

## Транспортные системы

### Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-24-31

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дмитрий Геннадьевич Евсеев<sup>1</sup>, Юрий Михайлович Куликов<sup>2✉</sup>, Алексей Юрьевич Попов<sup>3</sup>, Максим Викторович Ягодкин<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия.

<sup>4</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской Академии Наук (ИКИ РАН), г. Москва, Россия.

<sup>1</sup> evseevdg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0020-1297>

<sup>2</sup> kulikov.ym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1998-2211>

<sup>3</sup> madrat@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3397-9484>

<sup>4</sup> yagodkin.maksim.513@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-6047>

### Аннотация

Изучается возможность использования торцевого фрезерования для восстановления поверхности катания железнодорожных колесных пар. На основе имитационного моделирования делается вывод о перспективности использования данного метода при ремонте. Цель исследования: Повышение эффективности ремонта колесных пар подвижного состава. Задача, решению которой посвящена статья: Целесообразность использования торцевого фрезерования при ремонте колесных пар. Методы исследования: моделирование. Новизна работы: Установление возможности использования торце-

вого фрезерования для ремонта колесных пар. Результаты исследования: Установлена целесообразность и эффективность торцевого фрезерования при ремонте колесных пар подвижного состава. Выводы: Использование нового способа торцевого фрезерования (фрезоточения) способствует уменьшению трудоёмкости операции, а также увеличению ресурса колесных пар в эксплуатации за счёт обработки с минимальным припуском.

**Ключевые слова** фрезерование, фрезоточение, ремонт, колесные пары, восстановление, профиль.

Ссылка для цитирования:

Евсеев Д.Г. Повышение эффективности ремонта колесных пар подвижного состава / Д. Г. Евсеев, Ю. М. Куликов, А. Ю. Попов, М. В. Ягодкин // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 11. – С. 24 – 31. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-24-31.

Original article

Open Access Article

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF REPAIR OF ROLLING STOCK WHEEL PAIRS

Dmitry Gennadievich Evseev<sup>1</sup>, Yury Mikhailovich Kulikov<sup>2✉</sup>, Aleksey Yurievich Popov<sup>3</sup>, Maxim Viktorovich Yagodkin<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Russian University of Transport, Moscow, Russia.

<sup>4</sup> Institute of Design and Engineering Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

<sup>1</sup> evseevdg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0020-1297>

<sup>2</sup> kulikov.ym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1998-2211>

<sup>3</sup> madrat@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3397-9484>

<sup>4</sup> yagodkin.maksim.513@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-6047>

### Abstract

The possibility of using face milling to restore the tread surface of railway wheel pairs is studied. On the basis of simulation modeling, a conclusion is made

about the prospects of using this method for repair. The study objective is to improve the efficiency of repair of rolling stock wheel pairs. The task to which the paper

is devoted is the expediency of using face milling when repairing wheel pairs. Research method is modeling. The novelty of the work: defining the possibility of using face milling for the repair of wheel pairs. Study results: the expediency and efficiency of face milling for the repair of rolling stock wheel pairs are found. Conclusions: the use of a new face milling method

*Reference for citing:*

*Evseev DG, Kulikov YuM, Popov AYu, Yagodkin MV. Improving the efficiency of repair of rolling stock wheel pairs. Transport Engineering. 2022; 11:24-31. doi: 10.30987/2782-5957-2022-11-24-31.*

## **Введение**

Состояние колесных пар подвижного состава в эксплуатации во многом определяет безопасность грузовых и пассажирских железнодорожных перевозок. При этом большое влияние на плавность и допустимую скорость движения рельсовых экипажей оказывает точность и качество механической обработки профиля поверхности катания их колесных пар. Одной из наиболее распространенных технологических операций при ремонте любого подвижного состава является периодическое восстановление изношенного профиля поверхности катания. В общей трудоемкости текущего отцепочного ремонта колесных пар данная операция может занимать до 70 %, а в трудоемкости среднего ремонта – до 25 %. Сущность заключается в снятии механической обработкой резанием, образовавшегося в процессе эксплуатации износа профиля колес (с восстановлением контура исходного профиля), а также в удалении с контактирующих поверхностей дефектов термомеханического происхождения (ползуны, выщербины, «белые пятна» и др.). Так в 2021 году, на ремонтных предприятиях «Федеральной пассажирской компании» (АО «ФПК»), в среднем ежемесячно обрабатывалось 180 колесных пар пассажирских вагонов, в то время как, в депо по ремонту грузовых вагонов ежедневно обрабатывается от 10 до 25 колесных пар в смену.

