

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.423

doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-58-68

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Иван Александрович Кудьяров<sup>1</sup>, Павел Юрьевич Иванов<sup>2</sup>, Кирилл Александрович Московских<sup>3</sup>, Евгений Юрьевич Дульский<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>1</sup> mr.licrimovor@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4896-8662>

<sup>2</sup> savl.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

<sup>3</sup> kirillmoskovskikh@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9790-5445>

<sup>4</sup> E.Dulskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6637-3104>

### Аннотация

Цель исследования: определить физические и эксплуатационные механизмы образования дефектов на поверхности катания колесных пар железнодорожного подвижного состава, а также выявить влияние термических и механических факторов, возникающих при торможении, на формирование данных дефектов.

Задача, решению которой посвящена статья: теоретическое исследование механизма и причин образования дефектов на поверхности катания колесных пар.

Методы исследования: анализ статистики отказов тормозного оборудования по данным компании ОАО «РЖД»; теоретический анализ термических и механических процессов, возникающих при торможении в системе «колодка-колесо-рельс», включая фазовые превращения в приповерхностных слоях стали колеса.

Новизна работы: Выявлена роль мартенситных превращений в приповерхностных слоях колеса, возникающих при быстрых циклах нагрева и охлаждения, как ключевого механизма образования микротрещин и дефектов.

Результаты исследования: разработано теоретическое обоснование механизма образования дефектов, включающее фазовые и диффузионные процессы в зоне контакта колеса и колодки.

Выводы: на основе оценки условий безюзового торможения и надежности тормозного оборудования выявлено, что дефекты поверхности катания колесных пар такие как ползун и выщерблина не во всех случаях возникают в процессе торможения поезда; заклинивание колесной пары может происходить в результате возникновения межмолекулярных диффузионных связей после остановки поезда с разогретыми колодками, что после трогания поезда с места приводит к юзу колесной пары; при интенсивном торможении в приповерхностных слоях колесной стали происходит фазовое превращение с образованием аустенита, таким образом размягчённый вследствие термического воздействия металл может частично прилипнуть и осесть обратно на поверхность катания, образуя навар.

**Ключевые слова:** колесная пара, поверхность, тормозная система, ползун, выщерблина, навар.

Ссылка для цитирования:

Кудьяров И.А. Теоретическое исследование механизма образования дефектов на поверхности катания колесных пар подвижного состава / И.А. Кудьяров, П.Ю. Иванов, К.А. Московских, Е.Ю. Дульский // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 1. – С. 58-68. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-58-68.

Original article

Open Access Article

## THEORETICAL STUDY OF THE MECHANISM OF FORMING DEFECTS ON THE ROLLING SURFACE OF WHEEL PAIRS OF THE ROLLING STOCK

# Ivan Alekandrovich Kudyarov<sup>1</sup>, Pavel Yuryevich Ivanov<sup>2</sup>, Kirill Aleksandrovich Moskovskikh<sup>3</sup>, Evgeny Yuryevich Dulsky<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup> mr.licrimovor@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4896-8662>

<sup>2</sup> savl.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

<sup>3</sup> kirillmoskovskikh@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9790-5445>

<sup>4</sup> E.Dulskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6637-3104>

## Abstract

The study objective: To determine the physical and operational mechanisms of forming defects on the rolling surface of wheel pairs of the rolling stock, as well as to find the influence of thermal and mechanical factors that occur during braking on the formation of these defects.

The task to which the paper is devoted: Theoretical study of the mechanism and causes of defects on the rolling surface of wheel pairs.

Research methods: Statistic analysis of braking equipment failures according to JSC Russian Railways; theoretical analysis of thermal and mechanical processes during braking in the shoe-wheel-rail system, including phase transformations in the surface layers of steel wheels.

The novelty of the work: The role of martensite transformations is found out in the surface layers of the wheel, which occur during rapid cycles of heating and cooling, as a key mechanism for forming microcracks and defects.

Research results: Theoretical substantiation of the defect formation mechanism is developed, including phase and diffusion processes in the contact zone of the wheel and the shoe.

Conclusions: Based on an assessment of the conditions of antiskid braking and the reliability of braking equipment, it is found out that defects in the rolling surface of wheel pairs such as slid flat and shelled tread do not always occur during train braking; jam of the wheel pair may occur as a result of intermolecular diffusion bonds after stopping the train with shoe heating, which leads to the wheel pair skidding after the train starts moving; during intensive braking, a phase transformation occurs in the subsurface layers of the wheel steel with the formation of austenite, thus the metal softened due to thermal action can partially adhere and deposit back onto the rolling surface, forming a weld-on deposit.

**Keywords:** wheel pair, surface, brake system, slid flat, shelled tread, weld-on deposit.

## Reference for citing:

Kudyarov IA, Ivanov PYu, Moskovskikh KA, Dulsky EYu. Theoretical study of the mechanism of forming defects on the rolling surface of wheel pairs of the rolling stock. *Transport Engineering*. 2026;1:58-68. doi: 10.30987/2782-5957-2026-1-58-68.

## Введение

Поверхность катания колеса – это зона, где локализуется большое количество динамических и статических нагрузок, особенно в местах контактов колodka-колесо и колесо-рельс. В местах контактов колodka-колесо и колесо-рельс под воздействием давления, трения и циклического нагрева/охлаждения возникают процессы, приводящие к износу, пластической деформации и накоплению усталостного повреждения. Причины образования дефектов на поверхности катания колеса различаются по характеру возникновения:

– естественный износ – износ в процессе эксплуатации,

– технологические нарушения – нарушения технологии ремонта или производства вагонов, осмотра или процесса торможения [1].

