

## **АННОТАЦИЯ**

**на диссертацию Сарсембаевой Толкын Ержановны на тему: «Исследование плазменного упрочнения цельнокатаных колес для повышения технического уровня обработки и их качества по международному стандарту ИСО 1005-6» на соискание степени доктора философии PhD по специальности 6D073200 – Стандартизация и сертификация**

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов повышения износостойкости цельнокатаных железнодорожных колес в паре трения «колесо-рельс» с использованием плазменной обработки, приводящей модернизации структуры поверхностного слоя стали при неизменном химическом составе, структуры и свойств центральных слоев обрабатываемого изделия.

### **Актуальность исследования**

Анализ современного состояния колесных пар грузовых вагонов, поступающих в плановые виды ремонта и текущий отцепочный ремонт, показывает, что основной причиной обточек колес является износ поверхности катания. По этому дефекту обтачивается до 50 % колес. Значительное количество колес (до 35 %) выходит из строя по тормозным и тепловым повреждениям. При больших нагрузках и высоких скоростях движения тонкие поверхностные слои нагреваются до температур, превышающих критические точки ( $A_{c1}$ ,  $A_{c2}$ ) и при последующем ускоренном охлаждении возможно образование твердой, в то же время хрупкой структуры мартенсита, что приводит к растрескиванию поверхностных слоев. Эти данные показывают, что повышение износостойкости поверхности катания (гребня и обода колеса) железнодорожных колес с использованием инновационной плазменной обработки является актуальной и востребованной. Аргументируется это тем, что с одной стороны, повышение износостойкости элементов колесных пар является важной проблемой железнодорожного транспорта, являющегося ведущей отраслью экономики страны, с другой стороны, важным фактором исследования и разработки инновационной технологии является: во-первых, растущие цены и соответствующие затраты на производство металлопродукции для колес с высоким энергопотреблением, а также увеличивающиеся затраты на запасные части, текущий и капитальный ремонт колесных пар, связанный с их заменой; во-вторых, рост цен на энергоносители и транспортные расходы по их доставке.

Привлекательность и перспективность плазменной технологии упрочнения обусловлено универсальностью ее параметров, доступностью, экологичностью и экономической эффективностью использования. При этом, не изменяя общего химического состава материала и его физико-химических свойств во внутренних слоях, такая обработка легко вписывается в технологический процесс ремонта колес, малозатратна, достаточно производительна и, являясь финишной

операцией, позволяет эффективно увеличить эксплуатационную стойкость и служебный ресурс вагонных колесных пар.

**Цель исследования** - повышение уровня качества и эксплуатационного ресурса колесных пар поверхностной плазменной обработкой.

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

- исследование особенностей формирования градиентно-слоистой структуры при сверхбыстрых скоростях нагрева ( $\sim 6000^{\circ}\text{C}$ ) и охлаждения ( $\sim 3000^{\circ}\text{C}$ ) и кратковременностью воздействия на металл ( $\sim 10^{-2}-10^{-3}$  с);

- исследование влияния режимов дифференциальной обработки элементов цельнокатаного колеса (обода, диска и ступицы) на повышение его качества;

- изучение влияния поверхностной плазменной обработки в сочетании с предварительной объемной закалкой колеса на долговечность и надежность;

- исследование влияния распределения остаточных напряжений в ободе колеса на повышение износо- и трещиностойкости;

- рекомендации по оптимальному диапазону твердости колеса и рельса и глубине упрочненной зоны, обеспечивающей повышение эксплуатационного ресурса колесных пар.

**Объект исследования:** обод и гребень цельнокатаных колес после различных видов упрочняющей термической обработки.

**Предмет исследования:** выявление возможности повышения износостойкости контактной (рабочей) поверхности колесных пар плазменной обработкой.

### **Научные результаты в рамках требований к диссертации.**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, практическая и научная значимость решения проблем разработки и внедрения принципиально новой технологии упрочнения наиболее нагруженных элементов ходовой части подвижного состава.

**В первом разделе** описано современное состояние проблемы повышения износостойкости и механизмы изнашивания трущихся поверхностей. Описаны традиционные и инновационные технологии повышения износостойкости колес. Приведены сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них. Поставлены задачи диссертационной работы с обозначением основных цели исследования. Обозначены научная новизна и указаны основные положения, выносимые на защиту.

**Во втором разделе** представлены методики проведения исследований для выполнения цели диссертационной работы - повышение износостойкости и эксплуатационного ресурса цельнокатаных колес вагонов. Произведен выбор необходимых для исследований приборов и оборудования, а также представлена методика определения химического состава плазменно-упрочненного слоя образцов с возбуждением спектра на искровом спектрометре SPECTROLAB; методы определения механических свойств, металлографические методы изучения структуры (субструктуры) оптической и электронной микроскопией; методика определения величины износа упрочненных и неупрочненных

экспериментальных образцов и их описание; распределение остаточных внутренних напряжений в ободе плазменно – упрочненных образцов с помощью рентгеновского и механического методов и их краткое описание.

