

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Жумекеновой Зауре Жетписбаевны
«Повышение долговечности колесных пар железнодорожных вагонов методом
восстановления поверхности катания лазерной наплавкой», представленной на
соискание ученой степени доктора философии (PhD)
по специальности 8D07101 – «Машиностроение»

Актуальность работы. В силу географических особенностей Республики Казахстан, внутри материка, в центре Евразии, для обеспечения транспортного сообщения и оборота грузов активно используется железнодорожный подвижной состав, путевые машины и комплексы специального назначения. В Республике Казахстан железнодорожные мощности формируют инфраструктуру и обеспечивают импорт и экспорт рынка национальной экономики. Железнодорожный парк в Казахстане на 2021 год составляет в среднем 1,7 тыс. локомотивов, электровозов и тепловозов, 291 автоматизированных машин и комплексов, 2,7 тыс. пассажирских вагонов, 28 тыс. багажных вагонов, 54,9 тыс. грузовых вагонов и 75,5 тыс. вагонов, принадлежащих частным компаниям. При данном объеме, порядка 65% железнодорожного парка морально и физически изношено, что снижает их эффективность и экономическую целесообразность использования. Существующий в Нур-Султане завод ТОО «Тулпар - Тальго» имеет узкую специализацию по производству пассажирских вагонов, его мощности не обеспечивают Казахстан полным оборотом фондов железнодорожного грузового парка, что указывает на актуальность темы по обеспечению долговечности железнодорожных вагонов технологичными методами.

В настоящее время крупные промышленные предприятия в своих мощностях имеют железнодорожные тупики, а также железнодорожные ремонтные подразделения. Эксплуатация в разных климатических зонах и особенности функционала подвижного состава приводят к интенсивному износу ответственных узлов, деталей и как следствие к резкому снижению ресурсной долговечности и безопасности железнодорожного состава. Наиболее прогрессивному изнашиванию и потере надежности подвержены динамически активные системы, особенно ходовая часть железнодорожных вагонов. В связи дороговизной новых колесных пар от 1,5 млн. тенге до 3,5 млн. тенге, нестабильным уровнем инфляции, как альтернатива новым предлагается восстанавливать изношенные колеса вагонов. Предприятия, которые могут обеспечить восстановление вагонных колес в Казахстане дефицит, и они осуществляют ремонт непосредственно на базе собственной организации. Вопрос эффективного восстановления колесных пар на удалении от ремонтных пунктов по пути следования изучен не в полной мере. Существующие способы восстановления, не удовлетворяют требованиям к качеству модифицированной поверхности, а физико-механические свойства ниже, чем у новых колесных пар. Таким образом, не решена научно-практическая проблема по устранению дефектов и проведению капитальных ремонтно-восстановительных работ на удалении от депо и ремонтных баз. Научная проблема заключается в

отсутствии обоснованных методов обеспечения долговечности железнодорожных колес в полевых условиях с применением высококонцентрированных источников лазерной энергии и обоснованных оптимальных технологических режимов восстановления.

Вопросами исследования износа, методов обеспечения долговечности, технологии восстановления колесных пар железнодорожных вагонов занимались ведущие казахстанские и зарубежные ученые М.М. Машнев, С.А. Айзинбуд, А.Е. Цикунов, А.Ф. Богданов, Д. П. Кононов, А.Н. Блудов, Ю. В. Гомонец, И. А. Иванов, А. А. Воробьев, С. В. Кротов, Р.С. Устемирова, профессора В.Г. Альбрехт, М.Ф. Вериги, А.Б. Васильев, В.А. Грищенко, Л.О. Грачева, В.Н. Данилов, В.М. Ермаков, М.П. Ершков, Ноу К., В.Г. Галабурда, Э.П. Исаенко, М.П. Пахомов, И.И. Галиев, Н.И. Карпущенко, Oztürk, V., Arar, O.F., А.Я. Коган, Rende, F. Ş., L.P. Lingaitis, С.И. Клинов, К.С. Каспакбаев, Н.К. Исингарин, Т.Б. Баяхметов, Р.К. Сатова, М.А. Левинзон, Weber H., А.Д. Омаров, И.В. Прокудин, В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, С.Н. Шарапов, И.И. Челноков, Эсвельд, В.Ф. Яковлев, С.В. Вертинский и многие другие.

