

## Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.027.43(045)

doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-36-43

### О КОНТАКТНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ В ЗОНЕ ПОСАДКИ БАНДАЖА НА ОБОД КОЛЕСНОГО ЦЕНТРА

Дмитрий Александрович Князев<sup>1✉</sup>, Виктор Иванович Грек<sup>2</sup>, Виталий Владимирович Чунин<sup>3</sup>, Максим Владимирович Тимаков<sup>4</sup>, Евгений Юрьевич Качесов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Коломна, Россия

<sup>5</sup> Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД», Москва, Россия

<sup>1</sup> knyazev-da@vnikti.com

<sup>2</sup> grek-vi@vnikti.com

<sup>3</sup> chunin-vv@vnikti.com

<sup>4</sup> timakov-mv@vnikti.com

<sup>5</sup> kachesovey@center.rzd.ru

#### Аннотация

Описано взаимодействие поверхностей сопряжения бандажа и колесного центра при соединении с натягом, в результате которого возникает термическое сопротивление. При торможении локомотива возникает градиент температур между бандажом и колесным центром, что может привести к провороту бандажа. Для исследования влияния торможения на градиент температур были проведены сравнительные испытания двух покрытий,

наносимых на обод колесного центра с помощью плазменного напыления. По результатам испытаний можно сделать вывод, что их применение покрытия марки ПГ-19М-01 по ТУ 48-19-383-90 может уменьшить величину градиента температур между бандажом и колесным центром до 30 %.

**Ключевые слова:** провороты бандажей, сопротивление, колесо, напыление, теплопроводящее покрытие.

Ссылка для цитирования:

Князев Д.А. О контактном термическом сопротивлении в зоне посадки бандажа на обод колесного центра / Д.А. Князев, В.И. Грек, В.В. Чунин [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 10. – С. 36-43. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-36-43.

Original article

Open Access Article

### ON CONTACT THERMAL RESISTANCE IN THE ZONE OF FITTING THE TYRE ON THE RIM OF THE WHEEL CENTER

Dmitry Aleksandrovich Knyazev<sup>1✉</sup>, Viktor Ivanovich Grek<sup>2</sup>, Vitaly Vladimirovich Chunin<sup>3</sup>, Maksim Vladimirovich Timakov<sup>4</sup>, Evgeny Yuryevich Kachesov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Scientific Research and Engineering Institute of Rolling Stock, Kolomna, Russia

<sup>5</sup> Directorate of Traction – branch of Russian Railways, Moscow, Russia

<sup>1</sup> knyazev-da@vnikti.com

<sup>2</sup> grek-vi@vnikti.com

<sup>3</sup> chunin-vv@vnikti.com

<sup>4</sup> timakov-mv@vnikti.com

<sup>5</sup> kachesovey@center.rzd.ru

#### Abstract

The interaction of joint points of the tyre and the wheel center when connected with tension, resulting in thermal resistance, is described. When the locomotive

brakes, there occurs a temperature gradient between the tyre and the wheel center, which can lead to the tyre movement. To study the effect of braking on the tem-

perature gradient, comparative tests of two coatings applied to the rim of the wheel center using plasma spraying were carried out. Based on the results of the tests, it can be concluded that the use of PG-19M-01 coating according to TU 48-19-383-90 can reduce the

*Reference for citing:*

*Knyazev DA, Grek VI, Chunin VV, Timakov MV, Kachesov EYu. On contact thermal resistance in the zone of fitting the tyre on the rim of the wheel center. Transport Engineering. 2025;10:36-43. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-36-43.*

Колесо колесной пары является одним из самых напряженных элементов экипажной части железнодорожного подвижного состава. Особенно это касается составного колеса, состоящего из колесного центра, бандажа и заводного (стопорного) кольца (рис. 1). При сборке колеса бандаж монтируется на обод колесного центра с гарантированным натягом, что создает внутренние (остаточные) напряжения в элементах колеса, и крепится стопорным кольцом. Последующая установка колеса на ось колесной пары, также с гарантированным натягом, создает дополнительные внутренние (монтажные) напряжения в составном колесе. К ним в эксплуатации добавляются внешние нагрузки от действия вертикальных и боковых сил. Остановка, экстренное и служебное торможение подвижного состава выполняются тормозными колодками (чугунными или композиционными) при трении их по поверхности катания колеса. В процессе торможения кинетическая энергия движения подвижного состава преобразуется в тепловую энергию, нагревая тем самым поверхность бандажа, после чего тепло передается в обод колесного центра.