**В третьем разделе** разработана и создана модель оценки качества колесной стали. Приведены результаты исследований влияния скорости нагрева и охлаждения при плазменной закалке на параметры упрочненной зоны. Представлены особенности формирования градиентно-слоистой структуры и свойств в колесной стали при поверхностной плазменной обработке. Подчеркнуто, что градиентно-слоистая неоднородная структура обеспечивает физико-механические и технологические свойства, недостижимые при однородной структуре после традиционной термической обработки.

**Четвертый раздел** посвящен описанию влияния гребневого контакта и результатам экспериментальных исследований соотношения твердости колеса и рельса на износ. Показано, что оптимальный диапазон твердости колеса находится в интервале HV 554-877, а соотношение  $HV_k / HV_p$  находится в пределах 1,22-1,86.

Плазменной закалкой цельнокатаного железнодорожного колеса на мобильной установке УДГЗ-200 показано, что в диапазоне практических режимов работы обеспечивается закалка поверхностного слоя колеса, что подтверждает расчетный вывод о необязательной подаче охлаждающей жидкости (воды) на закаливаемую поверхность при плазменной закалке. Этот факт имеет большое практическое значение, поскольку организация работ на технологическом участке без подачи воды на закаливаемое изделие и последующей сборки существенно проще и не требует затрат.

**В пятом разделе** приведены результаты исследований влияния плазменной обработки в сочетании с объемной закалкой на износ и трещиностойкость. Выявлены преимущества структуры сорбита закалки, которая образуется при одинарной термической обработке (закалке), по сравнению с сорбитом отпуска (формирующемся после двойной термической обработки, состоящей из закалки + отпуска). Установлено, что при одинаковой твердости сорбит закалки, обеспечивает лучшие механические и служебные свойства: выше износостойкость, больше разница между пределом прочности- $\sigma_b$  и пределом текучести -  $\sigma_t$ , более высокая способность к упрочнению при наклепе и большая контактная выносливость.

Обоснованы преимущества поверхностной плазменной обработки в сочетании с объемной термической обработкой на износ и трещиностойкость колес.

Приведены результаты исследований влияния параметров плазменной обработки на характер распределения остаточных напряжений в колесной стали.

#### **Научная новизна:**

1. Показано, что повышение износостойкости металла при использовании плазменной обработки связано с образованием в упрочненном поверхностном слое неоднородной градиентно-слоистой структуры, состоящей из отпущенного

мартенсита и феррито-цементитной смеси различной степени дисперсности (троостита, сорбита, перлита).

2. Определено, что сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения при плазменной закалке приводит к сильному измельчению фазовых и структурных составляющих поверхностного слоя стали и соответствующему повышению ее физико-механическими и служебных свойств.

3. Показано, что сочетание предварительной объемно-термической обработки колеса с поверхностно-плазменной закалкой приводит к существенному улучшению как его износостойкости, так и контактно-усталостной прочности (трещиностойкости).

#### **Положения выносимые на защиту:**

- исследование особенностей формирования градиентно-слоистой структуры при поверхностной плазменной закалке и ее влияния на износ и трещиностойкость колеса;

- экспериментальное определение оптимального соотношения твердости колеса и рельса в паре трения «колесо-рельс», снижающего износ как колеса, так и рельса;

- исследование влияния режимов дифференциальной обработки элементов колеса (обода, диска и ступицы) на повышение уровня его качества;

- исследование влияния поверхностной плазменной обработки в сочетании с предварительной объемной закалкой на эксплуатационную надежность и долговечность работы колеса;

- количественная оценка распределения растягивающих и сжимающих внутренних напряжений в колесе после плазменной обработки и его влияния на износ.

#### **Практическая ценность и реализация результатов исследований.**

- установлена оптимальная глубина упроченной зоны (1,5-2,0 мм) с поверхностной твердостью ~ 840- 860 HV и обеспечивающая гарантированное повышение эксплуатационного ресурса колесных пар в 2,0-2,5 раза;

- определено оптимальное соотношение твердости колеса и рельса в паре трения «колесо-рельс», которое находится в диапазоне 1,22-1,86 и существенно снижает интенсивность износа. Показано, что оптимальный диапазон твердости колеса находится в интервале HV554-877, а соотношение  $HV_k / HV_p$  находится в пределах 1,22-1,86. Установлено, что увеличение твердости свыше 900-950HV может привести к трещинообразованию и интенсивному износу рельса. Упрочнение гребней колеса на низкую твердость 277-481 неэффективен, так как износостойкость улучшается незначительно;

- показано, что оптимальное распределение остаточных напряжений (сжимающих в поверхностном слое с переходом в растягивающие в промежуточный и центральный слои) достигается при мощности плазменной струи 15 кВт, скорости упрочнения 10-15 мм/с, ширине закаливаемой дорожки 25-30мм.