Неисправности тормозного оборудования могут повышать вероятность обра-

зования дефектов на поверхности катания колесных пар, по этой причине была рассмотрена статистика отказов тормозного оборудования. На рис. 1 представлена диаграмма Парето отказов автотормозного оборудования за 2023-2024 год [2] по данным компании ОАО «РЖД» на сети дорог.

Как видно из приведенной диаграммы большую часть отказов автотормозного оборудования составляет отказ воздухо-распределителя (ВР). ВР регулирует давление в тормозном цилиндре путем подачи или выпуска сжатого воздуха. Один из видов неисправности ВР приводит к чрезмерному давлению в тормозном цилиндре, не соответствующему величине разрядки тормозной магистрали, что вызовет избыточное усилие прижатия тормозной колдки. Также имеются самопроизвольные срабатывания тормозов, которые могут вызывать продолжительное трение и

нагрев колодок в ходе движения поезда. Существуют нарушения процесса отпуска, а значит, тормозная колодка останется

прижатой после торможения. Все это косвенно приводит к повышению вероятности образования дефектов колесных пар.

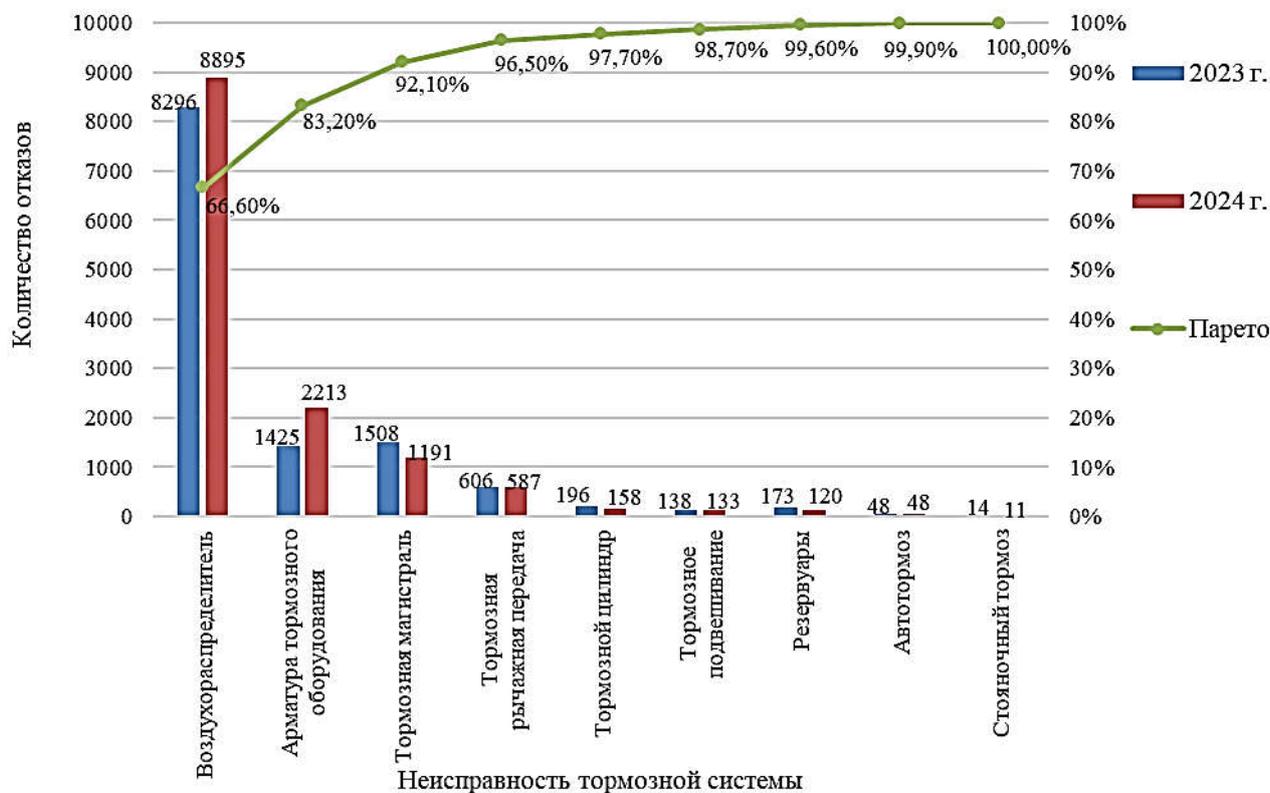


Рис. 1. Диаграмма Парето отказов автотормозного оборудования за 2023 и 2024 года  
 Fig. 1. Pareto chart of automatic brake equipment failures for 2023 and 2024

Известно исследование давления тормозного цилиндра (ТЦ) на среднем режиме ВР после полного служебного тор-

можения, результаты которого приведены на рис. 2 [3].