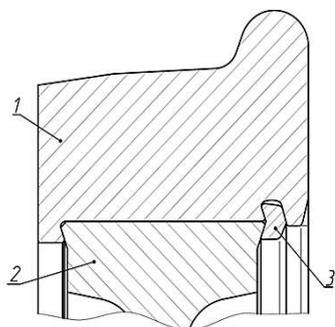


Рис. 1. Соединение бандажа с ободом колесного центра: 1 – бандаж; 2 – обод колесного центра; 3 – заводное (стопорное) кольцо

*Fig. 1. Connection of the tyre to the rim of the wheel center: 1 – tyre; 2 – rim of the wheel center; 3 – starting (stop) ring*

temperature gradient between the tyre and the wheel center by up to 30 %.

**Keywords:** tyre movements, resistance, wheel, spraying, heat-conducting coating.

Остановимся на соединении бандажа с ободом колесного центра и оценим его влияние на тепловое ослабление посадки бандажа при колодочном торможении.

При использовании под подвижным составом цельнокатанных колес тепловой поток от тормозной колодки распространяется в обод колесного центра и далее в диск колеса. Об этом подробно описано в работах член-корреспондента АН СССР, д.т.н. Иноземцева В.Г., который занимался вопросами тепловых расчетов тормозов [1, 2].

Составные колеса имеют несколько иную конструкцию в отличие от цельнокатанных колес, где, как указывалось выше, на обод колесного центра с гарантированным натягом насаживается бандаж (рис. 1).

Такая конструкция колеса при торможении приводит к иному распределению теплового потока от тормозной колодки в колесо. Еще в 1986 году было показано [3], что существующие методы распределения теплового потока от тормозной колодки в цельное колесо несколько отличаются от распространения тепла в составном колесе. Это связано с тем, что посадка бандажа на обод колесного центра создает в зоне контакта бандажа с ободом контактное термическое сопротивление (КТС)  $R$  [4, 5], тормозящее передачу тепла из бандажа в обод. Тем самым идет накопление тепла в бандаже, что способствует его повышенному нагреву, тепловому расширению и более интенсивному ослаблению, а при длительном торможении вплоть до полного снятия натяга.

При прохождении теплового потока через соприкасающиеся поверхности бандажа и обода колесного центра температуры на границе их раздела в любой момент времени будут равны только в том случае, если соприкосновение происходит во всех

точках поверхности. А это возможно, если контакт является идеальным. В этом случае линии теплового потока при подходе к зоне контакта не претерпевают сколь угодно заметных отклонений от прямых.

Когда соединение формируется в результате сборки с гарантированным натягом двух одинаковых или разных металлических материалов контакт деталей происходит лишь в ограниченном количестве точек (по небольшой части номинальной площади поверхности) за счет наличия макроотклонений, волнистости и шероховатости, которые зависят от структуры и точности формы при механической обработке. Ввиду ограниченных возможностей механической обработки сопрягаемых поверхностей бандажа и обода колесного центра, никакие две поверхности никогда не смогут образовать абсолютный контакт при сжатии их вместе. Между двумя контактирующими поверхностями всегда будут существовать зазоры ввиду определенной технологической неточности их обработки (рис. 2).

Задача теории контактного теплообмена твердых тел заключается в определении взаимосвязи между передаваемым через соединение тепловым потоком (или его проводимостью) и разностью температур на контактирующих поверхностях. Решение этой задачи включает расчет КТС, которое определяет потери температурного напора в соприкасающихся телах и равняется отношению приведенного перепада температуры к тепловому потоку:

$$R = \frac{1}{\lambda_k} = \frac{\Delta T}{q}, \quad (1)$$

где  $\lambda_k$  – термическая проводимость контакта, Вт/м·°С;  $R$  – контактное термическое сопротивление, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $q$  – плотность теплового потока, Вт·м<sup>-2</sup>;  $\Delta T$  – перепад температуры в зоне контакта, °С.