#### **Методологическая база и метрологическое обеспечение исследований**

Методологической базой исследований является центральная идея о

существовании глубокой связи между структурой и физико-механическими, технологическими, служебными свойствами металлических материалов. Исследования выполнены на основе патентно-информационного поиска и проведения экспериментальных работ в лабораторном и опытно-промышленном масштабе. При этом использованы как традиционные, так и современные методы научного исследования. Метрологические (измерительные) работы выполнялись на контрольно-измерительных приборах высокого класса точности, поверенных в соответствии с нормативными документами.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждены:

- использованием исходных положений, базирующихся на принципах теоретического и прикладного материаловедения;
- корректной постановкой решаемых задач, достаточным объемом проведенных экспериментов и современных методов испытаний металлических материалов;
- удовлетворительной сходимостью результатов лабораторных и промышленных исследований.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами**  
Диссертационная работа выполнена в рамках бюджетной программы грантового финансирования проектов МОН РК по приоритету «Рациональное использование природных ресурсов, переработка сырья и продукции» по теме «Разработка и опытно-промышленное внедрение инновационной технологии плазменного упрочнения вагонных колес» (2015-2017 гг.) и по теме «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане с внедрением инновационной технологии плазменного упрочнения колес» (2018-2020 гг.). Эти данные свидетельствуют о том, что тема рассматриваемой диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, реализуемым в Республике Казахстан.

**Публикации и личный вклад диссертанта.** Опубликованы 16 научных трудов, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 3 статьи в международном научном издании, входящем в базу данных Scopus, 3 статьи в материалах базы данных РИНЦ, 7 статей в международных научно-практических конференциях. Получен патент № 4808 «Способ и устройство для плазменной обработки железнодорожного колеса» Республики Казахстан на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, заключения, списка использованных источников из 116 наименований и приложений. Работа изложена на 136 страницах, включает 32 рисунка и 26 таблиц.

6D073200 – Стандарттау және сертификаттау мамандығы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін дайындалған **Сарсембаева Толқын Ержанқызының «Тұтастилемделген дөңгелектерді өңдеудің техникалық деңгейін және сапасын арттыру үшін плазмалық беріктендіру арқылы халықаралық стандарт ИСО 1005-6 сәйкес зерттеу»** тақырыбына жазылған диссертациясына

## **АҢДАТПА**

### **Жұмыстың жалпы сипаттамасы**

Диссертациялық жұмыс өңделетін бұйымның химиялық құрамы, орталық қабаттарының құрылымы мен қасиеттері өзгермеген болаттың үстіңгі қабатының құрылымын жаңғыртуға әкелетін плазмалық өңдеуді пайдалана отырып, «доңғалақ-рельс» үйкелісі жұбында тұтас илемделген темір жол доңғалақтарының тозуға төзімділігін арттыру процестерін зерттеуге арналған.

### **Зерттеудің өзектілігі**

Жоспарлы жөндеу түрлеріне және ағымдағы ағытпалы жөндеуге келіп түсетін жүк вагондарының доңғалақ жұптарының қазіргі жай-күйін талдау дөңгелектерді қажалуының негізгі себебі сырғанау бетінің тозуы болып табылатынын көрсетеді. Бұл ақау бойынша дөңгелектердің 50% ға дейін қайралады. Доңғалақтардың едәуір саны (35% ға дейін) тежегіш және жылу зақымдануы бойынша істен шығады. Үлкен жүктемелер мен жоғары қозғалыс жылдамдығында жұқа беткі қабаттар критикалық нүктелерден ( $Ac_1$ ,  $Ac_3$ ) асатын температураға дейін қызады және кейіннен жеделдетілген салқындату кезінде мартенситтің қатты, сонымен бірге сынғыш құрылымы пайда болуы мүмкін, бұл беткі қабаттардың жарылуына әкеледі. Бұл деректер инновациялық плазмалық өңдеуді қолдана отырып, темір жол доңғалақтарының сырғанау (доңғалақтың жотасы мен шеңбері) бетінің тозуға төзімділігін арттыру өзекті және сұранысқа ие екенін көрсетеді. Бұл, бір жағынан, ел экономикасының жетекші саласы болып табылатын теміржол көлігінің доңғалақ жұптары элементтерінің тозуға төзімділігін арттырудың маңызды проблемасы болып табылады, екінші жағынан, инновациялық технологияны зерттеу мен дамытудың маңызды факторы: біріншіден, жоғары қуатты пайдаланатын доңғалақтарға арналған металл өнімдерін өндіруге және өсіп келе жатқан бағалар мен тиісті шығындар, сондай-ақ қосалқы бөлшектерге, оларды ауыстыруға байланысты доңғалақ жұптарын ағымдағы және күрделі жөндеуге кететін шығындардың артуы; екіншіден, энергия бағасының өсуі және оларды жеткізу бойынша көлік шығындары.