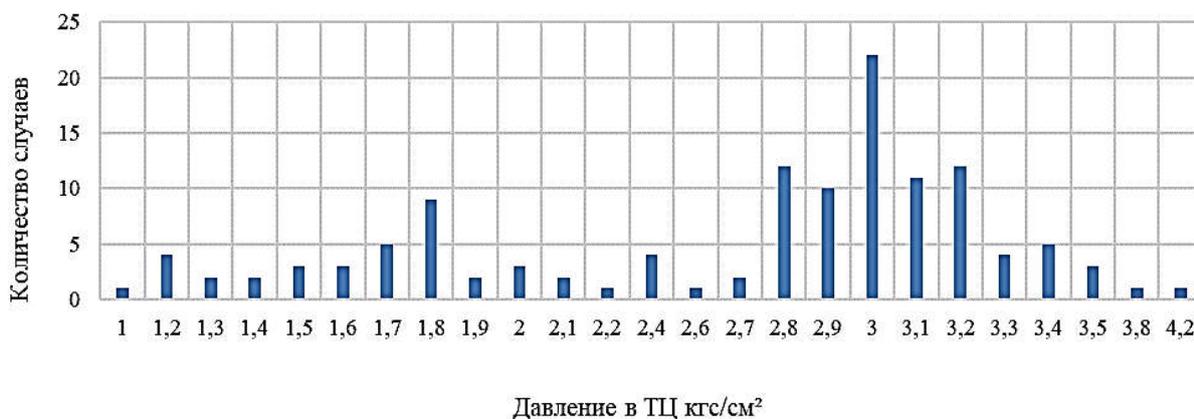


Рис. 2. Данные исследования по распределению давления в ТЦ на среднем режиме ВР для полного служебного торможения  
 Fig. 2. Research data on pressure distribution in the TC at the medium VR mode for full service braking

Согласно техническим требованиям, ВР на среднем режиме при полном служебном торможении должен реализовыв-

ать давление в тормозном цилиндре в пределах от 2,8 до 3,3 кгс/см² [4]. Как видно из диаграммы, действительный диапа-

зон давлений варьируется от 1 до 4,2 кгс/см<sup>2</sup>. Давление тормозного цилиндра напрямую влияет на величину прижимной силы тормозной колодки к поверхности катания колеса. При недостаточном давлении торможение оказывается неэффективным, а при избыточном – усиливается трение в контакте колодка-колесо, что способствует нагреву колодок и поверхности

катания. Вероятность нормальной работы ВР составляет 0,568, вероятность низкого давления 0,352, вероятность высокого давления 0,08, при этом максимальное превышение давления ТЦ относительно нормы составило 4,2 кгс/см<sup>2</sup> 40 %, что может повториться с вероятностью 0,008. Рассмотрим математическое описание механизма появления дефектов.

### Описание причин и механизма образования ползунов, выщербин и наваров на поверхности катания колеса

К основным видам дефектов поверхности катания колесных пар можно отнести ползуны, навары и выщербины. Считается, что возникновение ползунов возникает вследствие заклинивания колесных пар при торможении, однако при проектировании тормозной системы вагонов выполняется условие безюзового торможения. Данное условие предполагает суще-

ственное превышение силы сцепления колеса с рельсом над тормозной силой. Для определения теоретических предпосылок возникновения данного процесса рассмотрим систему колодка-колесо-рельс в процессе торможения. На рис. 3 представлена схема расстановки сил, действующих на колесо в процессе торможения [5].

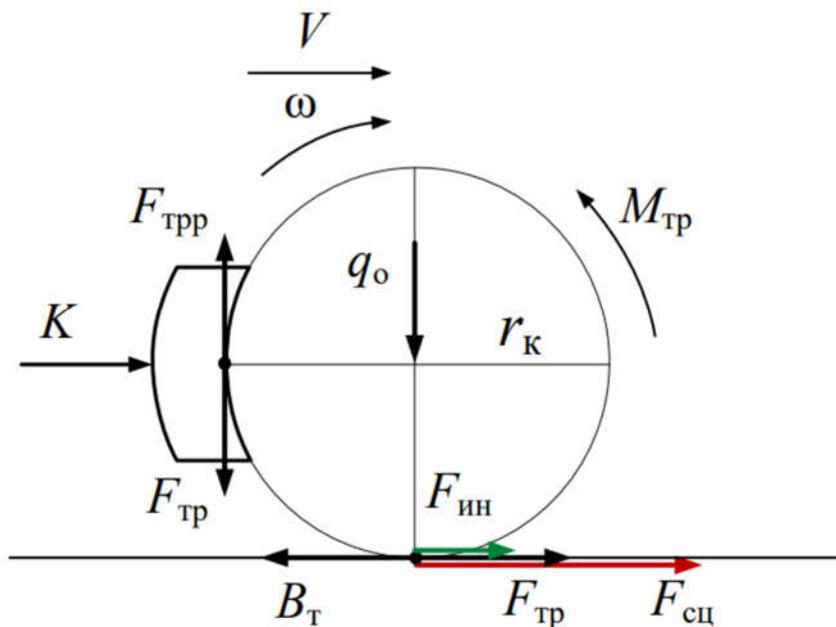


Рис. 3. Схема расстановки сил, действующих на колесо в процессе торможения

$V$  – линейная скорость движения, м/с;  $\omega$  – угловая скорость вращения, р/с;

$q_0$  – нагрузка, передаваемая от колеса на рельс, кН;  $F_{тр}$  – внутренняя сила трения по отношению к колесу, кН;  $F_{трр}$  – реактивная сила трения со стороны колеса на колодку, кН;  $K$  – прижимная сила колодки, кН;  $r_k$  – радиус колеса, м;  $M_{тр}$  – момент тормозной силы, кН·м,  $B_T$  – тормозная сила, кН;  $F_{ин}$  – сила инерции, кН;  $F_{сц}$  – сила сцепления, кН

Fig. 3. Diagram of the forces acting on the wheel during braking

$V$  – the linear velocity of motion, m/s;  $\omega$  – the angular velocity of rotation, p/s;

$q_0$  – the load transferred from the wheel to the rail, kN;  $F_{tr}$  – the internal friction force against the wheel, kN;  $F_{trr}$  – the reactive friction force from the wheel to the shoe, kN;  $K$  – the downforce of the shoe, kN;  $r_k$  – the radius of the wheel, m;  $M_{tr}$  – the moment of braking force, kNm,  $W_t$  – braking force, kN;  $F_{in}$  – inertia force, kN;  $F_{sc}$  – clutch force, kN

При интенсивном торможении в зоне контакта между колодкой и колесом происходит молекулярное сцепление поверхностных слоев. Это вызывает локальное повышение температуры, вследствие преобразования энергии деформации в тепловую [6]. Это приводит к размягчению металла или даже его расплавлению.