Течение тепла через сечение бандажа и обода колесного центра сопровождается термическим сопротивлением  $R_s$  (м<sup>2</sup>·°С/Вт). Это способность материала сопротивляться теплопроводности. Термическое сопротивление слоя  $R_s$  (м<sup>2</sup>·°С/Вт) характеризуется как отношение толщины

слоя  $\delta_s$  (м) к его коэффициенту теплопроводности  $\lambda_s$  (Вт/м·°С):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}. \quad (2)$$

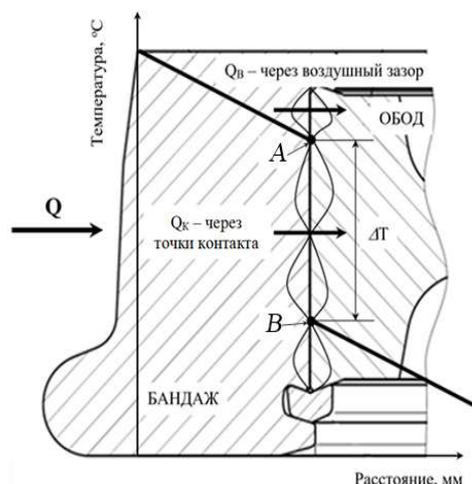


Рис. 2. Схема течения тепла через зону контакта:  $Q$  – общий тепловой поток;  $Q_k$  – тепловой поток через точки контакта;  $Q_b$  – тепловой поток через воздушный зазор;  $\Delta T$  – перепад температуры в зоне контакта;  $A, B$  – точки контакта бандажа и обода соответственно

Fig. 2. Diagram of the heat flow through the contact zone:  $Q$  is the total heat flow;  $Q_k$  is the heat flow through the contact point;  $Q_b$  is the heat flow through the air gap;  $\Delta T$  is the temperature drop in the contact zone;  $A, B$  are the contact points of the tyre and rim, respectively

Если на соединение воздействует тепловой поток, равномерное распределение тепла ограничивается теплопроводностью через точки контакта, как показано на рис. 3. Промежутки между контактами сопрягаемых поверхностей заполнены окружающим воздухом, в результате поверхности не находятся в идеальном тепловом контакте.

При тепловом контакте происходит искривление изотермических поверхностей. Линии теплового потока стягиваются к областям непосредственного контакта поверхностей (рис. 3).

Поверхностные и механические свойства определяют фактическую площадь контакта, от которой зависит величина КТС.

КТС связано с дискретностью реального контакта твердых тел. Ограниченное количество и размер точек контакта при-

водят к тому, что фактическая площадь контакта значительно меньше видимой.

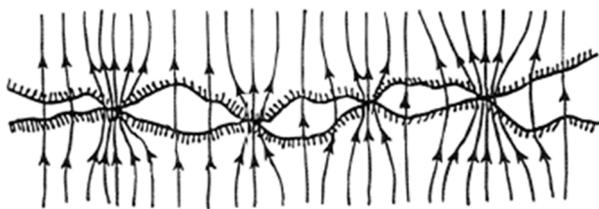


Рис. 3. Схема распределения теплового потока в зоне контакта двух контактирующих тел  
Fig. 3. Heat flow distribution diagram in the contact area of two contacting bodies

Сопротивление тел осуществляется лишь в ограниченном числе пятен, суммарная площадь которых обычно не превышает 1 % видимой (номинальной) площади контакта [6]. В работе [7] указывается, что реальный контакт происходит только через микроскопические контакты, которые обычно составляют всего несколько процентов от видимой площади контакта. Пространство между контактирующими неровностями в обычных условиях заполнено воздухом, теплопроводность которого в десятки-сотни раз меньше тепло-

проводности металла. Тем самым слой воздуха, заполняющий пустоты, действует как тепловое сопротивление тепловому потоку.

