

На правах рукописи

УДК 621.793

Пересторонин Александр Владимирович

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ
БАНДАЖНЫХ СТАЛЕЙ КАРБИДОМ ВОЛЬФРАМА

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

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

Мисюров Александр Иванович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Низьев Владимир Григорьевич
доктор физико-математических наук, профессор,
Институт проблем лазерных и информационных
технологий РАН – филиал Федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-исследовательский
центр «Кристаллография и фотоника» Российской
академии наук», начальник отдела лазерных технологий

Ставертий Антон Яковлевич
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью «КЕМИКА»
(Группа Компаний «ПОЛИТЕГ-МЕТ»), инженер

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится « 29 » _____ мая 2019 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 « _____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.06
доктор технических наук, доцент



В. П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

При эксплуатации грузовых локомотивов существенное ограничение на пробег между техническими обслуживаниями накладывает необходимость регулярной обточки бандажей колёс. По данным АО «ВНИИЖТ», наиболее частой её причиной становится предельный износ гребня по толщине. Недостаточный межремонтный пробег приводит к необходимости преждевременных выкаток колесных пар из-под локомотива для смены бандажей. В связи с этим, задача повышения пробега и доведения ресурса бандажей до уровня 600-800 тыс. км является актуальной, так как позволит совместить обточку колёс с плановым сервисным обслуживанием локомотивов.

Добиться такого ресурса без изменения состава материала бандажа невозможно, применение износостойких материалов для его изготовления является дорогостоящим, использование наплавки приведет к значительным изменениям технологии производства изделия.

В связи с быстрым развитием оборудования для обработки высококонцентрированными источниками энергии, в последние годы в мире растет интерес исследователей к процессам поверхностного модифицирования с введением твердых керамических частиц. Получаемые слои обладают высокой износостойкостью при малой объемной доле армирующих частиц. Однако, вопросы оптимизации параметров процесса введения частиц, возможность получения слоёв достаточной толщины с однородным распределением частиц по глубине, а также влияние вводимых частиц на структуру стальной матрицы в достаточной степени не изучены.

Цель работы: разработать технологию получения на поверхности бандажной стали износостойкого покрытия с использованием лазерно-порошкового модифицирования карбидом вольфрама.

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

1. Выбор вида и состава армирующих частиц, оборудования и способа их введения для получения износостойких металлокерамических слоев на поверхности бандажа железнодорожных колёс методом лазерного модифицирования.

2. Разработка и анализ моделей, описывающих введение частиц монокарбида вольфрама в жидкую сталь при соосной подаче порошка с лазерным лучом, определение особенностей использования частиц различных диаметров в диапазоне от 50 до 150 мкм.

3. Установление взаимосвязи параметров режима лазерного модифицирования бандажной стали с характеристиками упрочненных слоёв и выбор их оптимальных значений при введении частиц WC. Построение регрессионных моделей влияния мощности излучения, скорости обработки и расхода порошка на глубину упрочненного слоя, высоту валика и содержание армирующих частиц.

4. Исследование особенностей структурообразования при лазерном модифицировании поверхностного слоя бандажной стали с введением армирующих частиц WC.

5. Исследование износостойкости упрочненных слоёв, полученных при использовании оптимальных режимов модифицирования.

6. Разработка технологической инструкции по получению износостойких поверхностных упрочненных слоёв в бандажной стали методом лазерного модифицирования с введением WC.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Расчетным путем, на основе физико-математической модели движения упрочняющих частиц в объёме расплавленного металла, установлено, что частицы WC диаметром от 50 мкм, имеющие скорость полета от среза сопла более 6 м/с, способны преодолевать силы поверхностного натяжения расплава и достигать фронта кристаллизации жидкой ванны, форма которой определяет распределение их по глубине слоя.

2. Экспериментально установлена закономерность изменения содержания упрочняющих частиц в композитном слое и эффективности использования порошка в зависимости от параметров режима обработки. Показано, что объемная доля карбида вольфрама возрастает линейно с ростом погонного расхода порошка в интервале от 0,02 до 0,03 г/мм. При скоростях обработки от 10 до 12 мм/с и плотности мощности излучения около $4,8 \cdot 10^4$ Вт/см², доля WC изменяется в интервале от 8 до 12 %, при этом обеспечивается максимальный коэффициент использования порошка.

3. Установлено, что оптимальный диапазон модифицирования частицами WC ограничен значениями от 8 до 10 %. В этом диапазоне износостойкость поверхностного слоя повышается более чем на порядок по сравнению с необработанной бандажной сталью. При большем содержании WC в покрытии могут образовываться трещины, а при недостатке снижается эффект упрочнения.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. На основе комплексного анализа влияния параметров режима обработки на формирование износостойкого упрочненного слоя при лазерном модифицировании поверхности бандажной стали частицами WC диаметром от 50 до 200 мкм определены их рациональные диапазоны: мощность лазерного излучения от 2800 до 3200 Вт, скорость обработки от 10 до 12 мм/с, расход порошка от 12 до 23 г/мин.

2. Разработаны регрессионные модели, связывающие основные характеристики упрочненного слоя – глубину, объемную долю армирующих частиц и высоту валика – с параметрами технологических режимов для оптимизации процесса обработки.

