



УДК 629.4.027.4

Результаты моделирования сцепления колеса локомотива с рельсом при термометаллоплакировании тяговой поверхности колеса

О. С. Валинский¹, В. В. Шаповалов², А. А. Воробьев¹, П. Н. Щербак²,
И. А. Колодяжный², Н. К. Мигулин¹

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Валинский О. С., Шаповалов В. В., Воробьев А. А., Щербак П. Н., Колодяжный И. А., Мигулин Н. К. Результаты моделирования сцепления колеса локомотива с рельсом при термометаллоплакировании тяговой поверхности колеса // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 537–547. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-537-547

Аннотация

Цель: исследование и обоснование эффективности термометаллоплакирования тяговой поверхности бандажа колеса локомотива для повышения тягового усилия и снижения износа в системе «колесо — рельс». **Методы:** применено физическое моделирование механической системы привода локомотива и верхнего строения пути с обеспечением динамического подобия натурным объектам. Равенство кинетической и потенциальной энергии подсистем до и после приведения обеспечило идентичность частот и форм собственных колебаний. В качестве критерия достоверности воспроизведения фрикционных процессов принято соответствие вида изнашивания на модели характеру изнашивания натурального контакта колеса и рельса. Разработанная структура модели допускает решение имитационных задач динамически нагруженных транспортных систем методами математического моделирования. Также рассмотрен контактно-ротапринтный способ термоплакирования (лубликации) рельсов. **Результаты:** стендовые испытания термометаллоплакирования тяговой поверхности бандажа локомотива показали рост тягового усилия и значительное снижение интенсивности изнашивания элементов фрикционной пары. **Практическая значимость:** предложенные технологические решения по термометаллоплакированию и термоплакированию рабочих поверхностей позволяют повысить износостойкость гребней колесных пар и головок рельсов в кривых участках пути, а также увеличить реализуемое тяговое усилие локомотива, что в совокупности обеспечивает снижение эксплуатационных затрат и повышение безопасности движения.

Ключевые слова: термометаллоплакирование контакта «колесо — рельс», контактно-ротапринтное термоплакирование, физико-математическое моделирование, катковый стенд, стендовые испытания

Введение

Рельс — основной и наиболее дорогой элемент верхнего строения пути, поэтому увеличение продолжительности его жизненного цикла остается острой проблемой ОАО «РЖД». Функциональное предназначение рельса реализуется в динамически нагруженной системе взаимодействия «колесо — рельс», в которой тяговая поверхность катания колеса образует с рельсом открытую фрикционную пару трения сцепления, а контакт гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса служит для удержания подвижного состава в пределах рельсовой колеи. Реализуемые в контакте открытые фрикционные поверхности трения в зависимости от условий не всегда выполняют свое функциональное назначение в оптимальном режиме контактирования, что в итоге приводит к активному износу как гребней колес, так и боковой поверхности головки рельса и непроизводительным потерям тяговой мощности локомотива. Вся сложность в том, что данные пары трения, кардинально различные по функциональности, должны обладать столь же различными фрикционными свойствами. Общим для них является только то, что контакт металлических поверхностей в условиях значительных динамических нагрузок и скоростей скольжения должен иметь минимально возможную интенсивность изнашивания.

Анализ научно-исследовательских работ по проблеме взаимодействия в системе «колесо — рельс» показывает, что процессами сцепления по тяговой поверхности и в контакте гребня с рельсом можно управлять, добиваясь как повышения величины и стабильности тягового усилия локомотивов, так и снижения сверхнормативного износа боковой поверхности головки рельса и гребней колес [1–3].

Методы

Управление данными процессами имеет принципиальную возможность, а не реально достижимую простыми инженерными решениями цель. Наиболее проработанным вариантом является снижение сверхнормативного бокового износа, и связано это с тем, что данная проблема с конца прошлого века превратилась в «раковую опухоль» железных дорог всех технически развитых железнодорожных держав [4]. Наиболее продуктивным решением признано использование систем лубрикации.