Из-за наличия на твердых поверхностях как волнистости, так и шероховатости стягивание линий теплового потока происходит поэтапно: сначала в пределах номинальных поперечных сечений линии теплового потока стягиваются к контактным макроязлам, вызванным волнистостью, а затем в пределах каждого макроязла – к микроязлам, обусловленным шероховатостью поверхности [8]. Учитывая, что макроязла представляют собой области, в которых сгруппированы микроязла, то в действительности механическое взаимодействие поверхностей имеет место только в контактных микроязлах.

Рассматривая понятие контактного термического сопротивления, по обеим сторонам контакта последовательно с проводящими средами ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) вставляется граничная проводимость  $\lambda_k$ , как показано на рис. 4.

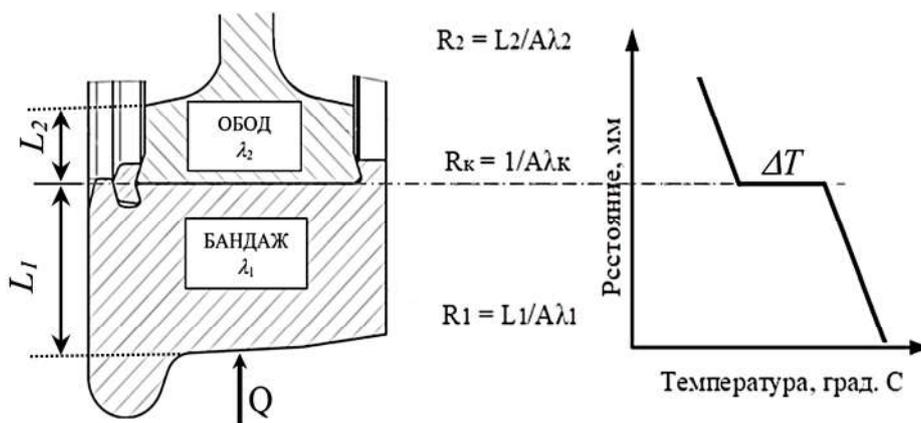


Рис. 4. Схема двух проводящих сред  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  со средой с граничной проводимостью  $\lambda_k$ :  
 $Q$  – тепловой поток;  $L_1, L_2$  – расстояния течения  $Q$  в бандаже и ободе колесного центра соответственно  
Fig. 4. Diagram of two conductive media  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  with a medium of boundary conductivity  $\lambda_k$ :  
 $Q$  is the heat flux;  $L_1, L_2$  are the flow distances of  $Q$  in the tyre and rim of the wheel center, respectively

Когда относительная площадь фактического контакта мала, то тепловую проводимость контакта  $\lambda_k$  можно рассматривать как сумму двух независимых слагаемых:  $\lambda_k = \lambda_T + \lambda_B$ . То есть перенос тепла через пространство взаимодействия двух контактирующих тел происходит через две

зоны. Первая зона представляет собой течение тепла  $\lambda_T$  через точки контакта с твердым телом ( $Q_T$ ), что является наиболее эффективным. Вторая зона – это проведение тепла через заполненные воздухом  $\lambda_B$  промежутки ( $Q_B$ ), которые, ввиду низкой теплопроводности, будут весьма слабыми.

$\Delta T$  – разность температур по граничной области взаимодействия сред площадью контакта  $A$ .

Проводимость  $\lambda_k$  подобна коэффициенту конвективной теплопередачи и имеет те же единицы измерения ( $\text{Вт/м}\cdot^\circ\text{С}$ ). Скорость переноса тепла  $Q$  задается равенством  $Q = A\lambda_k\Delta T$ . Или можно записать  $Q = \Delta T/R$ , где  $R$  – контактное термическое сопротивление, задаваемое как  $R = 1/(A\lambda_k)$ .