Целью диссертационной работы является обеспечение долговечности колесных пар за счет увеличения ресурса колес железнодорожного вагона путем разработки мобильного ремонтного комплекса и лазерной технологии восстановления колес.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать методику обоснования основных динамических факторов, влияющих на изнашивание поверхности контакта и формирование усталостных напряжений в основе металла колесной пары;
- исследовать характер и установить допустимые пределы изнашивания элементов колеса, определяющие выбор технологического способа увеличения ресурса восстановленных колес железнодорожного состава;
- обосновать критерии эффективности восстанавливаемых колесных пар железнодорожных вагонов;
- экспериментально исследовать влияние наплавленного материала на растягивающие и сжимающие напряжения в покрытии при лазерном восстановлении колес вагона;
- установить зависимости изменения микротвердости, фазовой структуры восстановленной поверхности от режимов лазерного восстановления;
- разработать мобильный комплекс для лазерного восстановления колес;
- разработать технологический способ и обосновать оптимальные режимы восстановления профиля поверхности катания колесных пар лазерными источниками энергии.

Методы исследования. Исследования проводились на основе принципа системно-структурного подхода и интегрированного метода исследования, который включает в себя: теоретический анализ на основе технологии машиностроения и экспериментально-теоретические исследования, прошедших испытания в производственных и лабораторных условиях. Теоретические исследования базировались на использовании методов теории численных

решений математических задач с применением имитационного моделирования взаимодействия колеса вагона с рельсом. Для достоверности результатов исследований при моделировании использовались лицензионные приложения программ: AutoCAD, MatLab, Solidworks, Microsoft Visual Studio.

Объектом исследования являются технологичные способы восстановления и увеличения ресурса изношенных колес железнодорожного состава.

Предмет исследования – зависимости механических свойств покрытия от режимных параметров технологического процесса лазерного восстановления изношенных колес железнодорожного состава.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях и результатах:

- установлены зависимости распределения статической нагрузки от коэффициента использования грузоподъемности вагона ($P_{ст} = 8,430\lambda + 65,343$); зависимость динамической нагрузки от статической нагрузки вагона ($P_{д} = 1,0862P_{ст} - 65,6814$); зависимость коэффициента вертикальной динамики от скорости движения вагона ($k_{д} = 0,0134v + 0,0297$) и зависимость статической нагрузки от массы брутто вагона ($P_{ст} = 0,023m_{бр}^2 - 0,770m_{бр} - 5,573$), учитывающие динамические факторы, формирующие локальный износ поверхности контакта и усталостные напряжения в основе материала колесной пары;
- усовершенствована математическая модель изнашивания поверхности катания и гребня, учитывающая действие распределенных динамических сил при движении на прямых и криволинейных участках, а также изменение коэффициента трения, влияющего на проскальзывание и коэффициента запаса устойчивости против схода с рельс;
- установлены зависимости, описывающие полиномиальный закон изменения нормальных напряжений $\sigma_N = -1,502F^2 + 29,959F + 371,874$ и $\sigma_{Mx} = 1,375F^2 + 8,102F + 132,632$ напряжений изгиба соответственно от износа контактной поверхности колеса с учетом отклонения пятна контакта в сторону гребня колеса;
- установлена зависимость толщины наплавки лазера от мощности лазерного излучения и скорости лазерной наплавки;
- разработан методика и алгоритм обоснования критериев эффективности восстанавливаемых колесных пар железнодорожных вагонов, формирующие критерии выбора основных параметров и материала для лазерной технологии;
- экспериментально обоснованы критерии качества наплавленного покрытия при вариации режимов лазерного восстановления колес вагона;
- установлены зависимости изменения физико-механических свойств восстановленной поверхности от толщины наплавления, величины расфокусировки лазерного пятна, микротвердости и глубины проплавления, позволяющие обосновать оптимальные технологические режимы лазерного восстановления.

