



---

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ/TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL  
PROCESSING**

---

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2026.10.3> EDN: NKZVLU**К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ОБОДА ПРИ РЕМОНТЕ**

Научная статья

**Меркушева А.С.<sup>1,\*</sup>, Воробьев А.А.<sup>2</sup>, Иванов И.А.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0009-0008-6766-3964;<sup>1,2,3</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (alya.merkusheva.02[at]bk.ru)

**Аннотация**

Статья посвящена проблеме повышенного износа колесных пар подвижного состава и поиску эффективных методов продления их ресурса при ремонте. В условиях современных нагрузок наблюдается ускоренный износ гребней и поверхности катания колес, что ведет к колоссальным финансовым затратам: ежегодные расходы в системе «колесо-рельс» достигают 120 млрд рублей. Целью исследования является анализ перспективных методов восстановления и упрочнения поверхности катания, позволяющих не только вернуть геометрию профиля механической обточкой, но и улучшить свойства металла обода, неизбежно ухудшающиеся в процессе эксплуатации. Авторы подчеркивают ключевую роль твердости в обеспечении износостойкости. Также в статье проведен сравнительный анализ трех технологий упрочнения: плазменной, лазерной и индукционной термоциклической (ИТЦ). Основным результатом является обоснование преимуществ технологии ИТЦ, разработанной ранее, но так и не внедренной массово. Ее главное отличие — возможность изменения структуры металла на глубину до 5 мм, что позволяет получить твердость до 380 НВ за счет фазовых превращений.

**Ключевые слова:** колесная пара, износостойкость, плазменное упрочнение, лазерное упрочнение, индукционная термоциклическая обработка.

**ON IMPROVING THE PROPERTIES OF THE RIM METAL DURING REPAIR**

Research article

**Merkusheva A.S.<sup>1,\*</sup>, Vorobev A.A.<sup>2</sup>, Ivanov I.A.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0009-0008-6766-3964;<sup>1,2,3</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (alya.merkusheva.02[at]bk.ru)

**Abstract**

The article is devoted to the problem of excessive wear on rolling stock wheel pairs and the search for effective methods to extend their service life during repairs. Under modern operating conditions, accelerated wear of the wheel flanges and threads is observed, leading to enormous financial costs: annual expenditure in the ‘wheel-rail’ system reaches 120 billion roubles. The aim of the study is to analyse promising methods for restoring and hardening the thread surface, which not only allow the profile geometry to be restored by mechanical turning but also improve the properties of the rim metal, which inevitably deteriorate during operation. The authors emphasise the key role of hardness in ensuring wear resistance. The paper also presents a comparative analysis of three hardening technologies: plasma, laser and induction thermal cycling (ITC). The main result is the substantiation of the advantages of ITC technology, which was developed earlier but has not yet been widely implemented. Its main distinguishing trait is the ability to alter the metal’s structure to a depth of up to 5 mm, which makes it possible to achieve a hardness of up to 380 HB through phase transformations.

**Keywords:** wheel pair, wear resistance, plasma hardening, laser hardening, induction thermal cycling treatment.

**Введение**

В процессе эксплуатации подвижного состава происходит износ и повреждение его ходовых частей и, в частности, профиля поверхности катания колесных пар, обусловленное постоянным контактом колеса с рельсом. В условиях увеличения нагрузки на ось, сужения колеи, перехода на рельсы тяжелого типа, объемной закалки рельсов и других факторов возрастает интенсивность изнашивания гребня и поверхности катания колесных пар. Это приводит к увеличению объемов восстановления их профиля в процессе ремонта, в результате чего средний срок службы колесных пар подвижного состава сокращается.

Для ремонта грузовых вагонов в 2021 г году было поставлено 1007031 цельнокатаных колес общей стоимостью 60,4 млрд руб. Нижнетагильский металлургический комбинат произвел 129,1 тыс. единиц локомотивных бандажей, из них около 78% были отправлены в сервисные локомотивные депо и локомотиворемонтные заводы, ориентировочные расходы оцениваются в пределах 6 млрд рублей [1]. Финансовые затраты только на приобретение материальных ресурсов, без учета расходов на производство работ в системе взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры, ежегодно составляют около 120 млрд руб. [1]. Объем поставок колёс и бандажей связан в первую очередь с физическим износом и частично с дефектами эксплуатационного характера.