Наиболее широкое распространение среди методов формообразования профиля поверхности катания колесных пар железнодорожного подвижного состава получила колесотокарная обработка на специальных колесотокарных станках. 100% ремонтных предприятий вагонного хозяйства и около 70 % локомотивного хозяйства ис-

(turn milling) helps to reduce the complexity of the operation, as well as to increase the resource of wheel pairs in operation due to machining with a minimum allowance.

**Keywords:** milling, turn milling, repair, wheel pairs, restoration, profile.

пользуют колесотокарные станки различных изготовителей, типов и моделей. Несмотря на широкое распространение, колесотокарная обработка имеет ряд существенных недостатков, к которым относят:

– низкую производительность процесса резания, обусловленную низкими скоростями резания (не более 45...60 м/мин). Данное положение связано как с общей динамической несбалансированностью большинства колесных пар (при массе колесной пары в 1,5...2,0 т.), так и с высокой степенью нестационарности процесса резания, вследствие значительных колебаний сечения срезаемого слоя, а также динамическими ударными нагрузками от поверхностных термомеханических дефектов;

– завышенные глубины резания приводят к существенному снижению жизненного цикла колеса колесной пары. Необходимость в снятии больших припусков с поверхности катания, связана с технологическим требованием врезания под высокотвердые поверхностные термомеханические дефекты (с твердостью от 740 до 1000 HV), для сохранения формы и геометрии режущей кромки инструмента;

– низкую стойкость твердосплавного режущего инструмента (особенно без поверхностных износостойких покрытий), что существенно увеличивает себестоимость восстановления профиля колесной пары;

– повышенные температуры в зоне резания (от 850 до 1000 °С), при снятии металла с большими глубинами и подачами, вызывают значительный нагрев обработанной поверхности, что негативно сказывается на напряженном состоянии и

усталостной прочности поверхностных слоев обработанного материала;

– образующаяся при токарной обработке непрерывная сливная стружка ставит проблемы её удаления из рабочей зоны станка, а также ее дальнейшей утилизации.

Основными достоинствами использования метода фрезерования, по сравнению с точением, являются:

– возможность обработки с минимальными глубинами резания за один проход, что позволяет увеличить количество возможных переточек профиля катания и, следовательно, повысить долговечность колесных пар;

– увеличение скорости резания и, следовательно, рост производительности обработки, что обеспечивается за счет увеличения частоты вращения фрезы, а не колесной пары;

– простота работы и наладки колесофрезерного станка;

– повышение стойкости режущего инструмента за счет увеличения активной длины режущей кромки при одновременном резании несколькими зубьями фрезы, а также уменьшение общей теплонапряженности процесса резания;

– процесс встречного фрезерования более благоприятен для работы режущего инструмента при обработке колесных пар с термомеханическими дефектами на поверхности катания, вследствие существенно меньших динамических ударных воздействий на режущую кромку инструмента, что позволяет использовать более дешевые твердые сплавы группы ТК вместо ТТК как при колесотокарной обработке;

### Конструкция режущего инструмента

Предлагается использовать в качестве режущего инструмента насадную торцевую фрезу со сменными твердосплавными режущими пластинами круглой формы с большими задними углами типа *RPUX*, *RPGX* или *RDMX* (рис. 1).

Форма, размеры, отклонения размеров и шероховатость обработки профиля поверхности катания колесных пар железнодорожного подвижного состава жестко регламентированы [5-7], что накладывает

– улучшение условий труда рабочих-станочников за счет образования более безопасной и транспортабельной формы стружки при фрезерной обработке.