Практическая значимость. Разработанный мобильный ремонтный комплекс для восстановления колесных пар железнодорожных вагонов позволяет оперативно произвести восстановление изношенных колес в полевых условиях на удалении от ремонтного депо. Его уникальная платформа с ремонтной кабиной обеспечивает технологическую среду и условия, отвечающие условиям стационарных ремонтных постов. Технологичность предложенного оборудования позволяет автоматизировать процесс и снизить его энергоемкость. Внедрение в инфраструктуру разработанного нового мобильного комплекса решит техническую проблему по увеличению межремонтного ресурса колес. Разработанный мобильный комплекс с лазерным источником энергии обеспечивает восстановление с любым сложно-компонентным и тугоплавким материалом. Наплавка лазером обеспечивает ширину наплавочного шва в зависимости от диаметра сопла и позволяет гибко управлять физико-механическими свойствами покрытия. Мощность лазерного импульса обеспечивает точечное воздействие, исключая перегрев всей детали, приводящей к подкаливанию. Применение в мобильном комплексе лазерного источника энергии обеспечит эффективное управление термодинамическими процессами при формировании поверхности и структуры колеса. Исследованные оптимальные технологические параметры восстановления улучшают качество покрытия, исключая растягивающие и сжимающие напряжения.

Установленные зависимости изменения физико-механических свойств восстановленной поверхности от технологических режимов лазерного восстановления. Данные зависимости позволяют обоснованно выбрать оптимальные значения режимов восстановления изношенной поверхности катания и гребня колеса. Вариативность обоснованных параметров восстановления влияет на формирование оптимальной микротвердости покрытия, высокой прочности сцепления и повышает износостойкость, что ведет к увеличению ресурса колес вагона.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- обоснованные критерии оценки долговечности ($P_{ст}=109,5$ кН, $\lambda \leq 1$, $P_{д}=32,8$ кН, $k_{\sigma}=1,3 \cdot 10^6$) колесных пар и зависимости, описывающие неравномерности распределения статической и динамической нагрузки от коэффициента использования грузоподъемности вагона, от статической нагрузки вагона, от коэффициента вертикальной динамики, от скорости движения вагона и зависимость статической нагрузки от массы брутто вагона, учитывающие динамические факторы, формирующие локальный износ и усталостные напряжения в основе материала поверхности контакта колесной пары.
- усовершенствованная математическая модель динамики изнашивания поверхности катания и гребня, при движении на прямых и криволинейных участках с учетом прогрессирующего изменения контактной геометрии колеса при непостоянном коэффициенте трения и коэффициента запаса устойчивости против схода с рельс в реальных условиях эксплуатации.

- методика и алгоритм обоснования критериев эффективности ($\varphi = 66^\circ$, $\sigma_F = 123,347-295,025$ МПа, $\sigma_N = 415,5 \cdot 10^6$ Па) восстанавливаемых колесных пар железнодорожных вагонов, формирующие критерии выбора оптимальных значений параметров и материала для лазерной технологии.
- зависимости модификации физико-механических свойств и зернистости фазовой структуры колеса и гребня железнодорожного вагона от технологических режимов лазерного восстановления.
- конструктивно-технологические параметры инновационного мобильного ремонтного комплекса для лазерного восстановления изношенной поверхности колес железнодорожных вагонов в зависимости от качественных критериев восстановленной поверхности.

Апробация работы.