### Методы и принципы исследования

Влияние на процесс износа и, как следствие, на эксплуатационный ресурс колесных пар подвижного состава оказывает величина твердости профиля поверхности катания колеса. Опыт эксплуатации демонстрирует улучшение потребительских свойств колес с увеличенными прочностными характеристиками обода (например, марка Т ГОСТ 10791-2011 и марка 4 ГОСТ 398-2010). Применение же этих марок стали недостаточно распространено в эксплуатации в связи с малым объемом поставок.

Восстановление профиля при износе гребня и других дефектах поверхности производится только за счет обточки, что приводит в итоге к снижению толщины обода до значения ниже допустимого и последующему списанию колесной пары.

Технология термической обработки колес и бандажей определяет убывающую вглубь по сечению обода твердость [2]. После каждой обточки твердость металла обода будет меньше чем была на поверхности. Учитывая, что увеличение твердости на единицу НВ в эксплуатационном интервале твердости колес увеличивает их износостойкость на 1–2% [3], можно говорить о снижении износостойкости металла обода в связи с уменьшением твердости после каждой ремонтной обточки. Следовательно, при каждом ремонте целесообразно не только восстановление геометрии профиля колеса, но и восстановление механических свойств металла обода.

По результатам исследований ПГУПС [4] для равной износостойкости колеса и рельса соотношение их твердости должно быть в районе единицы. В настоящее время наиболее широко используются колеса и бандажи с твердостью ниже, чем у рельсов. В США и Китае это соотношение ближе к оптимальному (1,1–1,2 и 1 соответственно) [1], [5].

Направленное изменение физико-механических свойств поверхностных слоев материалов отражено в методах инженерии поверхности [6], которые используют для повышения поверхностной прочности и износостойкости. В частности, это обработки и технологии, связанные с изменением структуры поверхностного слоя без изменения химического состава [7]:

- поверхностное пластическое деформирование;
- интенсивная пластическая деформация;
- термическое, в том числе с помощью ТВЧ, плазменное и лазерное упрочнение;
- магнито-электрическое упрочнение и др.

В настоящее время для повышения механических свойств металла обода при ремонте используются или опробованы технологии термического упрочнения: плазменная, лазерная, индукционная. В статье приводится сравнение этих технологий, а также рассматривается метод индукционной термоциклической (ИТЦ) обработки [9], [10], [11], [12], позволяющий измельчить зерно структуры и повысить износостойкость на глубине до 5 мм. На заседании Научно-производственного совета и Комитета по координации локомотивостроения и их компонентов ОПЖТ 23.08.2023 приведен пример качественного сравнения технологий плазменного и лазерного упрочнений гребней [5]. Для полноты сравнения в анализ был добавлен ещё один способ упрочнения (ИТЦ) и параметр глубины изменения структуры (см. табл. 1).

Таблица 1 - Сравнение технологий плазменного, лазерного и ИТЦ упрочнения гребней

DOI: <https://doi.org/10.60797/ENGIN.2026.10.3.1>

№	Параметр	Плазменное упрочнение	Лазерное упрочнение	ИТЦ
1	Чувствительность к факторам внешней среды	Нет	Да	Нет
2	Стоимость расходных и изнашивающихся материалов	Относительно низкая	Относительно высокая	Низкая
3	Стоимость оборудования	Относительно низкая	Относительно высокая	Относительно высокая
4	Защита от шума	Нужна	Нет	Нет
5	Защита от излучения	Защитные очки и спецодежда	Защитные очки и спецодежда	Защитные очки
6	Среда для излучения	Плазмообразующие среды: воздух, азот, аргон	Нет	Нет
7	Стабильность и контроль параметров процесса	Нет	Да	Да
8	Формирование мелкозернистой структуры	Мартенситная структура	Меркодисперсная мартенситная структура	Сверхмелкая мартенситная структура