3. Разработаны технологические рекомендации по выполнению лазерной модификации поверхности с введением частиц WC.

Методы исследования включали в себя стандартные теоретические и экспериментальные методы. Расчеты проводились с применением программного обеспечения PTC MathCad, Microsoft Excel, построение регрессионных моделей осуществлялось с использованием стандартных модулей программы Tibco Statistica. Все образцы изготовлены в одинаковых условиях с использованием одного лазерного комплекса и одинаковых средств контроля параметров процесса. Исследования параметров структуры проводилось с применением оптических и электронного микроскопов по стандартным металлографическим методикам. Измерения твердости проводились с учетом особенностей объектов исследования на поверенном оборудовании. Исследование форм ванн проводилось по известному и ранее апробированному для процесса сварки методу с использованием нового разработанного при участии автора оборудования, а также с применением технологии трёхмерного сканирования. Исследования износостойкости проводились на специализированном оборудовании специалистами АО «ВНИИЖТ» с применением соответствующих методик.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, использованием современных стандартных программ и алгоритмов при проведении расчетов и построении моделей, осуществлением измерений на поверенном оборудовании по стандартным методикам и использованием ранее проверенных принципов при создании новых испытательных приспособлений. Она подтверждается экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленные зависимости размеров и состава упрочненных слоёв от параметров режимов лазерной обработки.
2. Результаты исследования влияния содержания частиц WC на износостойкость модифицированного слоя в бандажной стали.
3. Определение рационального интервала содержания частиц WC в модифицированном поверхностном слое бандажной стали.
4. Технологические рекомендации по выполнению лазерной модификации поверхности с введением частиц WC.

Апробация работы

1. Доклад автора на семинаре кафедры лазерных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2019).
2. IX международная конференция «Beam Technologies and Laser Application» (Санкт-Петербург, 2018).
3. XI всероссийская научно-техническая конференция «Будущее машиностроения России» (Москва, 2018).

Публикации

По результатам исследования опубликовано 5 научных работ в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и 1 статья в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS, получен один патент на полезную модель № 166551 РФ. Общий объем публикаций 1,5 п.л.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 175 наименований и 1 Приложения. Работа содержит 173 страницы машинописного текста, в том числе 41 таблицу и 81 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность работы, приведены цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности полученных результатов и информация об апробации работы.

Межремонтный пробег локомотивов обусловлен в значительной степени ресурсом бандажа по критерию износа его гребня. Существующие технологии повышения износостойкости либо не обеспечивают требуемого уровня этого показателя, либо дороги. Лазерное модифицирование потенциально позволяет решить данную проблему.

В **Главе 1** приведены свойства отечественных материалов для изготовления бандажей железнодорожных колёс и некоторых импортных аналогов, отмечены тенденции развития бандажных сталей, которые, как правило, являются углеродистыми низколегированными.

Снижения износа бандажа можно добиться оптимизацией профилей колеса и рельса, повышением эффективности контроля материала и изделия, использованием лубрикантов и другими способами, но наибольший интерес представляет локальное поверхностное упрочнение. Для локомотивных колёс такое решение наиболее рационально.

Традиционной технологией упрочнения является плазменная закалка, применение которой позволяет повысить межремонтный пробег до 3 раз, но этого недостаточно. Дальнейшее повышение свойств требует применения новых материалов. Наибольшей износостойкости можно добиться при создании на поверхности композитного слоя, причем введение частиц непосредственно в матрицу металла изделия позволяет сделать это с минимальными затратами порошка и искажениями поверхности детали. Применение технологии лазерного модифицирования позволяет вводить частицы соосно с лучом и добиваться более глубокого их внедрения.

На основе анализа литературы показано, что максимального снижения износа можно добиться при введении частиц монокарбида вольфрама сферической формы диаметром от 80 до 150 мкм.

Сложность применения процесса лазерной модификации заключается в том, что вопросы оптимизации параметров режимов обработки, влияния частиц на структуру матрицы и износостойкость слоя изучены в недостаточной степени. Также, одной из проблем является получение равномерного распределения упрочняющих частиц по глубине. Кроме того, при оплавлении или достаточном перегреве введенных в сталь порошинок WC на их границах возникает реакционный слой с измененным химическим составом.

В **Главе 2** приведены сведения о материале используемых образцов, использованном технологическом и исследовательском оборудовании, методиках исследований.

Все образцы, использованные в исследованиях, были вырезаны из одного банджа локомотивного колеса, химический состав и механические свойства материала удовлетворяли требованиям ГОСТ 398-2010. В работе использовался сферический порошок монокарбида вольфрама с преобладающей фракцией от 90 до 150 мкм следующего химического состава: вольфрам – основа, 3,9 % C, 0,3 % Fe, 0,2 % других элементов по массе.

Лазерное модифицирование осуществлялось на роботизированном технологическом комплексе на основе волоконного лазера ЛС-5, генерирующего непрерывное излучение на длине волны 1,07 мкм с максимальной мощностью до 5 кВт. В состав комплекса также входили система подачи аргона, порошок питатель и механизм вращения для обработки цилиндрических образцов.