Плазмалық беріктендіру технологиясының тартымдылығы мен перспективтілігі оның параметрлерінің әмбебаптығы, қол жетімділігі, экологиялық таза және пайдаланудың экономикалық тиімділігіне байланысты. Сонымен қатар, материалдың жалпы химиялық құрамын және оның ішкі қабаттарындағы физика-химиялық қасиеттерін өзгертпей-ақ, мұндай өңдеу доңғалақтарды жөндеудің технологиялық процесіне оңай сәйкес келеді, арзан,

өте өнімді және әрлеу жұмысы бола отырып, вагон доңғалақтарының жұмыс төзімділігі мен қызмет көрсету мерзімін тиімді арттыруға мүмкіндік береді.

**Зерттеу мақсаты** - доңғалақ жұптарының үстіңгі қабатын плазмалық өңдеу арқылы сапасы мен пайдалану ресурсының деңгейін арттыру

Осы мақсатқа жету үшін келесі **міндеттер** қойылды және шешілді:

- өте жылдам қыздыру ( $\sim 6000^{\circ}\text{C}$ ) және салқындату жылдамдығы ( $\sim 3000^{\circ}\text{C}$ ) кезінде градиент-қабатты құрылымды қалыптастыру ерекшеліктерін және металға қысқа мерзімді ( $\sim 10^{-2}$ - $10^{-3}$  с) әсер етуін зерттеу;

- тұтасилемді доңғалақтың (шеңбер, диск және күпшек) элементтерін дифференциалды өңдеу режимдерінің оның сапасын арттыруға әсерін зерттеу;

- дөңгелекті алдын ала көлемді шынықтырумен бірге беттік плазмалық өңдеудің беріктігі мен сенімділігіне әсерін зерттеу;

- доңғалақ жиегіндегі қалдық кернеулердің таралуының тозу мен жарылуға төзімділіктің артуына әсерін зерттеу;

- доңғалақ жұптарының пайдалану ресурсын арттыруды қамтамасыз ететін доңғалақ пен рельстің оңтайлы қаттылық диапазоны және беріктендірілген аймақтың тереңдігі бойынша ұсынымдар.

**Зерттеу нысаны:** әр түрлі беріктендірілген термиялық өңдеуден кейін тұтасилемделген дөңгелектердің шеңбері мен жотасы.

**Зерттеу пәні:** доңғалақ жұптарының жанаспалы (жұмыс) бетінің тозу төзімділігін плазмалық өңдеу арқылы арттыру мүмкіндігін анықтау.

**Жұмыс нәтижелері:**

**Кіріспеде** зерттеудің өзектілігі, жылжымалы құрамның шассиінің ең көп жүктелген элементтерін нығайтудың түбегейлі жаңа технологиясын әзірлеу және енгізу мәселелерін шешудің практикалық және ғылыми маңыздылығы негізделген.

**Бірінші бөлімде** тозуға төзімділікті арттыру проблемасының қазіргі жағдайы және үйкелетін беттердің тозу механизмдері сипатталған. Доңғалақтардың тозуға төзімділігін арттырудың дәстүрлі және инновациялық технологиялары сипатталған. Әзірлеудің жоспарланып отырған ғылыми-техникалық деңгейі туралы, патенттік зерттеулер туралы мәліметтер және олардан қорытындылар келтірілген. Зерттеудің негізгі мақсаттарын көрсете отырып, диссертациялық жұмыстың міндеттері қойылған. Ғылыми жаңалық және қорғауға ұсынылатын негізгі ережелер көрсетілген.

**Екінші бөлімде** диссертациялық жұмысты орындау үшін - вагондардың тұтас илемденген доңғалақтарының тозуға төзімділігі мен пайдалану ресурсын арттырудың зерттеу әдістері ұсынылған. Зерттеу үшін қажетті керек-жарақтар мен жабдықтар таңдалған, сондай-ақ SPECTROLAB ұшқынды спектрометрінде спектрдің қозуы бар үлгілердің плазмалық-беріктендірілген қабатының химиялық құрамын анықтаудың әдістемесі ұсынылған; механикалық қасиеттерді анықтау әдістері, сонымен қатар, құрылымды (субқұрылымды) оптикалық және электронды микроскопия көмегімен металлографиялық әдістерімен анықтау жүргізіледі; беріктендерілген және беріктендірілмеген экспериментальды үлгілердің тозуға төзімділік мөлшерін анықтау әдістемесі және оларды сипаттау;

рентгендік және механикалық әдістердің көмегімен плазмалық – беріктендірілген үлгілердің шеңберіндегі қалған ішкі кернеулерді бөлу және оларды қысқаша сипаттау.

**Үшінші бөлімде** болатты доңғалақтың сапасын бағалау моделі әзірленді және жасалды. Плазмалық беріктендіру кезінде қыздыру және салқындату жылдамдығының беріктендірілген аймақтың параметрлеріне әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Беткі қабатты плазмалық өңдеу кезінде болатты доңғалақта градиент-қабатты құрылымды және қасиеттерді қалыптастыру ерекшеліктері ұсынылған. Градиент-қабатты гетерогенді құрылым дәстүрлі термиялық өңдеуден кейін біртекті құрылымда қол жетімді емес физика-механикалық және технологиялық қасиеттерді қамтамасыз ететіндігі атап өтілді.