№	Параметр	Плазменное упрочнение	Лазерное упрочнение	ИТЦ
9	Степень воспроизводимости и процесса	Низкая	Высокая	Высокая
10	Формирование однородной структуры. Переход к основному металлу	Структура менее однородная. Наблюдается граница между закаленным и основным металлом	Структура однородная. Плавный переход	Структура однородная. Плавный переход
11	Глубина структуры упрочненного слоя	До 1 мм	До 1,5 мм	До 5 мм
Итоговое заключение		Технология с рядом недостатков	Технология высокой стабильности	Технология высокой стабильности

### Основные результаты

В качестве основных результатов было определено, что текущая практика ремонта (обточка) приводит к удалению поверхностного слоя с максимальной твердостью, что снижает износостойкость колеса и сокращает его ресурс. Также существует значительное несоответствие твердости колес и рельсов в российской практике по сравнению с зарубежной (США, Китай), что негативно влияет на износостойкость пары «колесо-рельс». Для решения проблемы предлагаются и применяются различные методы поверхностного упрочнения при ремонте:

1. Плазменное упрочнение: наиболее часто используемое, но уровень его внедрения недостаточен (только 14% от всех обточенных колесных пар за десять месяцев 2022 года). Твердость упрочненного слоя составляет 320–380 НВ, но глубина упрочнения невелика (менее 1 мм).

2. Лазерное упрочнение: практически не распространено, хотя ведутся разработки. Глубина упрочнения также не превышает 1–1,5 мм, и этот слой может изнашиваться через 25000 км пробега [13].

3. Индукционная термоциклическая (ИТЦ) обработка: работы активно велись в прошлом (ЛИИЖТ, ОЭВРЗ, НИИ ТВЧ, ВНИИЖТ и др.), но были прекращены с внедрением плазменной технологии. Ключевое преимущество ИТЦ — возможность получения измельченной структуры и, как следствие, повышенной твердости (до 380 НВ) на глубине до 5 мм [11], [12] за счет фазового, а не механического наклепа.

### Обсуждение

Анализ показывает, что существующая система ремонта колесных пар только за счет обточки имеет фундаментальный недостаток: она удаляет наиболее прочный слой металла, оставляя менее износостойкий. Это требует поиска решений по восстановлению не только геометрии, но и свойств металла.

Сравнение технологий упрочнения выявляет их сильные и слабые стороны. Плазменная и лазерная обработки позволяют создать очень твердый поверхностный слой, однако его малая глубина (1–1,5 мм) ставит вопрос о долговечности такого упрочнения в условиях интенсивного износа. После износа этого тонкого слоя процесс деградации основного металла возобновляется с прежней скоростью. Низкий процент внедрения плазменного упрочнения также указывает на организационные или технологические барьеры.

В этом контексте технология ИТЦ, обеспечивающая упрочнение на глубине до 5 мм, выглядит перспективной альтернативой. Более глубокий упрочненный слой может сохраняться после нескольких циклов износа или позволить проводить упрочнение реже. Однако, несмотря на полученные патенты и положительные результаты исследований, эта технология не получила развития в отрасли, уступив место плазменной. Вопрос о том, какая технология является оптимальной с точки зрения совокупности стоимости, долговечности и технологичности, остается открытым и требует дальнейших исследований и сравнительных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

### Заключение

Высокий износ колесных пар является серьезной экономической проблемой для железнодорожной отрасли, связанной с миллиардными затратами. Текущий ремонт обточкой, удаляя наклепанный слой, снижает потенциал износостойкости колеса.

Существует объективная необходимость перехода от простого восстановления геометрии профиля к восстановлению и повышению механических свойств металла обода при ремонте. Наиболее перспективным направлением для этого являются методы термического упрочнения.

Сравнительный анализ показывает, что, несмотря на большее распространение плазменной технологии, она не лишена недостатков, главный из которых — малая глубина упрочнения. Технология индукционной термоциклической обработки, позволяющая получать глубокий (до 5 мм) упрочненный слой с мелкозернистой структурой и высокой твердостью, обладает значительным потенциалом, который в настоящее время недооценен и не используется.