Разработана методика исследования формы ванны расплава, включающая в себя удаления жидкого металла с помощью специального разработанного и запатентованного устройства, патент на полезную модель № 166551, получение 3D модели с помощью высокоточного трехмерного сканера и её последующего измерения в среде Autodesk Inventor.

Для пробоподготовки были использованы станок для механической резки, установка для запрессовки и шлифовально-полировальный станок. Для металлографических исследований применялись стереомикроскоп

Olympus SZ61 и инвертирующий металлографический микроскоп Olympus GX51, измерения твердости проводились на поверенном твердомере Виккерса EmcoTest Durascan 20 при нагрузке на инденторе 0,981 Н, электронная микроскопия проводилась на микроскопе Phenom World Phenom XL, трехмерное сканирование – с использованием 3D сканера AICON stereoSCAN.

В Главе 3 приведены результаты расчетов кинетики движения частиц монокарбида вольфрама в жидкой стали, влияние частиц на прохождение излучения до подложки, приведены оценки нагрева частиц лазерным лучом.

Для проведения расчетов кинетики движения частиц WC в жидкой стали по известным методикам были рассчитаны некоторые её физические свойства. Установлено, что при температуре 1873 К её коэффициент поверхностного натяжения и динамическая вязкость составляют 1765 мДж·м⁻² и 3,49 мПа·с соответственно, плотность равна 6664 кг·м⁻³.

На основе физики взаимодействия жидкости с вводимым в неё твердым телом были записаны и решены дифференциальные уравнения (1) и (2) для случая движения частицы через поверхностный слой и в глубине жидкой стали соответственно.

$$m^{WC} \cdot \ddot{x} + 6 \cdot \eta_{1873 K}^{st} \cdot R^{WC} \cdot \dot{x} + \left[\rho_{1873 K}^{st} \cdot g \cdot \pi \cdot x^2 \cdot \left(R^{WC} - \frac{1}{3} \cdot x \right) + \sigma_{1873 K}^{st} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot R^{WC} \cdot x - x^2} \right] - m^{WC} \cdot g = 0; \quad (1)$$

$$\text{Г.У.: } x(0) = 0, \dot{x}(0) = v_0^{WC};$$

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{wc}^3 \cdot \rho_{1873 K}^{WC} \cdot \ddot{x} + 6 \cdot \eta_{1873 K}^{st} \cdot R_{wc} \cdot \dot{x} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{wc}^3 \cdot g \cdot [\rho_{1873 K}^{st} - \rho_{1873 K}^{WC}] = 0; \quad (2)$$

$$\text{Г. У.: } x(0) = 2 \cdot R^{WC}, v_x^{WC}(0) = v_{x0}^{WC}$$

где m^{WC} – масса частицы карбида вольфрама, кг;

g – ускорение свободного падения, м·с⁻²;

$\rho_{1873 K}^{st}$ – удельная масса жидкой стали при температуре 1873 К;

V_x^{WC} – текущий объем частицы карбида вольфрама, погруженный в расплав, м³;

$\eta_{1873 K}^{st}$ – динамическая вязкость расплавленной стали при температуре 1873 К, Па·с;

R_x^{WC} – текущий радиус частицы карбида вольфрама, погруженной в расплав, м;

v_x^{WC} – текущая скорость частицы вдоль оси x , м·с⁻¹;

$\sigma_{1873 K}^{st}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой стали при температуре 1873 К, Н·м⁻¹;

l_x – текущая длина контура границы частицы и расплава, м;

R^{WC} – средний радиус частиц карбида вольфрама, м;

v_{x0}^{WC} – скорость частицы после прохождения поверхностного слоя, м·с⁻¹.

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволило построить графики движения частицы от поверхности до дна ванны расплава, представленные на Рисунке 1.

На основе расчета введения частиц в расплавленный металл установлена зависимость минимальной скорости полета частиц от их размера, в частности, для преобладающей фракции исследованного порошка (диаметром около 100 мкм) она составляет примерно 6 м/с.

Из графиков (Рисунок 1) движения видно, что частицы должны достигать дна ванны расплава в течение не более 1 мс. Это, в совокупности с проведенными расчетами движения двух последовательно входящих в жидкую сталь порошинок, показывает, что при практически реализуемых массовых расходах порошка попавшие в расплав частицы диаметром более 50 мкм должны достигнуть поверхности фронта кристаллизации.

Расчет пропускания излучения газопорошковым потоком на участке их взаимодействия показал, что максимальное снижение мощности лазерного луча на поверхности подложки может составлять 10 %. Это необходимо учитывать при выборе параметров обработки.