Качение колеса по рельсу без юза обеспечивается силой сцепления  $F_{\text{сц}}$ , которая возникает в точке контакта колеса с рельсом и действует со стороны рельса на колесо. Сила сцепления определяется (1)

$$F_{\text{сц}} = q_0 \psi, \quad (1)$$

где  $\psi$  – коэффициент сцепления колеса с рельсом находится по (2).

$$\psi = 0,21 \frac{V+200}{3V+200} \cdot \frac{0,1q_0+100}{0,4q_0+100}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость движения поезда, км/ч;  $q_0$  – осевая нагрузка, тс.

Существует условие безюзового торможения (3), при котором не возникает заклинивание колесной пары [7]

$$B_T \leq F_{\text{сц}}. \quad (3)$$

Таким образом, максимальная реализуемая тормозная сила ограничена величиной коэффициента сцепления колеса с рельсом. Одним из ключевых параметров, характеризующих риск возникновения дефектов, является коэффициент запаса по нажатию [8] – запас силы нажатия колодки на колесо до возникновения заклинивания колесной пары, и определяется (4)

$$k_{\text{зап}} = \frac{F_{\text{сц}}}{B_T}. \quad (4)$$

При значении  $k_{\text{зап}} > 1$  колесо движется без проскальзывания, а при  $k_{\text{зап}} \leq 1$  появляется вероятность возникновения юза. На рис. 4 изображена зависимость коэффициента запаса по нажатию от скорости движения для чугунных колодок [5].

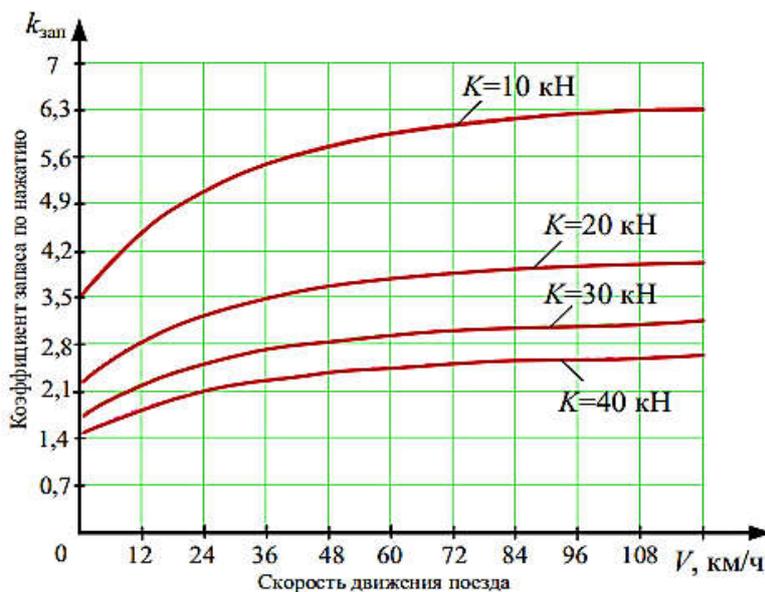


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса по нажатию от скорости движения поезда для чугунной колодки

Fig. 4. Dependence of the safety factor under braking pressure on train speed for a cast-iron brake block

На грузовых вагонах используются композиционные колодки, но характер зависимости будет верным как для чугунных, так для композиционных колодок, для порожнего режима согласно данным документации нажатие в пересчете на чугунные не отличается и составляет 3,5 тс [9]. На графике видно, что при уменьшении скорости коэффициент запаса падает, а значит, риск заклинивания увеличивается.

Тем не менее у грузовых вагонов коэффициент запаса находится в допустимых пределах. Так для груженого вагона  $q_0 = 25$  тс,  $K = 7$  тс коэффициент запаса равен  $k_{\text{зап}} = 3,57$ , для порожнего  $q_0 = 5$  тс,  $K = 3,5$  тс  $k_{\text{зап}} = 1,67$ , а значит тормозной силы недостаточно для заклинивания колесной пары при исправной системе торможения. Таким образом можно сделать вывод, что по-

рожные грузовые вагоны подвержены заклиниванию колесных пар с наибольшей вероятностью. При этом для заклинивания колесной пары порожнего грузового вагона в процессе торможения необходимо снижение сцепления не менее чем на 40 %, или превышение тормозной силы относительно своего максимально возможного значения на 67 %.

Для остановки колесной пары в случае наступления данных событий потребуются продолжительное время дисбаланса сил, так как у колесной пары имеется инерция вращения. Если принять массу колесной пары 1,2 т и её момент инерции  $110 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , то для остановки колесной пары со скорости 60 км/ч требуется время дисбаланса до 16 секунд. Таким образом можно сделать вывод о том, что кратковременная разгрузка колесной пары вследствие динамических процессов к остановке вращения привести не может.

С учетом статики неисправности ВР образование ползуна в таком случае может произойти не чаще, чем на 8 вагонов из 1000, однако из статистики ОАО «РЖД» известно, что ползуны и выщербины встречаются на 260 вагонов из 1000. Таким образом можно сделать вывод, о том, что заклинивание колесных пар возникает чаще не вследствие превышения тормозной силы над силой сцепления колеса с рель-

сом при торможении, а по неким другим причинам. В связи с чем необходимо рассмотреть полный цикл взаимодействия колодки, колеса и рельса при торможении и отпуске. На заклинивание колесных пар может оказывать влияние тепловых процессов и сил прижатия колод к колесам при остановочных торможениях.