На границе раздела двух тел (пограничной зоне) проводимость  $\lambda_k$  может зависеть от следующих факторов:

– качество обработки контактирующих поверхностей. Поверхность, прошедшая определенную финишную операцию, характеризуется шероховатостью, волнистостью и отклонением геометрии. На практике не существует абсолютно гладких поверхностей и дефекты поверхности ощутимы визуально и под микроскопом. Когда два тела прижимаются друг к другу, контакт осуществляется только в конечном числе точек, разделенных относительно большими зазорами (рис. 3);

– теплофизические свойства материала каждой поверхности. Такие металлы, как медь, серебро и алюминий, обладают высокой теплопроводностью и, следовательно, снижают КТС. С другой стороны, такие материалы с низкой теплопроводностью, как керамика и титан, увеличивают КТС;

– контактное давление, с которым сопрягаемые поверхности прижаты друг к другу. При теплопередаче между двумя соприкасающимися телами контактное давление и возникающая в результате этого площадь истинного контакта оказывает наибольшее влияние на общую контактную проводимость. При увеличении контактного давления, определяемого нормальной контактной жесткостью поверхности, увеличивается площадь фактического контакта и контактная проводимость (контактное термическое сопротивление) уменьшается. Поэтому, например, два тела из нержавеющей стали имеют более высокое контактное сопротивление, чем два тела из более мягкого материала, такого как медь или алюминий, если другие усло-

вия остаются неизменными. В этом случае, чтобы увеличить теплопередачу и уменьшить контактное сопротивление, материал из нержавеющей стали можно покрыть каким-либо мягким материалом, таким как медный или алюминиевый сплав;

– поверхностные деформации. Когда два тела соприкасаются, на поверхностях обоих тел может возникать деформация поверхности. Эта деформация может быть пластической или упругой, в зависимости от свойств материала и контактного давления. Если усилие на контактирующих поверхностях увеличивается, то в зависимости от свойств материала вершины шероховатости поверхности могут деформироваться пластически или упруго, что приводит к увеличению площади контакта и снижению контактного термического сопротивления;

– материал (вещество), находящийся в зазорах между контактирующими поверхностями. Газы/жидкости, заполняющие эти зазоры, могут существенно влиять на общий тепловой поток через границу раздела;

– окисление металлических поверхностей, появление на них фреттинг-коррозии, образуя на границе раздела оксидный слой, теплопроводность которого ниже, чем у основного металла. Это явление на практике замечено давно при обследовании колес с предельно изношенными бандажами, проходящими в ремонтных депо смену бандажей [9]. Продукты фреттинг-коррозии обладают теплопроводностью в 8...10 раз ниже, чем теплопроводность основного металла [10]. Этот дополнительный слой становится еще одним препятствием для теплового потока, тем самым увеличивая КТС. В соответствии с нормативным документом на ремонт колесных пар тягового подвижного состава [11] наличие повреждений от фреттинг-коррозии требует при замене бандажа обязательной механической обработки посадочной поверхности обода, что уменьшает толщину обода, тем самым снижая ресурс колесного центра и колесной пары в целом.

Наличие твердой прослойки между соприкасающимися поверхностями может

способствовать или препятствовать теплопередаче в месте соединения в зависимости от теплопроводности, толщины и твердости прослойки. Если между поверхностями, образующими соединение, существует значительная разница температур, теплообмен посредством излучения также может происходить через зазоры между соприкасающимися поверхностями.

Процесс контактной теплопередачи из-за его сложности большинством исследователей изучался экспериментально [12]. Результаты экспериментов позволили установить, что контактная теплопроводность не является постоянной на начальных этапах процесса, а резко возрастает от нуля до определенного значения, а затем остается почти постоянной.

На основе обзора и анализа отечественной и зарубежной литературы установлено, что в настоящее время получены теоретические и экспериментальные результаты по КТС только для конкретных соединений и условий теплообмена [4, 5, 12].

Экспериментальные исследования, направленные на снижение теплонапряженности бандажа колесной пары и повышения прочности его соединения с колесным центром, были проведены ранее в АО «ВНИКТИ» (г. Коломна) [10]. Исследования способствовали выбору метода интенсификации отвода тепла из бандажа в обод, создавая тем самым более равномерный разогрев колеса и снижение ослабления посадки посредством снижения КТС.