Боковой износ гребней колес и боковой поверхности головки рельса — процесс естественный, как контакт двух металлических поверхностей в открытой поверхности трения в условиях довольно больших нагрузок при интенсивном проскальзывании, но он не должен быть существенно больше расчетных величин в соответствии с теорией расчета на износ для данных пар трения, то есть более нормативных значений. В соответствии с отчетами железных дорог можно отметить, что проблема не решена. В кривых малого радиуса при столь существенной грузонапряженности, как на участках Транссибирской магистрали, рельсы ДТ370ИК и ДТ400ИК, имеющие статус «повышенной износостойкости и контактной выносливости», служат не более одного года [2]. Износ рельсов практически соответствует износу гребней колес, что лимитирует общий ресурс колесной пары, который также ниже установленных нормативных значений.

Для повышения стабильности и величины сцепления на тяговой поверхности контакта «колесо — рельс» и снижения потерь тяговой энергии в мировой практике железных дорог используют активизаторы трения. Они способствуют изменению коэффициента трения качения в зоне контакта. Исследования в этой

области нацелены на создание в зоне контакта третьего тела — тонкого слоя на поверхностях колеса и рельса.

Теоретические основы термоплакирования и термометаллоплакирования рабочих поверхностей бандажей колесных пар локомотивов созданы на базе нескольких научных подходов. Среди них — квантово-химический анализ сил адгезии и когезии при контакте поверхностей трения системы «колесо — рельс», физико-математическое моделирование нелинейных фрикционных систем, а также трибоспектральная идентификация процессов трения и изнашивания.

Разработанная технология опирается на контактно-ротапринтные методы термоплакирования рабочих поверхностей колеса. Для этого применяют специальные материалы с заданными трибологическими показателями, которые выступают альтернативой дистанционным (форсуночным) методам внесения в зону контакта колеса локомотива с рельсом третьего тела. Такое третье тело может обладать антифрикционными свойствами (например, жидкие и пластичные смазочные материалы) или фрикционными (например, кварцевый песок).

Разработка теоретических основ термоплакирования стальных поверхностей открытых узлов трения с применением термостабильных термопластов-адгезивов со специальными функциональными присадками позволяет формировать на поверхностях трения колес третье тело в виде тонких нанослоев с анизотропными свойствами. Эти нанослои могут переноситься в процессе контактирования на рабочие поверхности рельсов.

Технология термометаллоплакирования в контакте колеса и рельса призвана управлять процессами сцепления. Это включает повышение коэффициента сцепления и обеспечение его стабильности, регулирование тягового усилия

локомотива по осям, управление поперечным креном, а также снижение вертикального износа колес и рельсов [6, 7].

Анализ проблем контакта колеса и рельса показывает, что исследования в области триботехники пока не дают полного представления о них. Существующие технологические решения зачастую базируются на аналогиях с подходами из других отраслей. При этом система «колесо — рельс» обладает специфическими особенностями, которые связаны с формированием фрикционных контактов в динамически взаимодействующих подсистемах: тяговом приводе подвижного состава и верхнем строении пути (ВСП).

Проведение исследований на реальных локомотивах и реальном ВСП связано со значительными трудностями и материальными затратами. Такие исследования оправданы лишь на итоговой стадии эксплуатационных испытаний. Отрабатывать и проверять проектные решения, а также оптимизировать значения управляющих параметров эффективнее и надежнее на физических моделях механической системы привода локомотива и верхнего строения пути. Подобные модели позволяют апробировать идеи проектных решений уже на стадиях проектирования, а также в ходе стендовых и доводочных испытаний.

Результаты

По имеющейся практике стендовых исследований и испытаний отдельные узлы подсистемы, например, тормоза, муфты, демпферы и т. д., исследуют на испытательных стендах. Однако для динамически нагруженных фрикционных механических систем подобные исследования могут создавать ложные представления о работоспособности, так как реализуются в условиях динамического нагружения, не соответствующего реальным условиям

эксплуатации. А так как механические системы моторно-рельсового транспорта являются существенно динамически нагруженными, то данные исследования подузлов и систем должны проводиться на стендах, динамически подобных натурным условиям эксплуатации.

Подобное замещение реального объекта при его исследовании для получения свойств и характеристик наиболее важных для исследователя возможно при применении физического моделирования с прогнозированием динамики процессов фрикционного взаимодействия в узлах трения. При разработке данных моделей применим «принцип оптимальной неточности»: модель должна быть настолько детализирована, насколько это необходимо для целей исследования, для которого ее создали [3].