В середине 60-х годов прошлого века было предложено заменить токарную обработку при восстановлении поверхностей катания на метод торцевого фрезерования [1-4 и др.]. Однако несовершенство существовавшего в то время технологического станочного оборудования и простейшего твердосплавного режущего инструмента существенно ограничило возможность промышленного внедрения данного метода обработки. В связи с тем, что полностью использовать возможности метода торцевого фрезерования на всей длине восстанавливаемого профиля катания конструктивно не удалось, была предложена комбинированная обработка – гребень и часть профиля колеса обрабатывалась токарными резцами, а для фрезерования других частей профиля использовался комплект 3-4 торцевых фрез с собственными приводами, что требовало перемещать инструментальные суппорта в несколько установов и приводило к значительному увеличению трудоемкости операции восстановления.

В настоящее время, использование современного станочного оборудования с ЧПУ и режущего инструмента со сменными твердосплавными пластинами позволяет существенно упростить данную схему обработки, путем применения формообразования профиля поверхности катания колесных пар методом торцевого фрезерования ем по принципу копировальной обработки.

определенные ограничения на конструкцию используемой торцевой фрезы.

Первым ограничением является диаметр режущей пластины, который должен быть не более радиуса при угле наклона наружной части гребня, чтобы кинематически обеспечить в процессе обработки получение нужного радиуса при переходе от поверхности катания к гребню. Так исходя из [5-7], диаметр твердосплавных пластин для обработки ряда профилей ло-

комотивов не должен превышать 27,0 мм., а для обработки профилей вагонов и мотор-вагонного подвижного состава – 30 мм. Из-за обрабатываемого профиля рабочий диаметр фрезы тоже должен быть ограничен.

Третьим ограничением является шероховатость обработанной поверхности профиля, так согласно [5-7], при обработке с выкаткой шероховатость обработанной поверхности бандажей локомотивов не должна превышать  $Rz40$  мкм. для скоростей движения до 120 км/ч (и  $Rz10$  мкм. для скоростей движения от 120 до 200 км/ч), а для колесных пар грузовых и пассажирских вагонов шероховатость должна быть не более  $Rz80$  мкм.

### Технология обработки

Анализ предлагаемой кинематической схемы обработки показал, что она относится к методу фрезоточения, который в настоящее время находит все большее распространение при обработке крупногабаритных цилиндрических деталей в современном высокопроизводительном машиностроении. Данный метод заключается в том, что точение цилиндрической заготовки осуществляется вращающейся фрезой. По сравнению с традиционным точением рассматриваемый метод имеет ряд преимуществ, заключающихся в более высокой производительности и отсутствии сливного стружкообразования [8]. В рабо-



Рис. 1. Торцевая фреза с режущими пластинами круглой формы  
Fig. 1. End mill with round cutting inserts

те [9] проанализированы различные кинематические схемы, реализующие операцию фрезоточения.

В случае фрезоточения профиля колес колесной пары, рассматривается обработка инструментом с осью, перпендикулярной оси вращения колеса (рис. 2). При использовании фрезоточения главным движением является вращение торцевой фрезы «И» вокруг своей оси  $Z1$ , а движением подачи – вращательное движение обрабатываемого колеса «Д» вокруг своей оси  $X$  и поступательное движение фрезы вдоль осей  $X1$  и  $Z1$ .

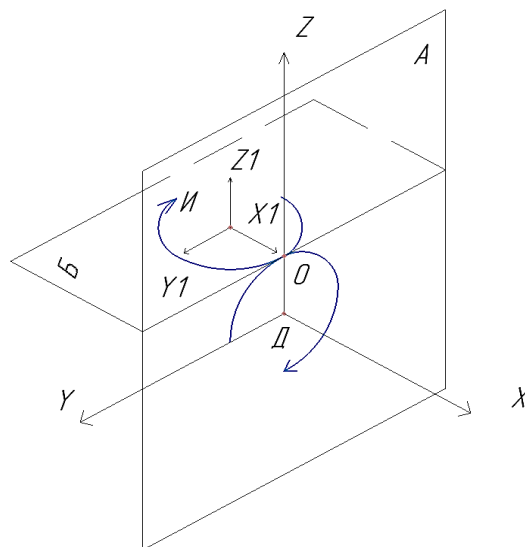


Рис. 2. Кинематическая схема обработки колеса колесной пары  
Fig. 2. Kinematic scheme of wheel pair processing

Изучение особенностей торцевого фрезерования поверхностей катания проводилось имитационным моделированием с помощью пакета программ *SolidWorks*.