Основные результаты по диссертации были доложены на следующих международных и казахстанских научно - практических конференциях и технических семинарах: Материалы VI международной научно-практической конференции «Молодежь и наука - 2019» (Петропавловск, 2019); Материалы международной научно-практической конференции «Козыбаевские чтения - 2020: приоритетные направления развития, достижения и инновации современной казахстанской науки» (Петропавловск, 2020), техническое совещание на предприятии ТОО «Ремплазма» (Петропавловск, 2021). Конструктивно-технологические и методические разработки обсуждены и утверждены на производственно-технических совещаниях ТОО «Петропавловский экспертный центр» (Петропавловск, 2020), ТОО «Vector SK+» (Петропавловск, 2021), также в период прохождения научной зарубежной стажировки в СибАДИ, г. Омск (РФ), 2021.

Публикации.

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 11 научных и методических трудах: 3 научные статьи в научных журналах, входящих рецензируемых перечнем КОКСОН РК; 2 статьи в научном зарубежном журнале, входящим в базу научного цитирования SCOPUS – Q-2, процентиль по CiteScore Scopus – 57 и 71; 4 научных статьи в сборниках международных научно-практических конференций. Получен 1 патент KZ на полезную модель и издано 1 учебно-методическое пособие.

Личный вклад автора.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В печатных работах, которые написаны в соавторстве, соискателю принадлежит ведущая роль при расчете, обобщении и анализе полученных результатов.

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 132 страницах, содержит 74 рисунка, 16 таблиц и список литературы из 134 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Результаты исследования.

Разработана методика расчета прочностных характеристик колес железнодорожных вагонов с учетом отклонения пятна контакта изношенной части поверхности при циклическом распределении ударных динамических нагрузках и осевых моментах. Внедренная методика позволяет определить зону локализации усталостных напряжений и прогнозировать дефект до его обнаружения. Данный подход повышает технологичность конструкции при ее проектировании, надежность динамической системы и увеличивает межремонтный ресурс колесной пары.

Разработанная методика и алгоритм по обеспечению долговечности железнодорожных колес позволяет обосновать критерии эффективности колесных пар железнодорожных вагонов. Обоснованные критерии предложенного алгоритма обеспечивают достоверный выбор способа восстановления, а установленные в нем причинно-следственные связи дефектов создают возможность оптимального выбора технологических режимов восстановления или модификации изношенной поверхности катания колеса.

Предложена в среде Solidworks виртуально-имитационная модель исследования процесса локализации напряжений по контактным элементам колеса в разные интервалы воздействия ударных нагрузок, позволяющая с удовлетворительной сходимостью оценить и уточнить величину и принцип распределения контактных напряжений по сложному профилю и гребню колеса.

Разработанный мобильный ремонтный комплекс для восстановления колесных пар железнодорожных вагонов позволяет оперативно произвести восстановление изношенных колес в полевых условиях на удалении от ремонтного депо. Его уникальная платформа с ремонтной кабиной обеспечивает технологическую среду и условия, отвечающие условиям стационарных ремонтных постов. Технологичность предложенного оборудования позволяет автоматизировать процесс и снизить его энергоемкость.

Внедрение в инфраструктуру разработанного нового мобильного комплекса решит техническую проблему по увеличению межремонтного ресурса колес. Разработанный мобильный комплекс с лазерным источником энергии обеспечивает восстановление с любым сложно-компонентным и тугоплавким материалом. Наплавка лазером обеспечивает ширину наплавочного шва в зависимости от диаметра сопла и позволяет гибко управлять физико-механическими свойствами покрытия. Мощность лазерного импульса обеспечивает точечное воздействие, исключая перегрев всей детали, приводящей к подкаливанию. Работа мобильного комплекса обеспечивает системное управление термодинамическими процессами при формировании поверхности и структуры колеса. Исследованные оптимальные технологические параметры восстановления улучшают качество покрытия, исключая растягивающие и сжимающие напряжения.

Разработанный алгоритм и технологичный способ лазерного восстановления изношенного колеса увеличивает вариативность

технологических режимов восстановления, расширяет горизонт возможностей по улучшению и модификации физико-механических свойств модифицированной изношенной поверхности колеса. Уникальность предложенного лазерного источника, адаптирована к жестким условиям восстановления на удалении от ремонтных баз и позволяет достичь термически устойчивый процесс наплавки с минимальной глубиной проплавления основного металла за короткий промежуток времени. Разработанный способ восстановления увеличивает перечень изделий, подлежащих восстановлению.