Рассмотрим процесс взаимодействия тормозных колодок с поверхностью катания колеса в зоне контакта. При торможении между колодкой и колесом возникает сила трения, в результате которой происходит локальное выделение тепловой энергии в пределах контактного пятна. Это приводит к интенсивному нагреву материала в зоне контакта. Кроме того, при движении колесной пары происходит ее поперечное смещение, что также способствует дополнительному тепловыделению и росту температуры колеса.

В работе [10] представлен эксперимент, в ходе которого проводилось торможение при постоянной скорости движения  $V = 70 \text{ км/ч}$  и давлении в тормозном цилиндре  $P = 0,62 \text{ атм.}$  на протяжении 20 минут. Температура в различных точках тела колеса регистрировалась термопарами, установленными на различных глубинах (рис. 5). Результаты показаний датчиков в процессе торможения представлены на графике (рис. 6).

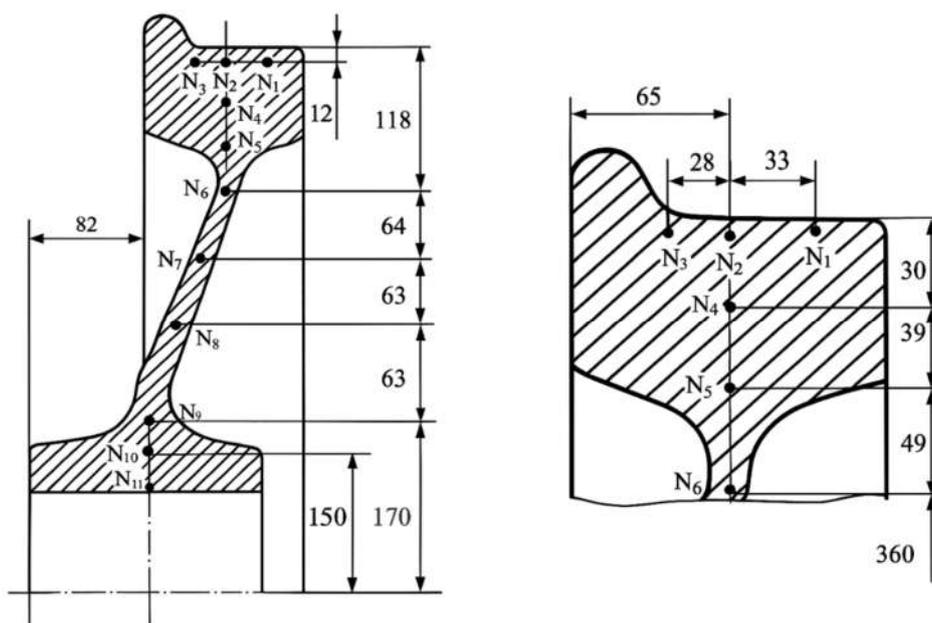


Рис. 5. Схема расположения датчиков в цельнокатаном колесе  
 Fig. 5. Diagram of sensor placement in a solid-rolled wheel

Анализ графика показывает, что при продолжительности торможения 20 минут максимальная температура в зоне глубиной 12 мм от поверхности катания колеса достигает 280 °С. В реальных условиях эксплуатации средняя продолжительность

торможения составляет около 2 минут, что соответствует температуре не выше 160 °С. Такая температура не приводит к образованию дефектов на поверхности катания.

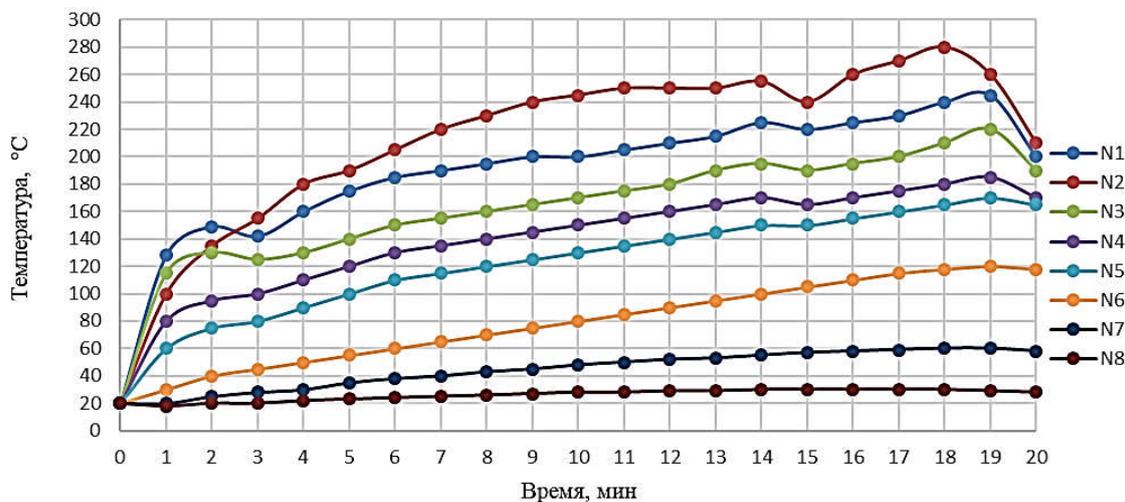


Рис. 6. График зависимости показаний температуры датчиков в процессе торможения  
 Fig. 6. Graph of the temperature sensor readings during the braking process

Однако, как описано в работах [11, 12, 13, 14], в процессе эксплуатации фиксируются температуры в диапазоне от 300 до 320 °С на поверхности катания, что подтверждается наличием цветов побежалости (рис. 7).

