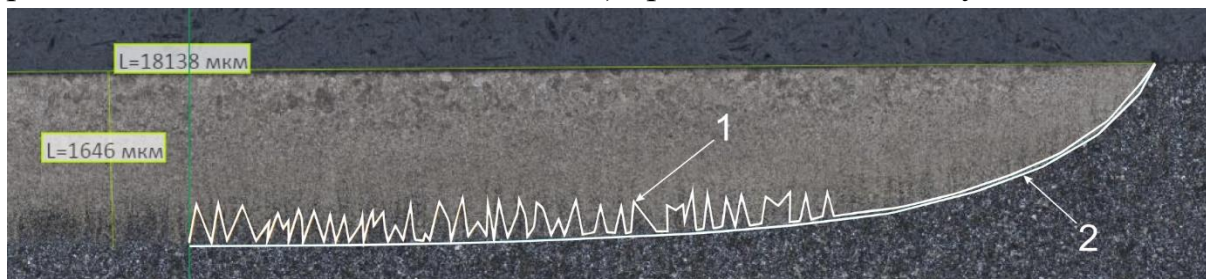


Рисунок 5.

Кривые границ перехода профилей поверхностей «упрочненный слой» и «основной металл» 1 – профиль, полученный после обработки колесной стали линейным формователем; 2 – аппроксимированный профиль без экстремумов, характерных для обработки колесной стали линейным формователем

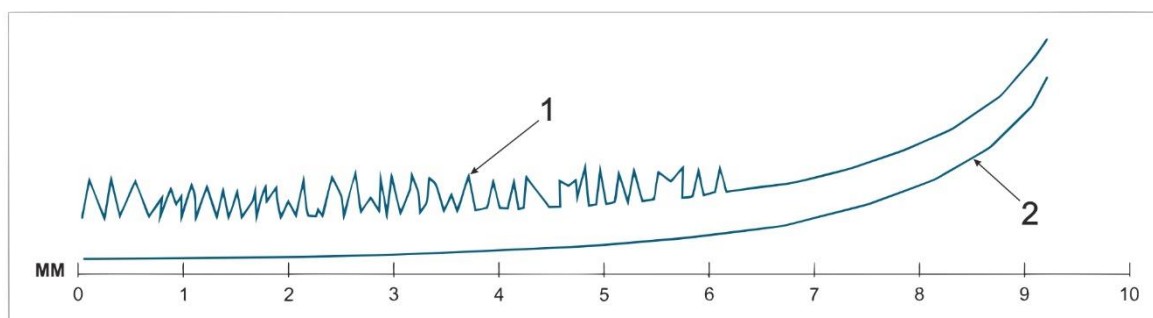


Рисунок 6.

Кривые границ перехода профилей в привязке к системе координат. 1 – профиль, после обработки линейным формователем; 2 – аппроксимированный профиль без характерных экстремумов

Как показано на Рисунке 6, профиль №1 границы перехода поверхностей «упрочненный слой» и «основной металл», полученный в результате обработки колесной стали линейным формователем, имеет длину 30,7 мм, а профиль 2, без характерных экстремумов, имеет длину 9,6 мм. Следовательно, общая площадь сопряжения поверхностей «упрочненный слой» и «основной металл» для профиля №1 выше при обработке линейным формователем.

Известно, что при взаимодействии железнодорожного колеса и рельса образуется волна микропластической деформации, вносящая в изделие сжимающие и растягивающие напряжения - усилия, приходящееся на единицу площади. Показано, что при прочих равных условиях, в случае увеличения площади контакта для профиля №1 относительно профиля №2, усилие, которое необходимо приложить для деформации профиля №1, должно быть выше усилия для профиля №2, что говорит о более высокой прочности сцепления образца с профилем №1.

Доказано, что линейный профиль волоконного лазера обеспечивает образование структуры мартенситного типа с твердыми слоями, чередующимися с мягкими и пластичными прослойками толщиной от 30 до 50 мкм в зоне неполной закалки, что положительно влияет на увеличение сцепления зоны лазерного воздействия и основного металла, и придает упрочненному слою дополнительную вязкость при сохранении общей твердости.

В **Главе 5** приведена методика проведения испытаний на износостойкость и оценки механических свойств колесной стали после лазерной обработки.

Установлено, что при увеличении после лазерной обработки твердости образцов из колесной стали в 3,3 раза с 255 до 840 HV величина интенсивности линейного изнашивания снизилась в 2,8 раза по сравнению с незакаленными образцами.