Для экспериментальной проверки использовались два варианта покрытия, состоящие из порошка алюминиевой бронзы (АБ) марки ПГ-19М-01 по ТУ 48-19-383-90 и никель-алюминиевого (НА) порошка марки ПТ-НА-01 по ТУ 48-19-383-90. В обоих случаях к основному порошку добавлялось 25 % порошка твердого сплава марки ПТ-10Н-01 по ТУ 48-19-383-90. Использование порошка твердого сплава обеспечивало снижение микроперемещений бандажа относительно поверхности обода, а в итоге и развитие фреттинг-коррозии. Нанесение данного покрытия выполнялось газопламенным

способом. При испытаниях использовались вновь сформированные соединения при отсутствии на них следов фреттинг-коррозии.

Прочность посадки бандажа в условиях колодочного торможения и его теплонапряженность проверялись при сравнительных стендовых тормозных испытаниях натуральных колес с колесными центрами тепловозов типа 2ТЭ116, ТЭ10, сформированных по серийной и опытной технологиям при единичных или серий последовательных экстренных торможений со скоростями до 120 км/ч, а также жестких режимах длительных торможений при полномерных (75 мм) и предельно изношенных бандажах (36 мм).

Сравнительные стендовые испытания натуральных бандажных колес, изготовленных по серийной и опытной (с покрытием посадочной поверхности обода колесного центра теплопроводным материалом) технологиям позволили установить:

- при использовании покрытий теплопроводными материалами отмечена меньшая на 30 % температура нагрева бандажа, что снижает его теплонапряженность;

- при наиболее жестких режимах длительных торможений прочность посадки в колесах с покрытием АБ и НА выше (по увеличению времени до нарушения посадки) соответственно на 30 % и 20 %.

Следует отметить, что эти результаты сравнивались для случая отсутствия в посадке фреттинг-коррозии. При наличии фреттинг-коррозии термосопротивление соединения может быть выше более чем на 40 % [10]. Эти исследования при анализе состояния опытных посадочных поверхностей ободов колесных центров также показали, что покрытие АБ или НА защищает посадочные поверхности от развития в соединении фреттинг-коррозии.

Таким образом, применение теплопроводящих покрытий на сопрягаемые поверхности бандажа и колесного центра позволит повысить прочность и надежность посадки бандажа при снижении контактного термического сопротивления и фреттинг-коррозии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иноземцев В. Г. Тепловые расчеты при проектировании и эксплуатации тормозов / В. Г. Иноземцев. Москва : Транспорт, 1966. 40 с.
2. Иноземцев В. Г. Нормы и методы расчета авто-тормозов. В. Г. Иноземцев, П. Т. Гребенюк. Москва : Транспорт, 1971. 58 с.
3. О надежности соединения бандажа с колесным центром / В. Г. Иноземцев, В. В. Иванов, В. И. Грек, Э. Н. Никольская // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 3. С. 29–33.
4. Шлыков Ю. П. Контактное термическое сопротивление / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. Москва : Энергия, 1977. 327 с.
5. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. Москва : Энергия, 1971. 216 с.
6. Харитонов В. В. Контактный теплообмен разнородных материалов / В. В. Харитонов, Н. В. Якутин // Журнал технической физики. 1997. № 2. С. 1–6.
7. Shojaefard M. H. The numerical estimation of thermal contact resistance in contacting Surfaces / M. N. Shojaefard, K. Goudarzi // American Journal of Applied Sciences 5 (11): 1566-1571, 2008. – ISSN 1546-9239.
8. Меснянский С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел /

- С. Ю. Меснянский, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов. – Текст : электронный // Общероссийский математический портал. – URL: <https://www.mathnet.ru/links/b00dcd4445142fd7038993a24c026897/ufn818.pdf> (дата обращения 02.06.25).
9. Грек В. И. Об остаточном натяге и фреттинг коррозии в соединении бандаж-колесный центр с предельно изношенными бандажами колесных пар тепловозов / В. И. Грек, П. П. Гуцин // Труды ВНИТИ. 1977. Вып. 76. С. 71-77.
10. Грек В. И. О снижении теплонапряженности бандажа колесной пары и повышении прочности его соединения с колесным центром / В. И. Грек // Труды ВНИКТИ. 2005. № 85. С. 147-154.
11. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов, моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Распоряжение ОАО РЖД № 805Р от 14.04.2025. Москва, 2025. 137 с.
12. Абдоллахи Х. Обзор влияния различных параметров на контактную теплопередачу / Х. Абдоллахи, С. Шахраки, М. Мотahari-Незад // Теплофизика и аэродинамика. 2017. № 4. С. 513-528.