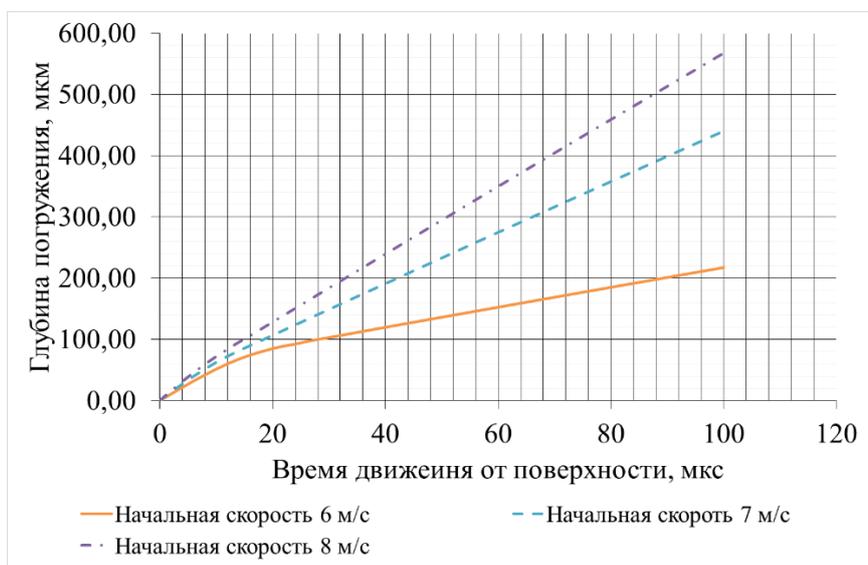
На основе расчета нагрева частиц лазерным лучом установлено, что в зависимости от размеров частиц, при используемых параметрах обработки могут реализовываться следующие варианты:

– для частиц диаметром менее 50 мкм возможно их оплавление лазерным излучением в полете к образцу, при их введении должно увеличиваться теплосодержание ванны расплава;

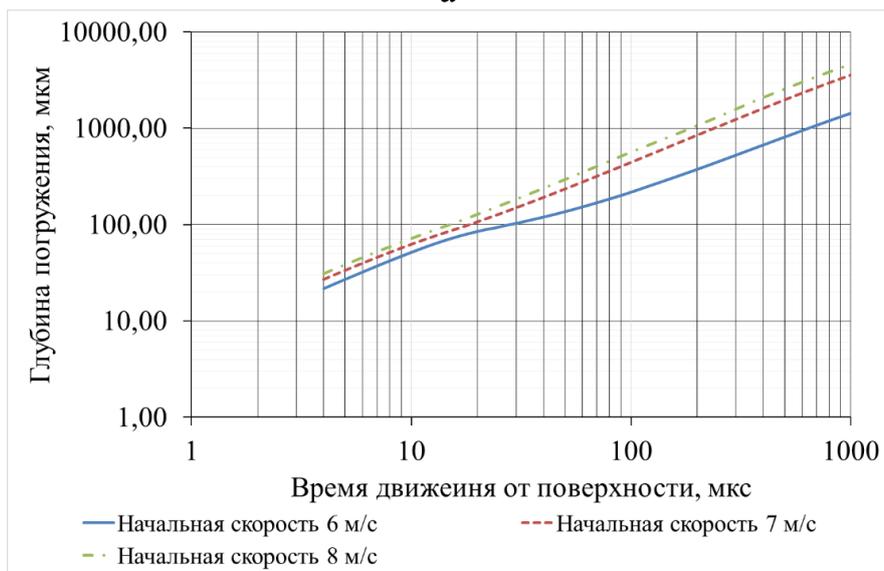
– частицы диаметром от 50 до 60 мкм могут иметь температуру выше температуры плавления стали и также могут увеличивать теплосодержание ванны расплава;

– частицы размером от 60 до 100 мкм имеют температуру, сопоставимую с температурой расплава, и, как и частицы меньших размеров, они могут включаться в интенсивный диффузионный обмен с расплавленной сталью;

– частицы диаметром более 100 мкм практически всегда имеют температуру ниже, чем температура плавления стали и могут служить центрами кристаллизации.



а



б

Рисунок 1.

График движения частиц диаметром 100 мкм от поверхности до глубины не менее 200 мкм (а) и далее в течение 1 мс (б)

В Главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований по оптимизации параметров процесса обработки, структуры упрочненных слоёв, форм ванн расплава.

На основе предварительных экспериментов были установлены диапазоны варьирования параметрами обработки: мощность излучения варьировалась в диапазоне от 2400 до 3200 Вт, скорость обработки от 10 до 15 мм/с, подача порошка в диапазоне от 12,55 до 28,61 г/мин. Для анализа влияния параметров лазерного модифицирования на характеристики упрочненных слоёв и построения соответствующих регрессионных моделей было получено 36 образцов, при мощностях излучения 2800; 3000; 3200 Вт, скоростях обработки 10; 12; 15 мм/с и массовых расходах порошка 12,55; 18,30; 23,68; 28.61 г/мин, а также дополнительно 4 образца для проверки точности прогнозирования моделей при отличных значениях мощности и скорости обработки.

Исследование влияния параметров режима на характеристики упрочненных слоёв показали, что соответствующие зависимости носят комплексный характер. На Рисунке 2 представлено влияние режима обработки на содержание армирующих частиц в упрочненном слое.

Эксперименты показали, что в интервале погонной энергии от 267 до 320 Дж/мм объемная доля WC возрастает с увеличением погонного расхода порошка. При этом максимальные значения коэффициента использования порошка находятся на уровне около 20 % в диапазоне скоростей от 10 до 12 мм/с. Рациональная, с точки зрения трещинообразования объемная доля карбида вольфрама, достигаемая при массовом расходе порошка в интервале от 12 до 23 г/мин, составляет от 8 до 10 % (Рисунок 3).