Обработка поверхности катания колеса фрезерованием описывается сложным пространственным движением, поэтому для упрощения анализа был использован наиболее распространенный профиль поверхности катания, унифицированный для грузовых и пассажирских вагонов, а также мотор-вагонного подвижного состава [5-7]. На данном профиле были выбраны наиболее характерные опорные точки, которые в последующем, объединены в участки типовой обработки (рис. 3). Анализ траектории относительно движения заготовки и инструмента показал, что всю обрабатываемую поверхность катания можно разбить на 7 таких участков:

- участок 1 – точки 13-12. Участок фаски.  $S_x > S_z$ .
- участок 2 – точки 12-11. Прямолинейный участок с уклоном 1:3,5.  $S_x > S_z$ ;
- участок 3 – точки 11-10. Прямолинейный участок с уклоном 1:10.  $S_x \gg S_z$ ;
- участок 4 – точки 10-8. Прямолинейный участок с уклоном 1:50.  $S_x \gg S_z$ ;
- участок 5 – точки 8-5. Радиус скругления под гребнем. Подача  $S_x$  больше  $S_z$ ;
- участок 6 – точки 5-3. Поверхность гребня колеса. Движение подачи вдоль оси X ( $S_x$ ) меньше величины подачи вдоль оси Z ( $S_z$ );
- участок 7 – точки 3-1. Не изнашиваемая поверхность гребня. Движение подачи изменяет свое направление вдоль оси Z, поступательное движение X остается положительным. Изменение схемы фрезерования.

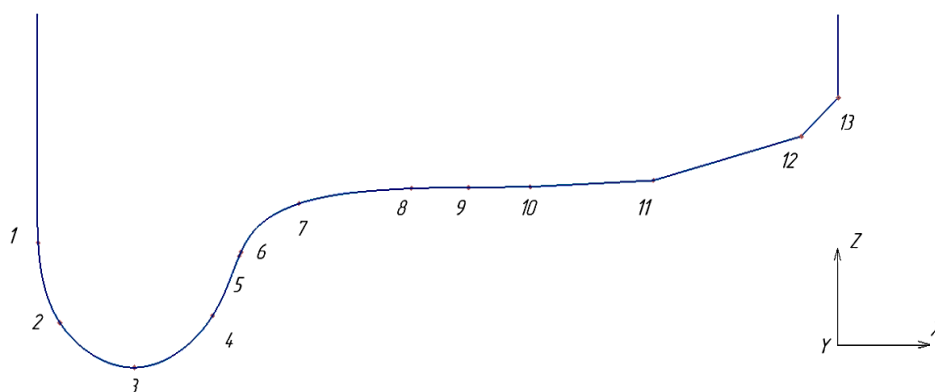


Рис. 3. Профиль поверхности катания цельнокатаного колеса  
Fig.3. Rolled wheel tread profile

При обработке типовых деталей машин фрезерование может осуществляться двумя методами: встречного фрезерования против подачи, когда направления векторов скорости главного движения и подачи заготовки противоположны и попутного фрезерования по подаче, когда направления векторов совпадают [10].

Встречное фрезерование характеризуется тем, что нагрузка на зуб фрезы плавно увеличивается от  $\min$  при входе его в обрабатываемую поверхность до максимума при выходе, что способствует повышению стойкости фрезы. В тоже время, в началь-

ный момент врезания возникает эффект затирания режущей кромки из-за близких к нулю сечениях срезаемого слоя.