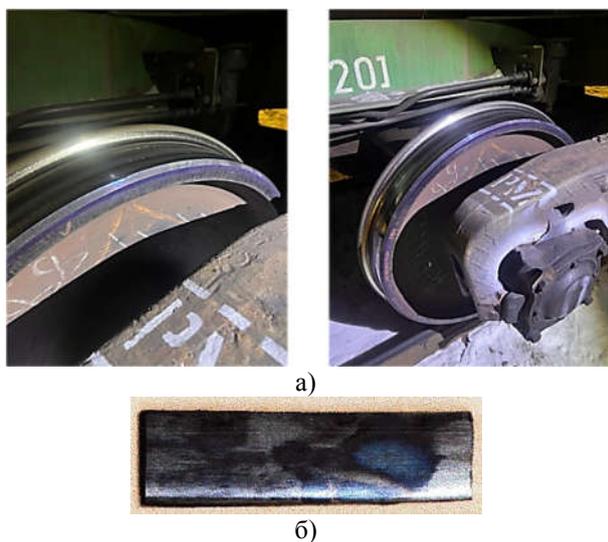


Рис. 7. Цвета побежалости в эксплуатации при осмотре на станции  
 а - на ободу колеса грузового вагона; б - на тормозной колодке пассажирского вагона

Fig. 7. Temper colors observed during inspection at the station

a - on the rim of the wheel of the freight car; b - on the brake pad of the passenger car

При этом отмечается, что данные температурные значения также не вызывают формирования ползунов.

Таким образом, исправность тормозной системы является критически важным фактором, определяющими процесс нагрева и конечную температуру на поверхности колеса.

В работе [15] представлена математическая модель, описывающая температурные процессы при трех последовательных торможениях. Согласно графику, приведенному на рис. 8, температура в приповерхностных (менее 1-2 мм) слоях колеса может превышать 700 °С.

Повышенные температуры, зафиксированные в результате моделирования, указывают на возможные фазовые превращения металла в приповерхностных слоях колеса, в которых температурные значения в ходе интенсивного торможения могут превышать 800 °С.

Учитывая, что материал колес – это углеродистая или низколегированная сталь (с содержанием легирующих элементов не более 2,5 %), такие температурные условия могут приводить к переходу феррита в аустенит [16].

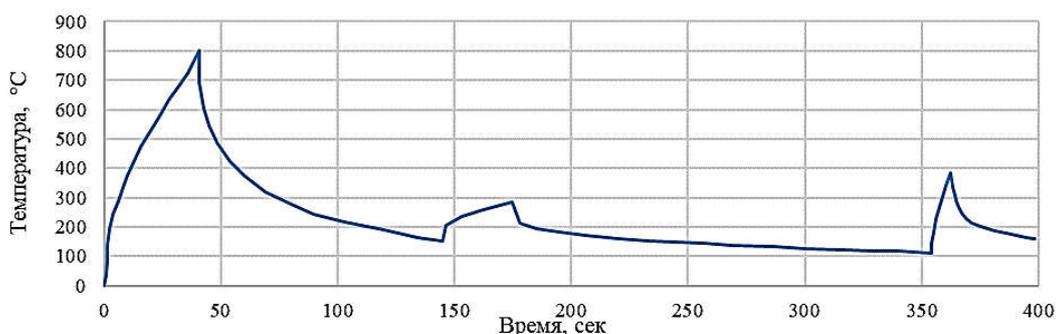


Рис. 8. График изменения температур при движении грузового вагона при реализации трехкратного торможения [15]

Fig. 8. Graph of temperature changes during the movement of a freight car under the implementation of triple braking [15]

При интенсивном торможении в приповерхностных слоях колесной стали происходит фазовое превращение с образованием аустенита – структуры, обладающей высокой пластичностью, пониженной твердостью и сравнительно низкой износостойкостью по сравнению с другими фазами стали. В таких условиях при контакте с тормозной колодкой происходит интенсивный износ поверхностного слоя колеса. Стачиваемый металл, размягченный вследствие термического воздействия, может частично прилипнуть и осесть обратно на поверхность катания. В результате этого формируется дефект в виде нагара [12].

Несмотря на хорошие свойства при высоких температурах, аустенит не является стабильной фазой при охлаждении. Скорость охлаждения во многом определяет, какая структура сформируется в результате фазового превращения. При медленном охлаждении аустенит может трансформироваться в феррито-перлитную структуру, тогда как быстрое охлаждение создает условия для образования мартенсита. На рисунке 9 представлена диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита.

После торможения идет резкое охлаждение. Скорость охлаждения в приповерхностных слоях колеса достигает в диапазоне от 100 до 200 °C/сек. Это обусловлено тем, что тепло быстро отводится в центр колеса, и у металла высокая теплопроводность – 46 Вт/(м·К). При таких условиях происходит мартенситное превращение – метастабильный фазовый пе-

реход, в ходе которого аустенит трансформируется структуру мартенсита [16]. Мартенсит характеризуется высокой твердостью и прочностью, но одновременно с этим отличается повышенной хрупкостью и низкой пластичностью, что может приводить к образованию трещин или выщербин.