Полученные нелинейные регрессионные модели зависимости глубины упрочненного слоя H , мкм, объемной доли частиц WC ω , %, и высоты усиления u , мкм (уравнения (3), (4), (5)):

$$H = 498,131 + 0,370 \cdot P - 86,656 \cdot v + 1,302 \cdot F + 0,0102 \cdot P \cdot v - 0,00179 \cdot P \cdot F + 0,206 \cdot v \cdot F; \quad (3)$$

$$\omega = 30,573 - 0,0191 \cdot P + 0,133 \cdot v + 1,148 \cdot F + 0,00000245 \cdot P^2 - 0,0138 \cdot v^2 - 0,0158 \cdot F^2; \quad (4)$$

$$u = -267,732 + 0,109 \cdot P + 18,453 \cdot v + 8,293 \cdot F - 0,00715 \cdot P \cdot v + 0,00283 \cdot P \cdot F - 0,716 \cdot v \cdot F, \quad (5)$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт;

v – скорость обработки, мм/с;

F – массовый расход порошка, г/мин.

Наиболее точно моделированием прогнозируется глубина упрочненного слоя (погрешность 5,5 %), наименее точно – содержание в нём армирующих частиц WC (погрешность 15,5 %).

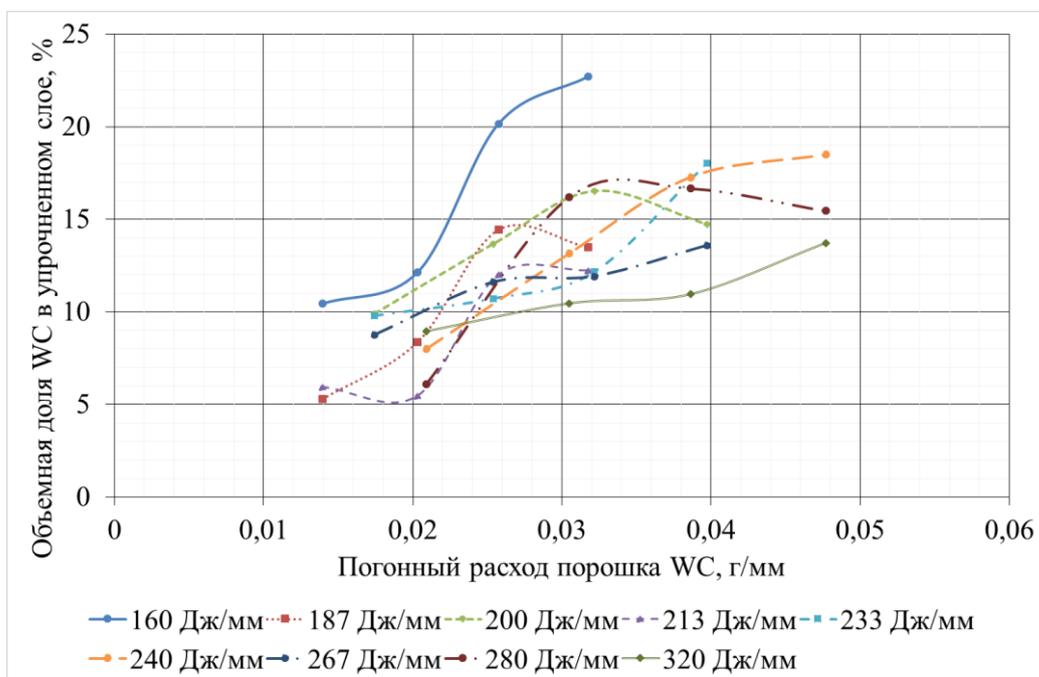


Рисунок 2.

Влияние погонного расхода порошка WC на объемную долю армирующих частиц в упрочненном слое при различных погонных энергиях лазерного излучения

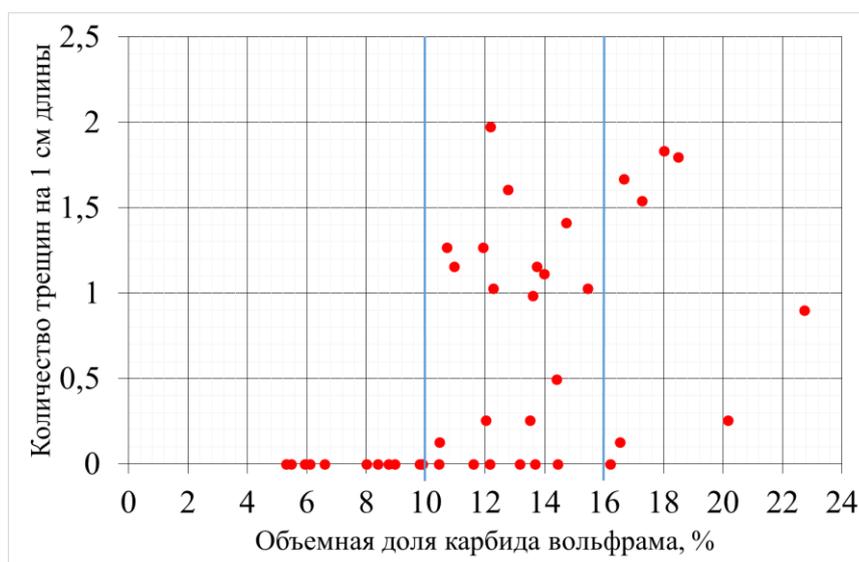


Рисунок 3.