В соответствии с подобным подходом при формировании модели реального процесса, установки или всей системы используются только наиболее важные характеристики, которые и моделируются при исключении менее значимых. Исходя из данных представлений и требований можно сформировать необходимые условия реализации модельного эксперимента для динамически нагруженных систем:

1. Динамические свойства механических систем лабораторных и стендовых установок должны быть подобны натурным. Данное условие достижимо, если механическая система испытательного стенда или лабораторной установки описывается одной математической моделью. Динамическое подобие достижимо, если совпадают их основные частоты и формы собственных колебаний.

2. Динамические свойства механических систем являются функциями времени, поэтому моделирование их реализации должно проходить в реальном временном масштабе.

Наиболее сложными при моделировании являются вопросы реализации динамическо-

го подобия модели и реальной механической системы. Связь приводной механической системы с исполнительной, как правило, реализуется через фрикционное взаимодействие (колесо — рельс, ведущая и ведомая полумуфты и т. д.), поэтому для выполнения данного требования при моделировании необходимо соблюдение условий:

- процессы реализации трения в модели и натурном образце должны быть подобны;
- модели механических подсистем должны быть подобны, так как в единую динамическую механическую систему их объединяет фрикционная подсистема.

При реализации физического моделирования, помимо динамического, как правило, обеспечиваются условия геометрического, физического и теплового подобия. Чем сложнее исследуемая система, тем большим конечным множеством моделей она может быть представлена, то есть вместо полной модели можно использовать ряд последовательных, каждая из которых описывает ее значимую для данной подсистемы характеристику. Подобное представление сложной системы при ее моделировании теоретически обосновано, так как соответствует теории Тьюринга, которая доказывает, что модель, представленная в более полной форме и по сложности соответствующая оригиналу, практически непригодна для детальных исследований.

Исследование формирования третьего тела, реализуемого в процессе термометаллоплакирования контакта «колесо — рельс», реализация которого проходит под влиянием динамических процессов со стороны силового привода и механической системы тележки подвижного состава и соответствующего отклика на данное воздействие со стороны верхнего строения пути, можно представить в виде соответствующих моделей механических подсистем и пары трения качения.

На базе теоретических основ физико-математического моделирования существенно-нелинейных фрикционных объектов [1, 5, 3] создана методика модельных испытаний мобильной системы «путь — тяговый подвижной состав». Для проведения модельной оптимизации процесса фрикционного взаимодействия колеса с рельсом и условий формирования на их поверхностях третьего тела при термометаллоплакировании создана физическая модель привода и механической системы тележки с учетом их динамических параметров. Ее многомассная эквивалентная расчетная схема после упрощения представлена на рис. 1.

В соответствии с разработанными принципами методики физико-математического

моделирования для реализации динамической совместимости процессов в механических системах и фрикционной поверхности пары трения качения «колесо — рельс» их следует представить в виде реализации двух последовательных этапов.

В динамически нагруженной фрикционной механической системе диссипативная функция трения не оказывает влияния на частоты собственных колебаний механических подсистем, изменяя только их декремент колебаний. Это дает возможность на первом этапе моделировать механические подсистемы без учета трения. Однако для того, чтобы соблюдалась динамическая совместимость процессов, при расчетах масштабных коэффициентов

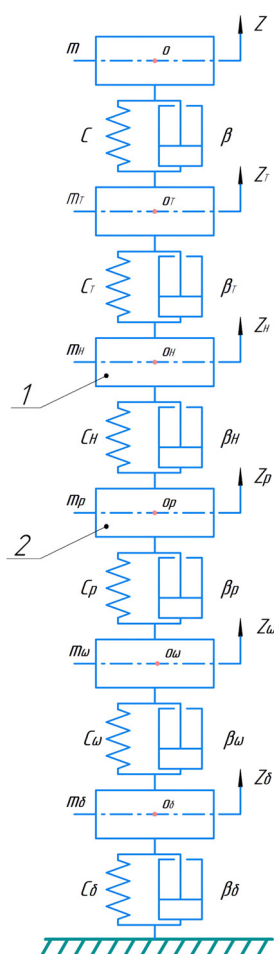


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема

следует учесть необходимость соблюдения равенства констант подобия частоты собственных колебаний $C_\omega = 1$ и времени $C_e = 1$.