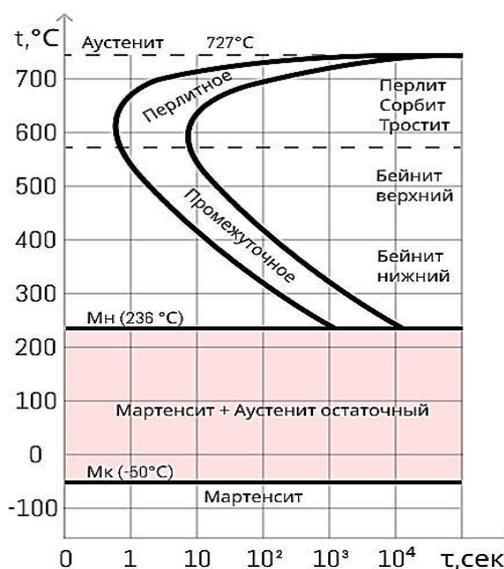


Рис. 9. Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита

Fig. 9. Diagram of isothermal transformation of supercooled austenite

Таким образом, формирование аустенита вблизи поверхности колеса создаёт условия для нежелательных структурных изменений, опасных для движения поездов. Мартенситное превращение в приповерхностных слоях может существенно повлиять на эксплуатационные свойства металла, способствуя образованию микротрещин и локальных повреждений. При

последующем охлаждении и затвердевании возможно возникновение эффектов адгезии между поверхностью колеса и тормозной колодкой в зоне контакта.

После остывания в зоне контакта колеса и прижатой колодки может сформироваться прочная межмолекулярная связь, которая создает тормозную силу превышающую силу сцепления колеса с рельсом. При этом колодка удерживает колесо за счет диффузии и прижатие колодки к поверхности катания не требуется. Таким образом колесо остается заклиненным даже после отпуска тормозов. Колесная пара не вращается при трогании поезда, что приводит к юзу колесной пары. В зоне контакта колеса и рельса возникает интенсивный износ, что приводит к образованию ползуна. При дальнейшем движении в пути следования может возникнуть дополнительная сила – от прохождения стыка, от движения в кривых участках пути или от вертикальных колебаний вагона, которая будет достаточной для «срыва» и начала

### Заключение

В ходе теоретического исследования механизма и причин образования дефектов на поверхности катания колесных пар определено:

– на основе оценки условий безюзного торможения и надежности тормозного оборудования выявлено, что дефекты поверхности катания колесных пар такие как ползун и выщербина не во всех случаях возникают в процессе торможения поезда;

– на процесс образования ползун, выщербин и наваров большое влияние оказывает температура в зоне контакта колодки и колеса, действующая на них после остановки;

– заклинивание колесной пары может происходить в результате возникновения межмолекулярных диффузионных связей после остановки поезда с разогретыми колодками, что после трогания поезда с места приводит к юзу колесной пары;

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова В.И., Зимакова М.В., Гришаев А.Н. причины возникновения дефектов колес с классификацией данных дефектов по ответственно-

сти участников перевозочного процесса за их возникновение / Из материалов XV Международной научно-технической конференции «По-

вращения заблокированной колесной пары.

В случае если прочность образовавшихся соединений между колодкой и колесом ниже силы сцепления колеса с рельсом, колесная пара не блокируется. Однако перегрев колеса под колодкой приводит к структурным изменениям металла. Помимо структурных изменений могут возникнуть остаточные деформации и внутренние напряжения, что в совокупности приводит к повышению хрупкости металла в месте перегрева. В результате динамического взаимодействия с рельсом перегретого участка поверхности катания колеса вызывает частичное выкрашивание металла и образование выщербины.

Дефекты на поверхности катания колеса напрямую связаны с исправностью тормозной системы и процессом торможения. Для более глубокого понимания механизма их формирования необходим анализ условий зарождения дефектов в процессе эксплуатации.

– при интенсивном торможении в приповерхностных слоях колесной стали происходит фазовое превращение с образованием аустенита, таким образом, размягченный вследствие термического воздействия металл может частично прилипнуть и осесть обратно на поверхность катания, образуя навар;

– при интенсивных торможениях температура в приповерхностных слоях колеса может достигать 700–1000 °С, что вызывает фазовые превращения (феррит → аустенит → мартенсит), сопровождающиеся ростом твердости и хрупкости материала, приводящих к возникновению выщербин.

Статья выполнена в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательской работы номер 1024032700167-7-2.1.5.

сти участников перевозочного процесса за их возникновение / Из материалов XV Международной научно-технической конференции «По-

- движной состав XXI века (идеи, требования, проекты)». Санкт-Петербург, 13-16 июля 2021 г. СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. с. 122-128.
2. Рогозин А. Ф. Анализ отцепок грузовых вагонов на сети железных дорог по итогам работы вагонного хозяйства за 2024 год [Электронный ресурс] / А. Ф. Рогозин. Объединение Производителей Железнодорожной Техники, 2024. Режим доступа: <https://goo.su/ricnkd> (дата обращения: 30.04.2025).
  3. Карпычев, В. А. Разработка метода системного анализа автотормоза грузового подвижного состава: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.07 / В. А. Карпычев; Моск. гос. ун-т путей сообщения. М., 2000. –316 л.
  4. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов 732-ЦВ-ЦЛ / Утв. МПС СССР. М.: Транспорт, 1984. 128 с. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293738/4293738248.htm> (дата обращения: 20.05.2025)
  5. Корсун А. А. Улучшение тормозных характеристик пассажирского подвижного состава железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.3 / Корсун Антон Александрович; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2025. 157 с.
  6. Крылов В. И., Крылов В. В. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник / В. И. Крылов, В. В. Крылов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 360 с.
  7. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Утв. заместителем министра путей сообщения Ф. И. Шулешко 15 августа 1980 г.
  8. Повышение эффективности работы тормозной системы пассажирских поездов / П. Ю. Иванов, А. И. Романовский, А. А. Хамнаева [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. № 3. С. 39-43. – DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-6.
  9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. – Утв.

приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 3 июня 2014 г. № 151.