Для повышения ресурса колесных пар и снижения эксплуатационных расходов целесообразно возобновить исследования и опытно-промышленные испытания технологии ИТЦ, а также провести всестороннее сравнение ее эффективности с существующими методами упрочнения в реальных условиях эксплуатации.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Гапанович В.А. Факторы износа в системе колесо-рельс: проблемы и решения / В.А. Гапанович // Техника железных дорог. — 2022. — № 4(60). — С. 30–34.
2. Узлов И.Г. Разработка технологии производства высокопрочных локомотивных бандажей на ОАО «Интерпайп НТЗ» / И.Г. Узлов, А.И. Бабаченко, А.Н. Хулин // Metallurgical and mining industry. — 2009. — № 3. — С. 104–108.
3. Марков Д.П. Трибология и её применение на железнодорожном транспорте / Д.П. Марков. — Москва : Интекст, 2007. — 408 с.
4. Воробьев А.А. К вопросу об оптимальном соотношении твердости пары колесо-рельс / А.А. Воробьев, Г.Г. Бунькова, А.А. Соболев // Известия ПГУПС. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 77–86.
5. Проблемы износа колес железнодорожного подвижного состава // Моя колея 1520. — URL: [mojkoleya1520.rf/new/9544/](http://mojkoleya1520.rf/new/9544/) (дата обращения: 01.02.26).
6. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов. — Москва : Машиностроение, 2004. — 329 с.
7. Иванов И.А. Поверхность деталей машин и механизмов : учебное пособие для вузов / И.А. Иванов, С.В. Губенко, Д.П. Кононов. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 156 с.
8. Хриптович Е.В. Сравнительный анализ характеристик бандажей колесных пар, закаленных с использованием лазерного и плазменного источников тепла / Е.В. Хриптович, И.Н. Шиганов, Д.В. Пономаренко и др. // Мир транспорта. — 2022. — Т. 20, № 3(100). — С. 6–12.
9. Иванов И.А. 1608234 СССР, МКИЗ С 21 9/34. Способ восстановления профиля поверхности катания колёс рельсового транспорта // И.А. Иванов, Н.С. Продан, С.В. Урушев и др. — СССР, 1990. — 5 с.
10. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. — Ленинград : Машиностроение, 1989. — 255 с.
11. Школьник Д.П. Конструкционно – технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей / Д.П. Школьник, Е.А. Шур, В.М. Дусевич и др. — Санкт-Петербург : ПГУПС, Сборник научных трудов, 1997. — 63 с.
12. Иванов И.А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / И.А. Иванов. — Москва : ИНФРА-М, 2011. — 264 с.
13. Федоров М.В. Анализ влияния плазменного упрочнения гребней колесных пар локомотива на эксплуатационную долговечность в системе колесо-рельс / М.В. Федоров, С.А. Зайдес, А.Е. Неживляк // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 8(100). — С. 18–32.
14. Федоров М.В. Оценка эффективности технологий упрочнения бандажей колесных пар локомотивов по результатам эксплуатационных испытаний / М.В. Федоров, С.А. Зайдес // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2019. — Т. 15, № 2. — С. 89–95.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Gapanovich V.A. Faktori iznosa v sisteme koleso-rels: problemi i resheniya [Wear factors in the wheel-rail system: problems and solutions] / V.A. Gapanovich // Tekhnika zheleznikh dorog [Railway technology]. — 2022. — № 4(60). — P. 30–34. [in Russian]
2. Uzlov I.G. Razrabotka texnologii proizvodstva vy'sokoprochny'x lokomotivny'x bandazhej na OAO «Interpajp NTZ» [Development of technology for the production of high-strength locomotive tires at JSC 'Interpipe' NTZ] / I.G. Uzlov, A.I. Babachenko, A.N. Xulin // Metallurgical and mining industry. — 2009. — № 3. — P. 104–108. [in Russian]
3. Markov D.P. Tribologiya i yeyo primenenie na zheleznodorozhnom transporte [Tribology and its application in railway transport] / D.P. Markov. — Moscow : Intekst, 2007. — 408 p. [in Russian]
4. Vorobev A.A. K voprosu ob optimalnom sootnoshenii tverdosti pari koleso-rels [On the issue of the optimal ratio of the wheel-rail pair hardness] / A.A. Vorobev, G.G. Bunkova, A.A. Sobolev // Izvestiya PGUPS [PGUPS News]. — 2019. — Vol. 16, № 1. — P. 77–86. [in Russian]
5. Problemy iznosa koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Problems of wear of railway rolling stock wheels] // Moyeya koleya 1520 [My Gauge 1520]. — URL: [mojkoleya1520.rf/new/9544/](http://mojkoleya1520.rf/new/9544/) (accessed: 01.02.26). [in Russian]
6. Suslov A.G. Inzheneriya poverkhnosti detalei [Part surface engineering] / A.G. Suslov. — Moscow : Mashinostroenie, 2004. — 329 p. [in Russian]
7. Ivanov I.A. Poverkhnost detalei mashin i mekhanizmov [Surfaces of Machine Parts and Mechanisms] : A Textbook for Universities / I.A. Ivanov, S.V. Gubenko, D.P. Kononov. — Saint Petersburg : Lan, 2022. — 156 p. [in Russian]