Натурный образец и его модель следует изготавливать из одинаковых материалов, чтобы элементы механических подсистем обладали равными временами релаксации, что является необходимым условием реализации модельного эксперимента в реальном масштабе времени.

Предварительно проведенные исследования на машине трения показали, что при использовании технологии термометаллоплакирования на поверхности роликов реализуется процесс модификации поверхности. При этом увеличиваются величина и стабильность коэффициента трения качения, что положительно сказывается на процессе реализации тягового усилия локомотива. Поэтому при исследовании в расчетную модель механических подсистем привода и верхнего строения пути следует включить фрикционную модель поверхности контакта колеса и рельса.

Возможность данной реализации решена на втором этапе составления физической модели. Включение в механическую систему узла трения при условии соблюдения механического, теплового и динамического подобия усложняется различием их математического описания. Механические системы традиционно описываются проверенной практикой системой дифференциальных уравнений движения, анализ которых является основой составления их физических моделей. В то время как узлы трения ввиду их существенной нелинейности подобного математического описания не имеют. Их линеаризация, как правило, приводит к реализации больших погрешностей, поэтому введение в физическое описание механических систем параметров, наиболее существенно влияющих на формирование процессов трения — сцепления, не представляется возможным.

Решение данной проблемы возможно, если воспользоваться принципом суперпозиции, то есть при моделировании узла трения качения использовать проверенный практикой метод анализа размерностей с ограничениями [4, 5], при этом в его краевые условия ввести те соотношения параметров, которые были получены для реализации динамической совместимости механических подсистем с узлом трения.

Критерием достоверности процессов трения на физической модели узла трения является реализация на модели вида изнашивания, характерного для процессов сцепления натуральных колеса и рельса. Данное условие возможно, если при моделировании на поверхностях контакта обеспечить равенство констант подобия удельной нагрузки и времени контакта единице, то есть $C_q = 1$ и $C_t = 1$, что достигается введением параметра удельной нагрузки в число базисных параметров при реализации метода анализа размерностей.

Упрощенная эквивалентная расчетная схема строится на основе равенства кинетической и потенциальной энергии подсистем до и после приведения. Это обеспечивает динамическое подобие при моделировании: частоты и формы собственных колебаний реальных механических систем — привода и тележки локомотива, а также верхнего строения пути — остаются идентичными.

При создании этой расчетной схемы используется ряд допущений:

- Сосредоточенные массы механической системы подвижного состава — кузов, элементы тележки, колесные пары — рассматриваются как абсолютно жесткие тела, обладающие массой m_i .
- ВСП моделируется в виде идеальной балки на упругом основании постоянного поперечного сечения по всей длине.

Демпфирование колебаний в вертикальной плоскости обеспечивается за счет рессорного подвешивания. При этом возможные деформации рессорного подвешивания в горизонтальной плоскости не учитываются.

Основной источник динамических возмущений по обеим рельсовым нитям при качении колеса по рельсу (90–99 % воздействия) — непрерывные неровности пути в вертикальной плоскости μ_z . Влияние групповых и одиночных неровностей на колесо пренебрежимо мало из-за их незначительного количества.

Если рассматривать движение масс кузова, элементов тележки и неподрессоренной части (колесной пары) по вертикальным неровностям рельсового пути — при условии, что неровности на обеих рельсовых нитях одинаковы ($\eta_1 = \eta_1^1$; $\eta_2 = \eta_2^1$), — то все колеса тележки совершают одинаковые перемещения. Это позволяет упростить эквивалентную расчетную схему до модели движения одного колеса.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения: m — приведенная масса кузова; m_t — масса тележки; m_n — масса колесной пары (необдрессоренная часть тележки); m_p — приведенная масса рельса; $m_{ш}$ — приведенная масса шпалы; m_b — приведенная масса балласта; θ , θ_t , θ_k , θ_p , $\theta_{ш}$, θ_b — соответственно центры масс корпуса, тележки, колеса, рельса, шпалы и балласта.