При попутном фрезеровании с первого момента зуб начинает работать с наибольшей толщиной среза и сразу подвергается максимальной нагрузке. При этом фреза стремится плотнее прижать обрабатываемую деталь к поверхности стола станка, что значительно облегчает условия резания, повышает точность и улучшает шероховатость обработанной поверхности, а так же обеспечивает формирование улучшенных физико-механических свойств обработан-

ной поверхности [11]. Но при попутном фрезеровании требуется более высокая жесткость технологической системы, чем при встречном, т.к. при наличии зазоров возникают вибрации и даже может произойти заклинивание инструмента [12]. Кроме того, при наличии упрочненного слоя или твердой литейной корки на поверхности заготовки, зуб фрезы ударяется об нее, что существенно снижает стойкость фрезы, поэтому в данных условиях рекомендуется применять встречное фрезерование, где зуб взламывает корку на поверхности заготовки снизу.

Согласно технологическим требованиям приведенных [5-7], обработка профиля колеса всегда начинается с точки 13, поэтому при торцовом фрезеровании профиля поверхности катания колесных пар выбор метода фрезерования должен обес-

печиваться в зависимости от конкретных производственных условий. Так при обработке колесных пар с твердыми термомеханическими дефектами на поверхности катания или большим сечением срезаемого слоя (грузовые вагоны, маневровые тепловозы и др.) необходимо использовать встречное фрезерование. При восстановлении профиля колес с малыми глубинами резания (высокоскоростной подвижной состав, пассажирские вагоны, МВПС и др.), а также колесных пар без термомеханических дефектов более эффективно применять попутное фрезерование. Изменение метода фрезерования на одном и том же колесообрабатывающем станке может обеспечиваться за счет реверсирования направления вращения обрабатываемой колесной пары.

### Стружкообразование

При рассмотрении процесса обработки фрезоточением профиля колесной пары, следует отметить, что площадь срезаемого слоя на всех обозначенных ранее участках различна (рис. 4) – на этом рисунке использованы следующие обозначения: а –

сечение стружки на участке 1; б – сечение стружки на участке 2; в – сечение стружки на участке 3; г – сечение стружки на участке 4; д – сечение стружки на участке 5; е – сечение стружки на участке 6; ж – сечение стружки на участке 7.

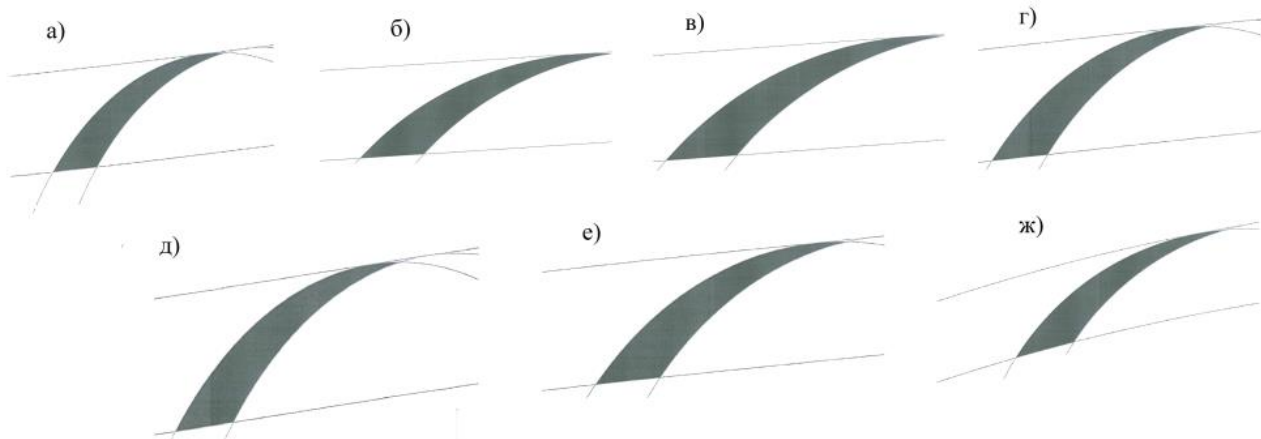


Рис. 4. Сечение стружки (глубина резания 1,5 мм.)  
Fig. 4. Chip cross section (cutting depth 1.5 mm.)