8. Khriptovich Ye.V. Sravnitel'nii analiz kharakteristik bandazhei kolesnikh par, zakalennikh s ispolzovaniem lazernogo i plazmennogo istochnikov tepla [Comparative analysis of the characteristics of wheel rims hardened using laser and plasma heat sources] / Ye.V. Khriptovich, I.N. Shiganov, D.V. Ponomarenko et al. // *Mir transporta* [World of transport]. — 2022. — Vol. 20, № 3(100). — P. 6–12. [in Russian]
9. Ivanov I.A. 1608234 SSSR, MKIZ S 21 9/34. Sposob vosstanovleniya profilya poverhnosti kataniya kolyos rel'sovogo transporta [1608234 USSR, MKIZ S 21 9/34. Method for restoring the rolling surface profile of rail transport wheels] // I.A. Ivanov, N.S. Prodan, S.V. Urushev et al. — USSR, 1990. — 5 p. [in Russian]
10. Fedyukin V.K. Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detalei mashin [Thermal cycling of metals and machine parts] / V.K. Fedyukin, M.E. Smagorinskii. — Leningrad : Mashinostroenie, 1989. — 255 p. [in Russian]
11. Shkolnik D.P. Konstruktsionno – tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti koles rel'sovikh ekipazhei [Structural and technological support for the reliability of rail vehicle wheels] / D.P. Shkolnik, Ye.A. Shur, V.M. Dusevich et al. — Saint Petersburg : PGUPS, Sbornik nauchnikh trudov, 1997. — 63 p. [in Russian]
12. Ivanov I.A. Resurs i remontoprigradnost kolesnikh par podvizhnogo sostava zheleznikh dorog [Service life and maintainability of wheelsets of railway rolling stock] : a monograph / I.A. Ivanov. — Moscow : INFRA-M, 2011. — 264 p. [in Russian]
13. Fedorov M.V. Analiz vliyaniya plazmennogo uprochneniya grebnei kolesnikh par lokomotiva na ekspluatatsionnyu dolgovechnost v sisteme koleso-rels [Analysis of the influence of plasma hardening of locomotive wheel pair flanges on operational durability in the wheel-rail system] / M.V. Fedorov, S.A. Zaides, A.E. Nezhivlyak // *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya* [Hardening technologies and coatings]. — 2013. — № 8(100). — P. 18–32. [in Russian]
14. Fedorov M.V. Otsenka effektivnosti tekhnologii uprochneniya bandazhei kolesnikh par lokomotivov po rezultatam ekspluatatsionnikh ispitaniy [Evaluation of the effectiveness of technologies for strengthening locomotive wheel pair tires based on the results of operational tests] / M.V. Fedorov, S.A. Zaides // *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya* [Hardening technologies and coatings]. — 2019. — Vol. 15, № 2. — P. 89–95. [in Russian]