**Төртінші бөлім** тарақ түйіспесінің әсерін және дөңгелектер мен рельстердің қаттылығына сенімділік туралы тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері сипатталған. Доңғалақтың оңтайлы (оптималды) қаттылық диапазоны HV 554-877 аралығында, ал HVк/ HVр қатынасы (соотношение) 1,22-1,86 аралығында болады.

УДГЗ-200 қондырғысында тұтас илемделген темір жол доңғалағын плазмалық беріктендіру арқылы жұмыстың практикалық режимдерінің диапазонында доңғалақтың үстіңгі қабатының шынығуы қамтамасыз етіледі, бұл плазмалық өңдеу кезінде беріктендірілетін бетке салқындатқыш сұйықтықты (суды) берілуі міндетті емес туралы есептік қорытындыны растайды. Бұл факт үлкен практикалық мәнге ие, өйткені өйдіңген өнімге су бермей және кейінгі құрастырусыз технологиялық учаскеде жұмысты ұйымдастыру әлдеқайда қарапайым және шығындарды қажет етпейді.

**Бесінші бөлімде** көлемді шыңдаумен бірге плазмалық өңдеудің тозу мен жарылуға төзімділікке әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Сорбитпен салыстырғанда бір ретті термиялық өңдеу (беріктендіру) кезінде пайда болатын сорбитті құрылымының артықшылықтары анықталды (өңдеу + босатудан тұратын қос термиялық өңдеуден кейін пайда болады). Бірдей қаттылықпен сорбитті өңдеудің жақсы механикалық және қызметтік қасиеттерін қамтамасыз ететіндігі анықталды: тозуға төзімділігі жоғары, беріктік шегі-  $\sigma_b$  және аққыштық шегі -  $\sigma_T$  арасындағы айырмашылық, иілу кезінде беріктендірудің жоғары қабілеті және үлкен байланыс төзімділігі.

Доңғалақтардың тозуы мен жарыққа төзімділігі үшін көлемді термиялық өңдеумен бірге беттік плазмалық өңдеудің артықшылықтары негізделген.

Плазмалық өңдеу параметрлерінің болатты доңғалақтағы қалдық кернеулердің таралу сипатына әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген.

#### **Ғылыми жаңалығы:**

1. Плазмалық өңдеуді қолдану кезінде металдың тозуға төзімділігінің жоғарылауы босатылған мартенсит пен феррит-цементит қоспасынан (троостит, сорбит, перлит) тұратын біртекті емес градиент-қабатты құрылымның беріктендірілген беткі қабатында пайда болуымен байланысты екендігі көрсетілген.



2. Плазмалық беріктендіру кезінде қыздыру мен салқындатудың өте жоғары жылдамдығы болатын беткі қабатының фазалық және құрылымдық компоненттерінің қатты ұсақталуына және оның физикалық, механикалық және қызметтік қасиеттерінің сәйкесінше жоғарылауына әкелетіні анықталды.

3. Дөңгелекті алдын-ала көлемдік-термиялық өңдеудің беттік-плазмалық беріктендірудің үйлесуі оның тозуға төзімділігін де, жанасу-шаршау беріктігін де (жарыққа төзімділігі) айтарлықтай жақсартуға әкелетіні көрсетілген.

#### **Қорғауға ұсынылады:**

- беткі плазмалық шыңдау кезінде градиент-қабатты құрылымның қалыптасу ерекшеліктерін және оның доңғалақтың тозуы мен жарылуына әсерін зерттеу;

- доңғалақтың да, рельстің де тозуын төмендететін «доңғалақ-рельс» үйкеліс жұбындағы доңғалақ пен рельстің оңтайлы қаттылық арақатынасын эксперименттік анықтау;

- доңғалақ (шеңбер, диск және күпшек) элементтерінің дифференциалды өңдеу режимдерінің оның сапа деңгейін арттыруға әсерін зерттеу;

- доңғалақтың жұмыс сенімділігі мен ұзақ мерзімділігіне алдын ала көлемді шыңдаумен үйлескен беттік плазмалық өңдеудің әсерін зерттеу;

- плазмалық өңдеуден кейін доңғалақтағы созылу және қысу ішкі кернеулерінің таралуын және оның тозуға әсерін сандық бағалау.