Тяговый состав конструктивно имеет две тележки (для одной секции), поэтому масса кузова, а также величины жесткостей и демпфирования, в том числе центрального подвешивания, распределяются между ними равномерно. В зависимости от вида подвижного состава и, соответственно, количества колес η_i в тележке локомотива величины надрессорных и неподрессоренных частей тележки, величины жесткостей и демпфирования будут в η_i раз меньше.

Структура полученной модели, помимо воспроизведения на стенде, позволяет исполь-

зовать ее для решения имитационных задач поведения динамически нагруженных транспортных механических систем при математическом моделировании.

Исследование формирования сил трения сцепления по тяговой поверхности колеса и рельса в условиях динамического воздействия формирующих его механических подсистем тягового привода, тележки и верхнего строения пути позволяет значительно повысить достоверность данных исследований. Полученная упрощенная эквивалентная расчетная схема с ее инерционными, жесткостными и демпфирующими характеристиками в целом воспроизводится на испытательном катковом стенде, представленном на рис. 2 и 3.

Обсуждение

В качестве исходного материала для термометаллоплакирования была использована смесь мягких металлов с прочной и высокой адгезией к высокопрочным стальным поверхностям.

Увеличение ресурса исследуемой фрикционной системы «колесо — рельс» обеспечивается износом сформированного в процессе термометаллоплакирования тонкого слоя рабочего тела на тяговой поверхности колеса при его постоянном восстановлении. Реализация процесса термометаллоплакирования представлена на рис. 4.

При этом поверхность колеса подвергается процессу микрошлифования, которое сопровождается минимальным износом, интенсивность которого на порядок ниже номинального уровня. В свою очередь, увеличение тягового усилия реализуется за счет значительного увеличения величины фактической площади контакта поверхности колеса и рельса (в 4–5 раз) и незначительного снижения твердости или предельного напряжения на сжатие (в 2–3 раза) материала рабочего тела. Так,

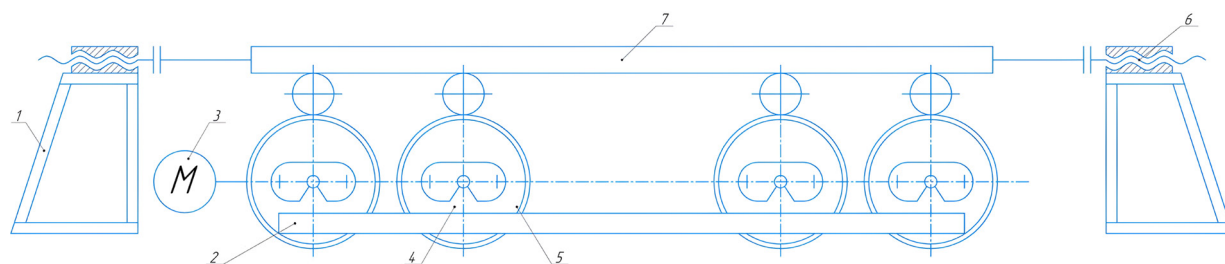
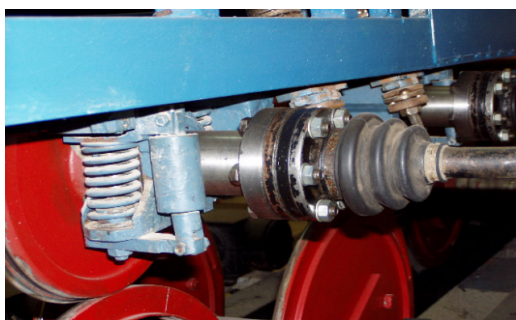


Рис. 2. Схема каткового стенда: 1 — консоли; 2 — рама стенда; 3 — привод катков; 4 — опоры катков; 5 — конические редукторы; 6 — регулировочные винты; 7 — модель экипажа



а



б

Рис. 3. Конструкция стенда: *а* — привод катков, моделирующих колесные пары локомотива; *б* — карданная передача привода катков



а



б

Рис. 4. Реализация процесса термометаллоплакирования:
а — поверхность колеса до металлоплакирования; *б* — поверхность колеса после термометаллоплакирования смесью мягких металлов

величина твердости материала третьего тела на тяговой поверхности колеса снижается до уровня 90–100 НВ. Данное снижение твердости компенсируется увеличением величины ФПК, что позволяет обеспечить увеличение силы тяги на 30%.