## REFERENCES

1. Inozemtsev VG. Thermal calculations in the design and operation of brakes. Moscow: Transport; 1966.
2. Inozemtsev VG, Grebenyuk PT. Norms and methods of calculating car brakes. Moscow: Transport ; 1971.
3. Inozemtsev VG, Ivanov VV, Grek VI, Nikolskaya EN. On the reliability of connecting the band to the wheel center. Russian Railway Science Journal. 1986;3:29-33.
4. Shlykov YuP, Ganin EA, Tsarevsky SN. Contact thermal resistance. Moscow: Energiya; 1977.
5. Popov VM. Heat exchange in the contact zone of detachable and permanent joints. Moscow: Energiya; 1971.
6. Kharitonov VV, Yakutin NV. Contact heat exchange of heterogeneous materials. Technical Physics. 1997;2:1-6.
7. Shojaefard MH, Goudarzi K. The numerical estimation of thermal contact resistance in contacting surfaces. American Journal of Applied Sciences. 2008;5(11):1566-1571.
8. Mesnyansky SYu, Vikulov AG, Vikulov DG. A modern view on the problems of thermal contacting

- of solids. All-Russian Mathematical Portal [Internet]. [cited 20June 02]. Available from: <https://www.mathnet.ru/links/b00dcd4445142fd7038993a24c026897/ufn818.pdf>.
9. Grek VI, Gushchin PP. On residual tension and fretting of corrosion in the connection of the band-wheel center with extremely worn-out bands of wheel pairs of diesel locomotives. Russian Railway Science Journal. 1977;76:71-77.
10. Grek VI. On reducing the thermal stress of the wheelset band and increasing the strength of its connection to the wheel center. Russian Railway Science Journal. 2005;85:147-154.
11. Russian Railways. Instructions for the inspection, repair and formation of wheel pairs of locomotives, motor-car rolling stock of 1520 mm gauge. Moscow. 2025 Apr 14.
12. Abdollahi H, Shahraki S, Motahari-Nezhad M. A review on the effects of different parameters on contact heat transfer. Thermophysics and Aerodynamics. 2017;4:513-528.

## Информация об авторах:

**Князев Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, заместитель заведующего отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры, Акционерное общество «Научно-

исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48.

**Грек Виктор Иванович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48.

**Чунин Виталий Владимирович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией колесных пар, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48.

**Knyazev Dmitry Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department of Dynamics and Strength of Rolling Stock and Infrastructure, Joint-Stock Company "VNIKTI"; phone: +7 (4966) 18-82-48.

**Grekh Viktor Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Joint-Stock Company "VNIKTI"; phone: +7 (4966) 18-82-48.

**Chunin Vitaly Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Wheel Sets,

**Тимаков Максим Владимирович** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией прочностных расчетов, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48.

**Качесов Евгений Юрьевич** – начальник отдела организации контроля ремонта локомотивов Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД», тел. +7 (499)267-85-69.

Joint-Stock Company "VNIKTI"; phone: +7 (4966) 18-82-48.

**Timakov Maksim Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Strength Calculations, Joint-Stock Company "VNIKTI"; phone: +7 (4966) 18-82-48.

**Kachesov Evgeny Yuryevich** – Head of Locomotive Repair Control Department at the Traction Directorate, branch of Russian Railways; phone: +7 (499)267-85-69.

**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 02.09.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 26.09.2025. Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 02.09.2025; approved after review on 22.09.2025; accepted for publication on 26.09.2025. The reviewer is Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.