#### **Зерттеудің практикалық құндылығы және нәтижелерін іске асыру.**

- беттің қаттылығы  $\sim 840 - 860$  HV болатын беріктендірілген аймақтың оптималды тереңдігі (1,5-2,0 мм) негізделген және доңғалақ жұптарының пайдалану ресурсын 2,0-2,5 есе кепілді арттыруды қамтамасыз етеді;

- 1,22-1,86 диапазонында орналасқан және тозу қарқындылығын айтарлықтай төмендететін «доңғалақ-рельс» үйкеліс жұбында доңғалақ-рельс қаттылығының оңтайлы қатынасы анықталды. Доңғалақтың оңтайлы қаттылық диапазоны HV 554-877 аралығында, ал  $HV_k / HV_p$  қатынасы 1,22-1,86 аралығында болатындығы көрсетілген. 900-950 HV-дан қаттылықтың жоғарылауы жарықшалардың пайда болуына және рельстің қатты тозуына әкелуі мүмкін екендігі анықталды. Доңғалақтың жоталарын 277-481 төмен қаттылыққа беріктендіру тиімсіз, өйткені тозуға төзімділікке әсері шамалы (аз);

- қалдық кернеулердің оңтайлы таралуы плазмалық ағынның қуаты 15 кВт, беріктендіру жылдамдығы 10-15 мм/с, қатайтылатын жолдың ені 25-30 мм болған кезде қол жеткізілетіні көрсетілген.

**Әдіснамалық база және зерттеулерді метрологиялық қамтамасыз ету**  
Зерттеудің әдіснамалық базасы металды материалдарының құрылымы мен физикалық-механикалық, технологиялық, қызметтік қасиеттері арасында терең байланыстың болуы туралы орталық идея болып табылады. Зерттеулер Зертханалық және тәжірибелік-өнеркәсіптік ауқымда патенттік-ақпараттық іздеу және эксперименттік жұмыстар жүргізу негізінде орындалды. Бұл ретте Ғылыми зерттеудің дәстүрлі де, қазіргі заманғы да әдістері қолданылды. Метрологиялық (өлшеу) жұмыстар нормативтік құжаттарға сәйкес тексерілген, дәлдігі жоғары сыныпты бақылау-өлшеу аспаптарында орындалды.

Диссертацияда алынған нәтижелер, тұжырымдар мен ұсынымдардың **негізділігі мен дұрыстығы** расталды төмендегілермен расталды:

- теориялық және қолданбалы материалтану принциптеріне негізделген бастапқы ережелерді қолдану;
- шешілетін міндеттерді дұрыс қоюмен, өткізілген эксперименттердің жеткілікті көлемімен және металл материалдарды сынаудың заманауи әдістерімен;
- зертханалық және өнеркәсіптік зерттеулер нәтижелерінің қанағаттанарлық жинақталуымен.

**Осы жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы**  
Диссертациялық жұмыс «Табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану, шикізат пен өнімді қайта өңдеу» басымдығы бойынша ҚР БҒМ гранттық қаржыландыру бюджеттік бағдарламасының шеңберінде «Разработка и опытно-промышленное внедрение инновационной технологии плазменного упрочнения вагонных колес» тақырыбы бойынша (2015-2017 жж.) және «Развитие кластера железнодорожного машиностроения в Казахстане с внедрением инновационной технологии плазменного упрочнения колес» тақырыбы бойынша (2018-2020 жж.) орындалған. Бұл деректер қарастырылып отырған диссертацияның тақырыбы Қазақстан Республикасында жүзеге асырылатын ғылымды дамытудың басым бағыттарына сәйкес келетіндігін көрсетеді.

**Жарияланымдар мен диссертанттың жеке үлесі.** 16 ғылыми еңбек, оның ішінде ҚР БҒМ Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған басылымдарда 3 жұмыс, Scopus деректер базасына кіретін Халықаралық ғылыми басылымда 3 мақала, РИНЦ деректер базасының материалдарында 3 мақала, халықаралық ғылыми-практикалық конференцияларда 7 мақала жарияланды. Қазақстан Республикасының пайдалы моделі «Способ и устройство для плазменной обработки железнодорожного колеса» № 4808 патенті алынды.

**Жұмыстың құрылымы мен көлемі.** Диссертация кіріспеден, бес бөлімнен, қорытындыдан, 116 пайдаланылған дереккөздердің тізімінен және қосымшалардан тұрады. Жұмыс 136 беттен тұрады, 32 сурет пен 26 кестені қамтиды.

## ANNOTATION

**on the dissertation of Sarsembayeva Tolkyun Yerzhanovna on the topic: «Study of plasma hardening of forged wheels to improve the technical level of processing and quality according to international standard ISO 1005-6» for the degree of Doctor of Philosophy PhD in the specialty 6D073200-«Standardization and certification»**

### **General characteristics of the work**

The dissertation work is devoted to the study of the processes of increasing the wear resistance of solid-rolled railway wheels in a wheel-rail friction pair using plasma treatment, which leads to the structure of the surface layer of steel with the same chemical composition, structure and properties of the central layers of the processed product.