10. Петров, С. Ю. Закономерности протекания процессов при работе трибосистемы колодка-колесо-рельс и пути повышения её долговечности: дис. ... д-ра техн. наук / С. Ю. Петров; Моск. гос. ун-т путей сообщения. М., 2002. 350 л.
11. Саврухин, А. В. Тепловые и деформационные процессы в ЦКК при длительном торможении / А. В. Саврухин, Р. А. Ефимов, А. Н. Неклюдов // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 2(57). С. 44-49. – EDN UHOHTR.
12. Ефимов, Р. А. Оценка тепловых нагрузений цельнокатаного колеса вагона при торможении: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Р. А. Ефимов. 2017. 196 с. – EDN TMBGJP.
13. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dul'skiy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 10-13 декабря 2019 года. Voronezh, 2020. P. 012086. – DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086. – EDN OHFFAP.
14. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П. Ю. Иванов, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3(47). С. 27-34. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34. – EDN LBPVTF.
15. Саврухин, А. В. Моделирование кинетики состояния колеса / А. В. Саврухин, А. Н. Неклюдов, Р. А. Ефимов // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 5(43). С. 42-47. — EDN PFFLAN.
16. Основы материаловедения (металлообработка): учебник для студентов учреждений среднего проф. образования / В. Н. Заплатин, Ю. И. Сапожников, А. В. Дубов [и др.]; под ред. В. Н. Заплатина. 8-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2017. 272 с. – ISBN 978-5-4468-4122-6.

## REFERENCES

1. Fedorova VI, Zimakova MV, Grishaev AN. Causes of wheel defects with classification of these defects according to the responsibility of participants in the transportation process for their occurrence. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference, July 13-16, 2021: Rolling Stock of the XXI century (Ideas, Requirements, Projects); St. Petersburg : FSBEI HE PGUPS; 2021.
2. Rogozin AF. Analysis of uncoupling freight cars on the railway network based on the results of the carriage industry in 2024. 2024 [cited 2025 April 30]. In: Association of Railway Equipment Manufacturers [Internet]. Available from: <https://goo.su/ricnkd>.
3. Karpichev VA. Development of a method for system analysis of truck brakes of rolling stock [dissertation]. [Moscow (RF)]: Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 2000.

4. Ministry of Internal Affairs of the USSR. General manual for the repair of braking equipment of cars 732-CV-CL [Internet]. Moscow: Transport, 1984 [cited 2025 May 20]. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293738/4293738248.htm>
5. Korsun AA. Improving the braking characteristics of passenger rolling stock of railways [dissertation]. [Irkutsk (RF)]: Irkutsk State Transport University; 2025.
6. Krylov VI, Krylov VV. Automatic brakes of rolling stock: textbook. 4th ed. Moscow: Transport; 1983.

7. Ministry of Railways of the Russian Federation. Rules of traction calculations for train work. 1980 Aug 15.
8. Ivanov PYu, Romanovsky AI, Khamnaeva AA. Improving the efficiency of the braking system of passenger trains. *Transport: Science, Technology, Management*. 2020;3:39-43.
9. Ministry of Transport of the Russian Federation. Rules for the maintenance of braking equipment and brake control of railway rolling stock. 2014 June 3.
10. Petrov SYu. Patterns of processes during operation of the shoe-wheel-rail tribosystem and ways to increase its durability [dissertation]. [Moscow (RF)]: Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 2002.
11. Savrukhin AV, Neklyudov AN. Thermal and deformation processes in wrought wheels during extended braking. *World of Transport and Transportation Journal*. 2015;13(2(57)):44-49.
12. Efimov RA. Assessment of thermal loads of a wrought wheel during braking [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2017.
13. Ivanov P, Khudonogov A, Dulskiy E. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness. *Journal of Physics: Conference Series*, December 10-13, 2019. Voronezh; 2020. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012086.
14. Ivanov PYu, Khudonogov AM, Dulsky EYu. Study of the temperature of brake shoes with varying degrees of wear during friction braking. *Herald of USURT*. 2020;3(47):27-34. DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.
15. Savrukhin AV, Neklyudov AN, Efimov RA. Simulation of the kinetics of the wheel. *World of Transport and Transportation Journal*. 2012;10(5(43)):42-47.
16. Zaplatin VN, Sapozhnikov YuI, Dubov AV. *Fundamentals of Materials Science (metalworking): textbook for students of secondary vocational institutions*. 8th ed. Moscow: Academy; 2017.

#### **Информация об авторах:**

**Кудьяров Иван Александрович** – аспирант кафедры «Транспортное машиностроение» Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. 8-901-652-52-10.

**Иванов Павел Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное машиностроение» Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. 8-950-065-21-77.

**Kudyarov Ivan Aleksandrovich** – Postgraduate Student of the Department of Transport Engineering at Irkutsk State Transport University, phone: 8-901-652-52-10.

**Ivanov Pavel Yuryevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering, Irkutsk State Transport University, phone: 8-950-065-21-77.

**Московских Кирилл Александрович** – аспирант кафедры «Транспортное машиностроение» Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. 8-924-617-62-57.

**Дульский Евгений Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения, тел. 8-983-403-46-43.

**Moskovskikh Kirill Aleksandrovich** – Postgraduate Student of the Department of Transport Engineering at Irkutsk State Transport University, phone: 8-924-617-62-57.

**Dulsky Evgeny Yuryevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, phone: 8-983-403-46-43.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 23.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 29.12.2025. Рецензент – Рассоха В.И., доктор технических наук, доцент Оренбургского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение»**

**The article was submitted to the editorial office on 23.10.2025; approved after review on 24.11.2025; accepted for publication on 29.12.2025. The reviewer is Rossokha V.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Orenburg State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**