Зависимость количества трещин от объемной доли WC

Анализ представленных на Рисунке 3 данных показывает, что при объемной доле WC в упрочненном слое до 10 % трещины не образуются вне зависимости от параметров режима обработки, при доле от 10 до 16 % возможно образование трещин. Это происходит в случае локальных повышений концентрации частиц в верхней части обработанного слоя и зависит от параметров режимов обработки. При содержании WC свыше 16 % образование трещин исключить невозможно, с его ростом количество этих дефектов возрастает.

Исследования структуры показали, что в зоне лазерной обработки без введения частиц и в зоне термического влияния образуется мелкодисперсный мартенсит. В переплавленной зоне, содержащей частицы WC наблюдается дендритная структура. С ростом концентрации WC в бандажной стали марки 2 с 6,4 до 18,8 % первичная структура измельчается до 1,5 раз, при этом возникает неоднородность микротвердости металла, а её среднее значение уменьшается с 865 HV при доле 6,4 % до 680 HV при доле 16,3 % и возрастает до 723 HV при доле 18,8 %, что связано с диффузией вольфрама в сталь и образованием вблизи введенных частиц WC вторичных карбидов. Это в свою очередь приводит к снижению средней концентрации углерода в матрице и, соответственно, твердости мартенсита. Результаты измерения микротвердости по глубине модифицированного слоя представлены на Рисунке 4.

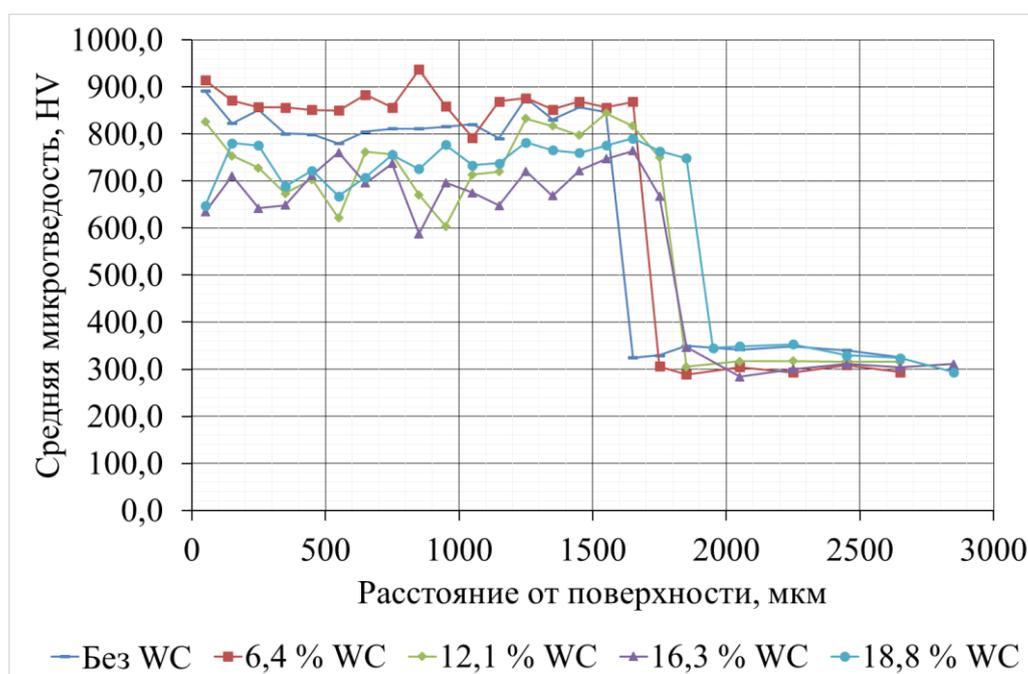


Рисунок 4.

Распределение микротвердости по глубине модифицированных слоёв

Примеры структуры модифицированного слоя вблизи небольшой (а) и крупной (б) частиц монокарбида вольфрама представлены на Рисунке 5.

Исследование форм ванн расплава показало, что наибольшее влияние на распределение армирующих частиц по глубине оказывает соотношение наклонов стенок ванны и угла полета частиц в газопорошковой струе.

Размеры и форма ванн расплава мало зависят от объёмной доли частиц в пределах от 6,4 до 18,8 %, за исключением некоторого снижения их объема.