Проведенные на катковом стенде испытания показали, что термометаллоплакирование тяговой поверхности бандажа локомотива обеспечивает значительное повышение тягового усилия и существенное снижение интенсивности изнашивания элементов фрикционной

системы «тяговая поверхность бандажа колеса — рельс».

В процессе оптимизации технологического оборудования контактно-ротапиринтного термоплакирования разработана конструкция, которая для эксплуатируемого парка локомотивов является рабочим органом гребнерельсосмазывания (лубрикации рельсов). Данное решение позволяет со временем отказаться от применения дорогостоящих специализированного подвижного состава и вагонов-рельсосмазывателей, а также исключить применение низкоэффективных стационарных систем лубрикации.

Список источников

1. Моделирование мобильных фрикционных систем: учебник / В. В. Шаповалов [и др.]; под ред. В. В. Шаповалова. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. 1147 с.
2. Мурга Л. Е., Луговский А. Ю., Богданов О. К. О результатах наблюдений за боковым износом рельсов ДТ350 и ДТ400ИК // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 6. С. 20–24.
3. Современная трибология: итоги и перспективы / Э. Д. Браун [и др.]; отв. ред. акад. РАН К. В. Фролов; Российская академия наук, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова. М.: URSS ЛКИ, 2008. 476 с.
4. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо — рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78. № 3. С. 177–182.
5. Физико-математическое моделирование нелинейных фрикционных систем / В. В. Шаповалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технические науки. 2014. № 6. С. 77–82.
6. Харламов П. В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на по-

верхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 12. С. 556–560.

7. Модельная оптимизация технологии контактно-ротапиринтного плакирования поверхностей трения / В. В. Шаповалов [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 1. С. 84.

8. Лубрикация рельсов и воздействие на путь подвижного состава / В. С. Косов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 48–51.

9. Упруго-диссипативные характеристики тяжело-нагруженных модифицированных пар трения / С. Л. Чернышев [и др.] // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 1. С. 58–67. DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67.

10. Improving the Energy Efficiency of Power Transmissions of a Rolling Stock on the Basis of Dynamic Anisotropy of Frictional Contact / V. Shapovalov [et al.] // E3S Web of International Conference “Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems (EEESTS-2019)”. 2019. Vol. 104. Art. no. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201910401002

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 13.08.2026

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — кандидат техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru
ШАПОВАЛОВ Владимир Владимирович — доктор техн. наук, профессор; spn55@mail.ru
ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — доктор техн. наук, профессор; 79219751198@yandex.ru
ЩЕРБАК Петр Николаевич — доктор техн. наук, профессор; spn55@mail.ru
КОЛОДЯЖНЫЙ Илья Алексеевич — аспирант; spn55@mail.ru
МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; nttk@pgups.ru

Simulation Results of Locomotive Wheel — Rail Adhesion During Thermometal Cladding of the Wheel Tread Surface

O. S. Valinskij¹, V. V. Shapovalov², A. A. Vorob'ev¹, P. N. Shcherbak²,
I. A. Kolodyazhnyj², N. K. Migulin¹

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Rostov State University of Railway Transport, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: Valinskij O. S., Shapovalov V. V., Vorob'ev A. A., Shcherbak P. N., Kolodyazhnyj I. A., Migulin N. K. Simulation Results of Locomotive Wheel — Rail Adhesion During Thermometal Cladding of the Wheel Tread Surface // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 537–547. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-537-547 (In Russian)

Abstract

Objective: investigation and substantiation of the effectiveness of thermometal cladding of the locomotive wheel tread surface to increase tractive effort and reduce wear in the wheel — rail system. **Methods:** physical modeling of the locomotive drive mechanical system and the permanent way was applied, ensuring dynamic similarity to full-scale objects; the equality of kinetic and potential energy of subsystems before and after reduction ensured the identity of natural frequencies and mode shapes. The correspondence of the wear type on the model to the wear pattern of the full-scale wheel — rail contact was adopted as the validity criterion for reproducing friction processes. The developed model structure allows solving simulation tasks of dynamically loaded transport mechanical systems using mathematical modeling methods. The contact rotary-printing method of rail thermocladding (lubrication) is also considered. **Results:** bench tests of thermometal cladding of the locomotive wheel tread demonstrated an increase in tractive effort and a significant reduction in the wear rate of friction pair elements. **Practical importance:** the proposed technological solutions for thermometal cladding and thermocladding of working surfaces allow increasing the wear resistance of wheel flanges and rail heads in curved track sections, as well as increasing the achievable tractive effort of the locomotive, which together ensures a reduction in operating costs and an improvement in traffic safety.