### **Relevance of the study**

The analysis of the current state of the wheel sets of freight cars, which are included in the planned types of repairs and current uncoupling repairs, shows that the main cause of wheel windings is the wear of the rolling surface. According to this defect, up to 50% of the wheels are ground. A significant number of wheels (up to 35 %) fail due to brake and heat damage. At high loads and high speeds of movement, the thin surface layers are heated to temperatures exceeding the critical points ( $Ac_1$ ,  $Ac_2$ ) and with subsequent accelerated cooling, the formation of a solid, at the same time brittle structure of martensite is possible, which leads to cracking of the surface layers. These data show that improving the wear resistance of the rolling surface (ridge and wheel rim) of railway wheels using innovative plasma treatment is relevant and in demand. This is argued by the fact that on the one hand, increasing the wear resistance of wheelset elements is an important problem of railway transport, which is the leading sector of the country's economy, on the other hand, an important factor in the research and development of innovative technology is: first, the growing prices and the corresponding costs for the production of metal products for wheels with high energy consumption, as well as the increasing costs of spare parts, current and capital repairs of wheelsets associated with their replacement; secondly, the increase in energy prices and transportation costs for their delivery.

The attractiveness and prospects of plasma hardening technology are due to the versatility of its parameters, availability, environmental friendliness and economic efficiency of use. At the same time, without changing the overall chemical composition of the material and its physico-chemical properties in the inner layers, such processing easily fits into the technological process of wheel repair, is low-cost, quite productive and, as a finishing operation, allows you to effectively increase the operational durability and service life of car wheelsets.

**The aim of the study** is to improve the quality and service life of wheel sets by surface plasma treatment.

To achieve this goal, the following **tasks** were set and solved:

- investigation of the features of the formation of a gradient-layered structure at ultrafast heating ( $\sim 6000^{\circ}\text{C}$ ) and cooling ( $\sim 3000^{\circ}\text{C}$ ) rates and short-term exposure to metal ( $\sim 10^{-2}$ - $10^{-3}$  s);

- study of the influence of differential processing modes of elements of a solid-rolled wheel (rim, disc and hub) on improving its quality;
- study of the effect of surface plasma treatment in combination with pre-volumetric quenching of the wheel on durability and reliability;
- study of the influence of the distribution of residual stresses in the wheel rim on the increase in wear and crack resistance;
- recommendations on the optimal range of hardness of the wheel and rail and the depth of the hardened zone, which provides an increase in the operational life of wheel pairs.

**Object of study:** rim and ridge of solid-rolled wheels after various types of strengthening heat treatment.

**Subject of the study:** identification of the possibility of increasing the wear resistance of the contact (working) surface of wheel pairs by plasma treatment.

**Scientific results within the framework of the requirements for the dissertation.**

**The introduction** substantiates the relevance of the study, the practical and scientific significance of solving the problems of developing and implementing a fundamentally new technology for strengthening the most loaded elements of the running gear of rolling stock.

**The first section** describes the current state of the problem of increasing wear resistance and the mechanisms of wear of rubbing surfaces. Traditional and innovative technologies for improving the wear resistance of wheels are described. The article provides information about the planned scientific and technical level of development, patent research and conclusions from them. The tasks of the dissertation work are set with the designation of the main research goals. The scientific novelty is indicated and the main provisions submitted for defense are indicated.

**The second section** presents the methods of conducting research to fulfill the purpose of the dissertation work-to increase the wear resistance and operational life of solid-rolled wagon wheels. The selection of instruments and equipment necessary for research is made, and the method of determining the chemical composition of the plasma-hardened layer of samples with spectrum excitation on the SPECTROLAB spark spectrometer is presented; methods for determining mechanical properties, metallographic methods for studying the structure (substructure) by optical and electron microscopy; methods for determining the wear value of hardened and non-hardened experimental samples and their description; distribution of residual internal stresses in the rim of plasma-hardened samples using X-ray and mechanical methods and their brief description.

**In the third section,** a model for evaluating the quality of wheel steel is developed and created. The results of studies of the influence of the heating and cooling rates during plasma quenching on the parameters of the hardened zone are presented. The features of the formation of the gradient-layered structure and properties in wheel steel during surface plasma treatment are presented. It is emphasized that the gradient-layered inhomogeneous structure provides physical, mechanical and technological

properties that are unattainable with a homogeneous structure after traditional heat treatment.

**The fourth section** is devoted to the description of the effect of the ridge contact and the results of experimental studies of the ratio of wheel and rail hardness on wear. It is shown that the optimal range of wheel hardness is in the range HV 554-877, and the ratio HV<sub>k</sub>/ HV<sub>p</sub> is in the range 1.22-1.86.

Plasma quenching of a solid-rolled railway wheel on a mobile installation UDGZ-200 shows that the surface layer of the wheel is quenched in a range of practical operating modes, which confirms the calculated conclusion about the optional supply of cooling liquid (water) on the surface to be quenched during plasma quenching. This fact is of great practical importance, since the organization of work on the technological site without water supply to the quenched product and subsequent assembly is much easier and does not require costs.