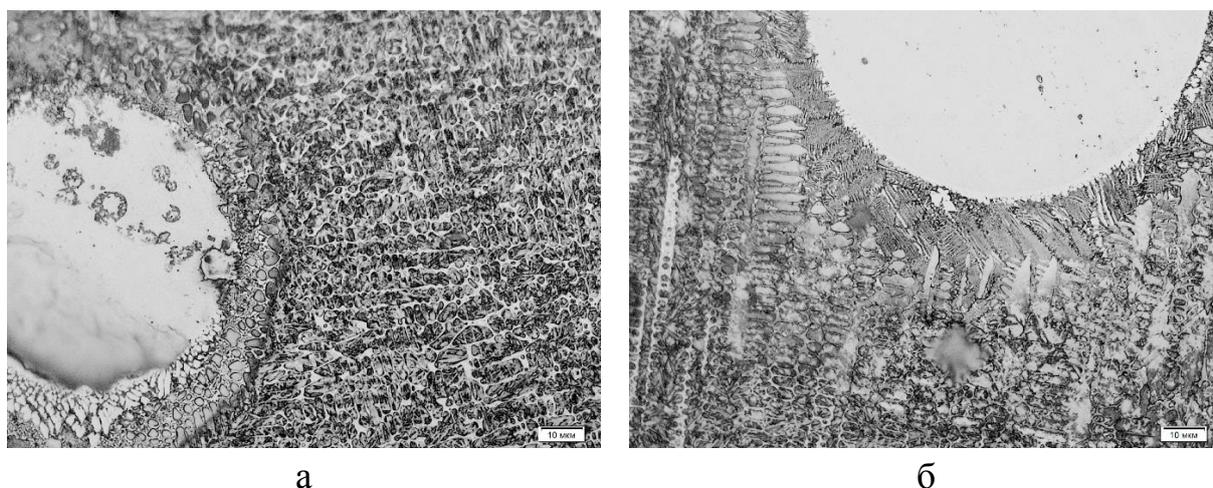


Рисунок 5.

Структура модифицированного слоя вблизи небольшой (а) и крупной (б) частиц монокарбида вольфрама

В **Главе 5** приведены результаты исследования износостойкости получаемых композитных слоёв на модельных образцах – роликах. Зависимость массового износа от объёмной доли частиц представлена на Рисунке 6. Видно, что оптимальное сочетание износа бандажного ролика и сохранения рельсового достигается при объёмной доле карбида вольфрама около 9 %.

Снимок сечения упрочненного слоя, выполненного на образце-ролике, представлен на Рисунке 7.

Установлено, что лазерная модификация с введением порошка WC приводит к многократному снижению износа как упрочненного изделия, так и контртела, при этом с ростом объёмной доли армирующих частиц с 9 до 13 % износостойкость упрочненного слоя возрастает более, чем в 3 раза, однако износ контртела при этом также увеличивается более чем в

2,5 раза. Показано, что введение армирующих частиц оказывает примерно в 10 раз более существенно влияние на повышение износостойкости по сравнению с закалкой матрицы (Рисунок 6).

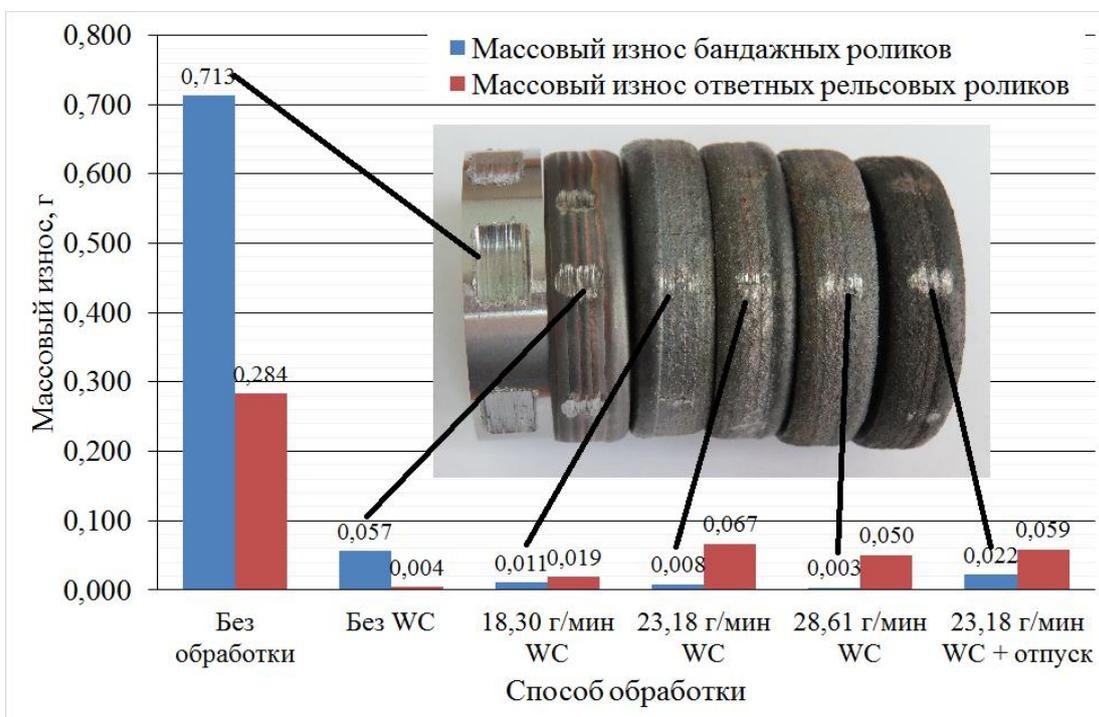


Рисунок 6.