Keywords: thermometal cladding of wheel — rail contact, contact rotary-printing thermocladding, physical and mathematical modeling, roller test rig; bench tests

References

1. Shapovalov V. V., et al., ed. by V. V. Shapovalov. Modelirovanie mobil'nykh friktsionnykh sistem: uchebnik [Modeling of Mobile Friction Systems: A Textbook], Moscow, Federal State Budgetary Institution of Additional Professional Education “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2020, 1147 p. (In Russian)
2. Murga L. E., Lugovskiy A. Yu., Bogdanov O. K. O rezul'tatakh nablyudeniy za bokovym iznosom rel'sov DT350 i DT400IK [On the Results of Observations

of Lateral Wear of Rails DT350 and DT400IK], *Put' i putevye khozyaystvo [Track and Track Facilities]*, 2023, no. 6, pp. 20–24. (In Russian)

3. Braun E. D., et al. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern Tribology: Results and Prospects], Russian Academy of Sciences, A. A. Blagonravov Institute of Machine Science, Moscow, URSS LKI, 2008, 476 p. (In Russian)

4. Shapovalov V. V., et al. Povyshenie effektivnosti friktsionnoy sistemy “koleso — rel's” [Improving the Efficiency of the “Wheel — Rail” Friction

System], *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]*, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 177–182. (In Russian)

5. Shapovalov V. V., et al. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie nelineynykh friktsionnykh sistem [Physical and Mathematical Modeling of Nonlinear Friction Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Higher Educational Institutions. Technical Sciences]*, 2014, no. 6, pp. 77–82. (In Russian)

6. Kharlamov P. V. Issledovanie obrazovaniya vtorichnykh struktur friktsionnogo perenosa na poverkhnosti stal'nykh obraztsov pri realizatsii tekhnologii metalloplakirovaniya [Study of the Formation of Secondary Structures of Frictional Transfer on the Surface of Steel Samples during the Implementation of Metal-Plating Technology], *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making]*, 2021, no. 12, pp. 556–560. (In Russian)

7. Shapovalov V. V., et al. Model'naya optimizatsiya tekhnologii kontaktno-rotaprintnogo plakirovaniya poverkhnostey treniya [Model Optimization of the Technology for Contact-Rotaprint Cladding of Friction Surfaces], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Universities. North Caucasian Region. Technical Sciences]*, 2018, no. 1, p. 84. (In Russian)

8. Kosov V. S., et al. Lubrikatsiya rel'sov i vozdeystvie na put' podvizhnogo sostava [Rail Lubrication and the Impact of Rolling Stock on the Track],

Zheleznodorozhnyy transport [Railway Transport], 2022, no. 7, pp. 48–51. (In Russian)

9. Chernyshev S. L., et al. Uprugo-dissipativnye kharakteristiki tyazhelo-nagruzhennykh modifitsirovannykh par treniya [Elastic-Dissipative Characteristics of Heavily Loaded Modified Friction Pairs], *Trenie i iznos [Friction and Wear]*, 2023, vol. 44, no. 1, pp. 58–67. DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67 (In Russian)

10. Shapovalov V., et al. Improving the Energy Efficiency of Power Transmissions of a Rolling Stock on the Basis of Dynamic Anisotropy of Frictional Contact, *E3S Web of Conferences: International Conference “Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems (EEESTS-2019)”*, 2019, vol. 104, art. no. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201910401002

Received: July 03, 2026

Accepted: August 13, 2026

Author's information:

Oleg S. VALINSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Vladimir V. SHAPOVALOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering; 79219751198@yandex.ru

Petr N. SHCHERBAK — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Il'ya A. KOLODYAZHNYJ — Graduate Student; ntk@pgups.ru

Nikita K. MIGULIN — Graduate Student; ntk@pgups.ru