На рис. 5 представлены данные имитационного моделирования площади сечения стружки и расчетной шероховатости обработанной поверхности при фрезоточении поверхности колесной пары, начиная с участка 7 и заканчивая 1 участком.

Анализ данных показывает, что наибольшая площадь срезаемого слоя наблюдается на участке 1 - фаске колеса колесной пары. Наименьшая площадь соответствует участку 7 – не изнашиваемой части внутренней поверхности гребня.

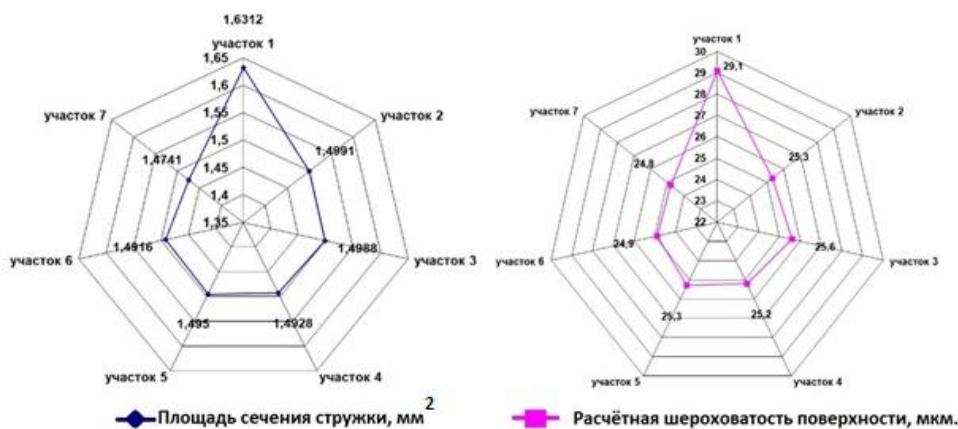


Рис. 5 Площадь сечения стружки и расчетной шероховатости обработанной поверхности  
 Fig. 5. Chip cross-sectional area and calculated surface roughness

Тенденция к уменьшению площади сечения стружки от участка 1 к участку 7 соблюдается не во всех случаях. Так на участке 5, соответствующему радиусу скругления под гребнем, площадь сечения

стружки больше, чем на смежных с ним участком, так как поверхность контакта режущих пластин с поверхностью катания колеса на этом участке больше.

### Заключение

Полученные результаты проведенного имитационного моделирования показывают большие перспективы использования торцевого фрезерования (фрезоточения) для восстановления поверхностей катания колесных пар подвижного состава. Данную операцию можно проводить за один установ, одним инструментом – торцевой фрезой с круглыми режущими пластинами.

По сравнению с традиционной колесоточкой трудоемкость операции уменьшается на 20–25%, также уменьшается съем материала, особенно при обработке колесных пар с дефектами термомеханического происхождения, что способствует увеличению ресурса колесных пар в эксплуатации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нечепуренко Н.П. Восстановление профилей железнодорожных колесных пар высокопроизводительным методом фрезерования с использованием торцевых фрез / Н.П. Нечепуренко: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.00.00. Ростов-на-Дону, 1967. 293 с.
2. Шишкин А.А., Шпика Н.К. Переоборудование колесотокарных станков в колесофрезерные // Сб. науч. тр. / РостИИТ. 1967. Вып. 58. С.18-22.
3. Алехин С.В., Сергеева С.В., Сысов П.В. Исследование наклепа по профилю вагонных колес в связи с повышением их долговечности // Сб. науч. тр. / ЛИИЖТ. 1962. Вып.197.
4. Шишкин А.А., Нечепуренко Н.П. Сравнительный анализ методов механической обработки профилей железнодорожных колес // Сб. науч. тр. / РИИЖТ; Вып.107: Механическая обработка деталей подвижного состава. 1974. С.4-8.
5. ГОСТ 11018-2011 Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Стандартинформ. 2012. 27 с.
6. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. // Утв. СПЖТ / Протокол №67 от 19 октября 2017. 242 с.
7. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. // Утв. распоряжением ОАО «РЖД» №2631р от 22 декабря 2016. 126 с.
8. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа. 1975. 590 с.
9. Селиванов А.Н., Насад Т.Г. Анализ технологических возможностей фрезоточения. *Вестник СГТУ. Машиностроение и машиноведение*. 2020;2(85):66-71.
10. Sandvik Coromant. Учебное пособие по курсу технология обработки металлов резанием. Sandviken, 2009. 366 p.
11. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 1964. 322 с.
12. Справочник по технологии резания материалов. В 2-х книгах. / Кн.1. Под ред. Г. Шпур, Т. Штефлер. М.: Машиностроение, 1985. 616 с.