Результаты исследования массового износа бандажных и ответных рельсовых роликов и внешний вид роликов после испытаний

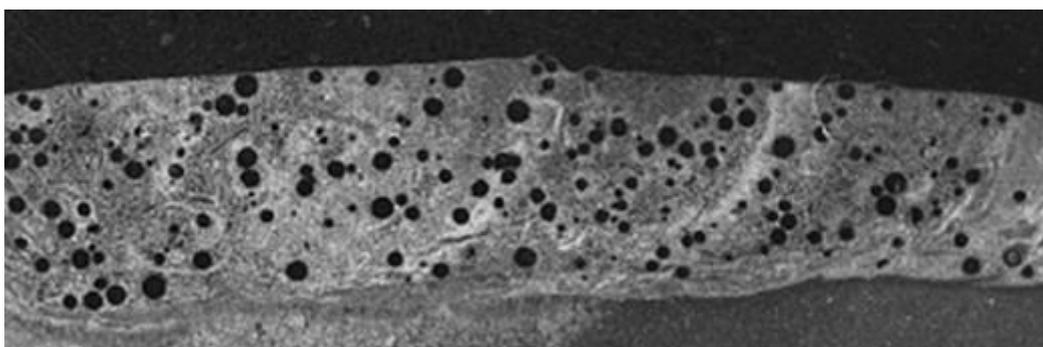


Рисунок 7.

Поперечное сечение упрочнённого слоя в образце-ролике

В **Заключении** приведены планы дальнейших исследований в данном направлении, благодарности автора. Часть представленных в работе результатов получены в рамках выполнения научного проекта № 17-20-03230 при финансовой поддержке РФФИ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1. Установлено, что при лазерной модификации бандажной стали с введением частиц монокарбида вольфрама сферической формы диаметром от 50 до 150 мкм рациональный диапазон содержания WC составляет от 8 до 10 % по объему, что позволяет повысить износостойкость более чем в 11 раз по сравнению с материалом в исходном состоянии, без образования дефектов в упрочнённом слое.

2. Для получения модифицированного слоя толщиной до 1,2 мм требуются мощность лазерного излучения от 2800 до 3200 Вт при скорости обработки от 10 до 12 мм/с, диаметры луча и газопорошкового потока от 3,0 до 3,5 мм. Требуемое содержание частиц WC достигается при расходе порошка от 12 до 23 г/мин, введение частиц на глубину проплавления металла обеспечивается при скорости их полёта от среза сопла со скоростью от 6,0 м/с, которая определяется расходом транспортирующего газа.

3. Для оптимизации параметров режимов модифицирования разработаны регрессионные модели, связывающие глубину, высоту валика и содержание WC в упрочненном слое с мощностью излучения, скоростью обработки и массовым расходом порошка.

4. Показано, что введение монокарбида вольфрама приводит к измельчению первичной структуры металла до 1,5 раз и снижению микротвердости матрицы на 16 %, вызванному изменением химического состава стали за счет диффузии вольфрама из частиц WC.

5. Разработана методика и изготовлено приспособление для исследования формы изотермы плавления и кристаллизации при лазерной обработке. Показано, что при лазерной модификации конфигурация стенок ванн расплава определяет распределение частиц по глубине упрочненного слоя.

6. Разработаны технологические рекомендации по проведению лазерной модификации бандажных сталей с введением порошка монокарбида вольфрама.

СПИСОК ТРУДОВ

1. Устройство для удаления металла из сварочной ванны при исследовании ее формы / А. В. Пересторонин [и др.] // Сварочное производство. 2016. № 12. С. 35-37. (0,25 п.л. / 0,10 п.л.).

2. A device for removing metal from the weld pool when studying the shape of the weld pool / A. V. Perestoronin [et al.] // Welding International. 2017. Volume 31, Issue 10. P. 814-816. (0,25 п.л. / 0,10 п.л.)

3. Устройство для удаления металла из сварочной ванны при исследовании свариваемости металла. Пат. 166551 РФ / А. В. Пересторонин [и др.] // заявл. 04.04.2016; опубл. 27.11.2016. Бюлл. № 33. (0,25 п.л. / 0,10 п.л.)

4. Особенности формирования поверхностного композиционного слоя методом лазерно-порошкового введения частиц монокарбида вольфрама в матрицу из углеродистой стали / А. В. Пересторонин и [и др.] // Сварочное производство. 2018. № 10, С. 25-29. (0,30 п.л./0,075 п.л.)

5. Особенности формирования поверхностного композиционного слоя методом лазерно-порошкового введения частиц монокарбида вольфрама в матрицу из углеродистой стали / А. В. Пересторонин и [и др.] // Технология машиностроения. 2018. № 10, С. 5-10. (0,30 п.л./0,075 п.л.)

6. The features of surface composite layer formation by laser-powder treatment of steel with tungsten carbide particles / A. Perestoronin [et al.] // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Volume 1109. Article numb. 012028. doi :10.1088/1742-6596/1109/1/012028. (0,15 п.л./ 0,075 п.л.)