**The fifth section** presents the results of studies of the effect of plasma treatment in combination with volumetric quenching on wear and crack resistance. The advantages of the structure of the quenching sorbitol, which is formed during a single heat treatment (quenching), in comparison with the tempering sorbitol (formed after a double heat treatment consisting of quenching + tempering) are revealed. It is established that at the same hardness, the quenching sorbitol provides better mechanical and service properties: higher wear resistance, greater difference between the ultimate strength-  $\sigma_B$  and the yield strength-  $\sigma_r$ , higher ability to strengthen during hardening and greater contact endurance.

The advantages of surface plasma treatment in combination with volumetric heat treatment on the wear and crack resistance of the wheels are justified.

The results of studies of the influence of plasma treatment parameters on the distribution of residual stresses in wheel steel are presented.

**Scientific novelty:**

1. It is shown that the increase in the wear resistance of the metal when using plasma treatment is associated with the formation of an inhomogeneous gradient-layered structure in the hardened surface layer, consisting of tempered martensite and ferrite-cementite mixture of various degrees of dispersion (troostite, sorbitol, perlite).

2. It is determined that ultra-high heating and cooling rates during plasma quenching lead to a strong grinding of the phase and structural components of the surface layer of steel and a corresponding increase in its physical, mechanical and service properties.

3. It is shown that the combination of preliminary volume-heat treatment of the wheel with surface-plasma quenching leads to a significant improvement in both its wear resistance and contact fatigue strength (crack resistance).

**Provisions to be defended:**

- study of the features of the formation of a gradient-layered structure during surface plasma quenching and its effect on the wear and crack resistance of the wheel;
- experimental determination of the optimal ratio of wheel and rail hardness in the wheel-rail friction pair, which reduces the wear of both the wheel and the rail;

- study of the influence of the modes of differential processing of wheel elements (rim, disc and hub) on improving the level of its quality;
- study of the effect of surface plasma treatment in combination with pre-volumetric quenching on the operational reliability and durability of the wheel;
- quantitative assessment of the distribution of tensile and compressive internal stresses in the wheel after plasma treatment and its effect on wear.

#### **Practical value and implementation of research results.**

-the optimal depth of the hardened zone (1.5 - 2.0 mm) with a surface hardness of ~ 840-860 HV is established and provides a guaranteed increase in the operational life of wheelsets by 2.0-2.5 times;

-the optimal ratio of wheel and rail hardness in the wheel-rail friction pair is determined, which is in the range of 1.22-1.86 and significantly reduces the wear rate. It is shown that the optimal range of wheel hardness is in the range HV554-877, and the ratio HV<sub>k</sub>/ HV<sub>p</sub> is in the range 1.22-1.86. It is established that an increase in hardness above 900-950HV can lead to cracking and intensive wear of the rail. Hardening the wheel ridges to a low hardness of 277-481 is ineffective, since the wear resistance improves slightly;

- it is shown that the optimal distribution of residual stresses (compressive in the surface layer with the transition to tensile in the intermediate and central layers) is achieved at a plasma jet power of 15 kW, a hardening rate of 10-15 mm/s, and a hardened track width of 25-30 mm.

**Methodological basis and metrological support of research** The methodological basis of research is the central idea of the existence of a deep connection between the structure and the physical-mechanical, technological, and service properties of metal materials. The research was carried out on the basis of patent information search and experimental work on a laboratory and experimental-industrial scale. At the same time, both traditional and modern methods of scientific research are used. Metrological (measuring) work was carried out on control and measuring devices of a high class of accuracy, verified in accordance with regulatory documents.

**The reliability and validity** of the obtained results, conclusions and recommendations set out in the dissertation are confirmed by:

- using the initial provisions based on the principles of theoretical and applied materials science;
- correct formulation of the tasks to be solved, a sufficient amount of experiments and modern methods of testing metal materials;
- satisfactory convergence of the results of laboratory and industrial studies.

**The thesis was carried out within the framework** of the budget program of grant financing of projects of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan on the priority «Rational use of natural resources, processing of raw materials and products» on the topic «Development and pilot-industrial implementation of innovative technology of plasma hardening of wagon wheel» (2015-2017) and on the topic «Development of the cluster of railway engineering in Kazakhstan with the introduction of innovative technology of plasma hardening of wheels» (2018-2020).

These data indicate that the topic of the dissertation under consideration corresponds to the priority areas of science development implemented in the Republic of Kazakhstan.

**Publications and personal contribution of the dissertator.** 16 scientific papers have been published, including 3 papers in publications recommended by the Committee for Control in the Field of Education and Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 3 articles in an international scientific publication included in the Scopus database, 3 articles in the materials of the RSCI database, 7 articles in international scientific and practical conferences. Patent No. 4808 «Method and device for plasma treatment of a railway wheel» of the Republic of Kazakhstan for a utility model was obtained.

**Structure and scope of work.** The dissertation consists of an introduction, five sections, conclusions, conclusions, a list of sources used from 116 titles and appendices. The work is presented on 136 pages, includes 32 figures and 26 tables.