## REFERENCES

1. Nechepurenko NP. Profile restoration of railway wheel pairs by high-performance milling method using end mills [dissertation]. [Rostov-on-Don (RF)]; 1967.
2. Shishkin AA, Shpika NK. Conversion of wheel-turning machines into wheel-milling ones. RostIIT; 1967;58:18-22.
3. Alekhin SV, Sergeeva SV, Sysoev PV. The study of cold working along the wheel profile for the increase of their durability. LIIZhT; 1962;197.
4. Shishkin AA, Nechepurenko NP. Comparative analysis of methods of mechanical machining of railway wheel profiles. Collection of scientific papers: Mechanical machining; RIIZHT; 1974;107:4-8.
5. GOST 11018-2011. Wheel pairs of traction rolling stock of 1520 mm gauge. General technical conditions. Standartinform; 2012.
6. RD VNIIZHT 27.05.01-2017. Guidance document on the repair and maintenance of wheel pairs with axle boxes of mainline railway freight cars of 1520 mm gauge; 2017.
7. Instructions for inspection, repair and formation of wheel pairs of locomotives and motor-car rolling stock with a gauge of 1520 mm. 2016 December 22.
8. Poduraev VN. Cutting of hard-to-process materials. Moscow: Vishay Shkola; 1975.
9. Selivanov AN, Nasad TG. Analysis of milling technological possibilities. SSTU Vestnik. Mechanical Engineering and Mechanical Study. 2020;2(85):66-71.
10. Sandvik Coromant. Textbook on the course technology of metal processing by transformation. Sandviken; 2009.
11. Etin AO. Kinematic analysis of metal machining methods by cutting. Moscow: Mashinostroenie; 1964.
12. Shpur G, Shteferle T, editors. Handbook of materials cutting technology. Moscow: Mashinostroenie; 1985.

### Информация об авторах:

**Евсеев Дмитрий Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор, тел: +7(926)272-45-79, президент Института транспортной техники и систем управления (ИТТСУ), заслуженный деятель науки и техники РФ.

**Куликов Юрий Михайлович** - студент Российского университета транспорта (МИИТ), тел: +7(964)786-95-44.

**Evseev Dmitry Gennadievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, President of the Institute of Transport Engineering and Control Systems, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, phone: +7(926)272-45-79,.

**Kulikov Yury Mikhailovich** – Student of the Russian University of Transport (MIIT), phone: +7(964)786-95-44.

**Попов Алексей Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, тел: +7(917)569-05-65, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава».

**Ягодкин Максим Викторович** – кандидат технических наук, старший преподаватель, тел: +7(909)691-09-15, научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики (ИКТИРАН).

**Popov Alersey Yurievich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Rolling Stock Repair, phone: +7(917)569-05-65.

**Maxim Viktorovich Yagodkin** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Researcher of the Institute of Design and Engineering Informatics, phone: +7(909)691-09-15.

**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 8.07.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 25.10.2022. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редколлегии журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 8.07.2022; approved after review on 22.07.2022; accepted for publication on 25.10.2022. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.**