Решены научная и практическая проблемы, направленные на повышение надежности, долговечности и эффективности формообразования поверхности катания колесных пар подвижного состава и позволяющие принципиально поменять концепцию ремонтно-восстановительных работ железнодорожного состава без вывода вагона из эксплуатации по пути следования состава.

Работы, опубликованные о теме диссертации:

1. Жумекенова З.Ж. Анализ наиболее частых дефектов колесных пар железнодорожных вагонов // Материалы VI международной студенческой научно-практической конференции «Молодежь и наука - 2019», СКГУ им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, 2019.

2. Жумекенова З.Ж., Бондарев В.К. Виды дефектов колесных пар железнодорожных вагонов и способы их устранения // Научный журнал «Вестник КазНУ» Серия технические науки. - г. Алматы, 2019. - С. 376-384.

3. Жумекенова З.Ж., Савинкин В.В., Колисниченко С.Н. К вопросу перспективных технологий восстановления поверхностей изнашивания // Научный журнал «Вестник КазНУ» / КазНУ имени К.И. Сатпаева №2(138), г. Алматы, 2020. - С. 170-177.

4. Zhumekenova Z.Zh., Savinkin V.V., Abilmazhinova A.S., Seitova A.T. Investigation of the reasons of resource longevity decrease of railway cars' wheel pairs // Научный журнал «Вестник КазНУ» / КазНУ имени К.И. Сатпаева №2(138), г. Алматы, 2020. - С. 239-245.

5. Жумекенова З.Ж., Абилямжинова А.С., Сеитова А.Т. Жылжымалы құрамға қызмет көрсету және жөндеу жүйесіндегі ресурс үнемдеу технологиялары // Материалы международной научно-практической конференции «Козыбаевские чтения - 2020: приоритетные направления развития, достижения и инновации современной казахстанской науки», III Петропавловск, 2020. - С. 275-279.

6. Жумекенова З.Ж., Абилямжинова А.С., Сеитова А.Т. Современные технологии восстановления вагонных колес // Материалы VII Международная научно-практическая конференция «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ВЫЗОВЫ XXI века», г. Нур-Султан, 20-22 октября 2020. - С. 233-237.

7. Жумекенова З.Ж., Савинкин В.В., Колисниченко С.Н., Колисниченко С.В., Коптяев Д.А. Исследование динамической модели кривошипно-ползунного механизма поршневых насосов бурового комплекса // Материалы международной научно-практической онлайн конференции «Молодежь и наука - 2021» (9 апреля), № IV, г. Петропавловск. - С. 377-379.

8. Savinkin V.V., Zhumekenova Z.Zh., Kolisnichenko S.N., Sandu A.V., Ivanova O.V., Petrica Vizureanu, Savinkin S.V. Study of wear and redistribution dynamic forces of wheel pairs restored by a wear-resistant coating 15CR17NI12V3F / Coatings 2021, 11(12), 1441. <https://doi.org/10.3390/coatings11121441>.
Процентиль по CiteScore Scopus - 57.

9. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Sandu A.V., Ivanova O.V., Petrica Vizureanu, Zhumekenova Z.Zh. Investigation of the strength parameters of drilling pumps during the formation of contact stresses in gears / Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(15), 7076. <https://doi.org/10.3390/app11157076>.
Процентиль по CiteScore Scopus - 71.

10. Сеитова А.Т., Жумекенова З.Ж. Машина жасаудағы стандарттау және сапаны басқару // ISBN Петропавловск: ИПО СКУ им. М. Козыбаева, 2021. С. 102.

11. Пат. KZ № 5935. Мобильный ремонтный комплекс для восстановления колесных пар железнодорожных вагонов / Савинкин В.В., Шагаев И.В., Жумекенова З.Ж.; опубл. 19.03.2021 г., бюл. № 11. – 4 с.