Доказано, что величина интенсивности линейного изнашивания рельсовых контробразцов, испытанных при 100% проскальзывании в паре трения с обработанными образцами из колесной стали снизилась на 9% по сравнению с контробразцами, испытанными в паре трения с колесной сталью, находящейся в исходном состоянии.

Экспериментально подтверждено, что при больших величинах проскальзывания, которые соответствуют условиям эксплуатации пары трения «гребень колеса – головка рельса», скорость изнашивания и колесных, и рельсовых образцов уменьшается даже при увеличении твердости одного из элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Для определения оптимальных конфигураций оптических схем было проведено математическое моделирование и выполнен расчет параметров обрабатывающего лазерного пучка линейного профиля излучения волоконного лазера.

2) Разработана технологическая установка на базе непрерывного иттербиевого волоконного лазера и линейного формирователя с пиками интенсивности на краевых участках, позволяющего получать в сфокусированном лазерном пятне плотности мощности на уровне $2,8 \cdot 10^5$ Вт/см², что дает возможность эффективно проводить обработку стальных изделий.

3) Расчетным путем на основе разработанной математической модели установлено, что зона лазерного воздействия, при обработке линейным профилем излучения волоконного лазера колёсной стали, составляет 19 мм на поверхности заготовки и 16 мм на глубине 1,6 мм, а максимальная температура в ЗЛВ не превышает температуры её плавления и составляет 1420 °С.

4) Построены регрессионные модели зависимости характеристик ЗЛВ от параметров технологического режима. Установлено, что границы рациональных диапазонов изменения технологических параметров лежат в диапазонах: $P=8,6$ кВт, $F=345 \div 375$ мм при скорости обработки 20 мм/с. Характеристики ЗЛВ удовлетворяют показателям качества лазерной обработки колесных пар. Глубина упрочнения составляет до 1,65 мм при твердости от 780 до 840 HV.

5) Экспериментально установлено, что при обработке колесной стали линейным профилем излучения волоконного лазера с пиками интенсивности на краевых участках оптимальный диапазон варьирования параметров дефокусировки ограничен интервалом $315 \div 375$ мм, плотности мощности излучения - интервалом $7,7 \div 5,3 \cdot 10^3$ Вт/см². В этих диапазонах зона лазерного воздействия представляет собой область с твердыми слоями, чередующуюся по глубине с мягкими и пластичными прослойками толщиной от 30 до 50 мкм в переходной зоне. Это увеличивает прочность сцепления ЗЛВ и основного металла и повышает стойкость к хрупким разрушениям.

6) Показано, что при увеличении после обработки линейным профилем излучения волоконного лазера твердости колесной стали в 3,3 раза с 255 до 840 HV величина интенсивности линейного изнашивания для упрочненных образцов снизилась в 2,8 раза по сравнению с необработанными.

7) Разработаны технологические рекомендации обработки линейным профилем излучения волоконного лазера гребней железнодорожных колёс, обеспечивающие соответствие требованиям и показателям качества согласно ТУ 0943-218-01124323-2006.

СПИСОК ТРУДОВ

- 1) А.В. Богданов, Н.В. Грезев, С.А. Шмелев. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес // Научные технологии в машиностроении. 2015. №6. С. 30-34. (0,35 п.л. / 0,25 п.л.).
- 2) Упрочнение колесной стали волоконными лазерами / С.А. Шмелев [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2016. №9. С. 30-37. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).
- 3) Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий на примере железнодорожных колес / А.В. Богданов, В.И. Соколов, С.А. Шмелев // Научные технологии в машиностроении. 2017. №10. С. 32-38. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).
- 4) Современное состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар и методы снижения их износа и контактной усталости. / Богданов А.В., Шмелев С.А. // Научные технологии в машиностроении.- 2018. №9. С. 14-20. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.).
- 5) Лазерное упрочнение сталей прямоугольным пятном для повышения ресурса их работы / С.А. Шмелев [и др.] // Фотоника. 2019. №6. С. 532-537. (0,35 п.л. / 0,2 п.л.).
- 6) Increasing microhardness and hardening depth of grade 2 wheel steel using fiber lasers. / A.V. Bogdanov, S.A. Shmelev [et al.] AIP Conference Proceedings 2171. 2019. Vol. 2171 Issue 1, p200004-1-200004-7. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).