

УДК 621.78
DOI: 10.12737/21237

А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва),
Н.В. Грезев к.т.н., **С.А. Шмелев**, инженер
(ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино),
М.А. Мурзаков, инженер,
Ю.В. Маркушов, ведущий инженер
(НИЯУ МИФИ, Москва, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино)
E-mail: mtbmstu@mail.ru

Упрочнение колесной стали волоконными лазерами

Приведены результаты исследования процесса лазерного упрочнения колесной стали марки 2, а также сравнение технологии лазерного и плазменного упрочнения для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес. Для данной задачи рекомендуется использование волоконного лазера.

Ключевые слова: волоконный лазер; упрочнение; колесная сталь; технология; износостойкость; контактно-усталостная прочность.

A.V. Bogdanov, Can.Eng.
(Bauman STU of Moscow)
N.V. Grezev, Can.Eng., **S.A. Shmelyov**, Engineer,
(Moscow ST Co. "IRE-Polyus" Fryazino, Moscow Region),
M.A. Murzakov, Engineer,
Yu.V. Markushov, Principal engineer
(SRNU MEPU, Moscow, ST Co. "IRE-Polyus", Fryazino, Moscow Region)

Wheel steel strengthening with fiber lasers

At present time in Russia under conditions of a stable industrial growth the effectiveness of railway transport work obtains importance. One of the basic expense items of "RR" Co. ("Russian Railways" Company) is connected with the intensive wear problem of contact surfaces in wheel pairs at the interaction with a railway surface. In the railway system of Russia there are used many ways for the solution of this problem such as friction constant decrease – lubrication, wear-resistance increase in wheel pairs at the expense of various methods use for surface strengthening and other methods.

The authors offer for the strengthening problem solution to use fiber lasers the application of which gives a number of incontestable advantages in comparison with common methods of material processing: a controllability of a strengthened layer depth, a possibility of surface local working and others. Today the demand for laser techniques grows actively because, in the opinion of authors, fiber lasers give a considerably higher result in comparison with common methods of processing.

Keywords: fiber laser; strengthening; wheel steel; technique; wear-resistance; contact-fatigue strength.

В настоящее время снижение износостойкости и контактно-усталостной прочности локомотивных и вагонных колесных пар является одной из основных проблем железнодорожной отрасли [1]. Множество факторов в той или иной степени влияют на боковой износ железнодорожных колес. Называется до 50 различных причин, суммарно приведших к повышению бокового износа гребней железнодорожных колес [2].

Особую остроту данная проблема приобре-

ла во второй половине XX века в период уменьшения ширины колеи, замены подшипников качения на подшипники скольжения в буксовых узлах, применения гребнесмазывания, повышения нагрузки на ось, увеличения объемов перевозок и т.д. Сегодня на сети железных дорог России применяется множество различных способов решения данной проблемы. Рассмотрим более подробно некоторые пути снижения интенсивного износа рабочих поверхностей колес подвижного состава.

Плазменная технология упрочнения гребней колесных пар является одной из наиболее распространенных в России. На предприятиях ОАО «РЖД» внедрено около 90 установок плазменного упрочнения. В работоспособном состоянии из них поддерживается около 70 [3]. Принцип технологии плазменного упрочнения состоит в использовании многокомпонентного высокотемпературного потока продуктов сгорания метана. При использовании технологии плазменного упрочнения в области воздействия источника плазмы на обрабатываемую поверхность образуются зоны с высокими растягивающими остаточными напряжениями [4].

Очевидно, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на надежность железнодорожных деталей и узлов в процессе эксплуатации. При наличии в приповерхностных слоях деталей высоких остаточных напряжений, во время движения подвижного состава вероятно их суммирование с внешними знакопеременными, либо с напряжениями, вносимыми в изделие при их производстве, что, в свою очередь, может приводить к возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения, таких как трещины, выщербины, сколы и т.д. [2, 5].

В последние 10 лет на рынке появились мощные волоконные лазеры мульткиловаттного диапазона, которые произвели настоящую революцию в области обработки материалов. Уже сегодня многие промышленные лидеры производственного сектора сделали выбор в пользу волоконных лазеров [6, 11]. По мнению авторов, именно упрочнение с использованием волоконных лазеров должно в будущем быть использовано для решения задачи повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колесных пар.

Лазерная поверхностная обработка имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными способами упрочнения материалов: низкий уровень напряжений и деформаций, вносимых в изделие; высокая скорость обработки; возможность обработки на большую глубину; низкие затраты на обслуживание оборудования; возможность локальной обработки поверхности; возможность осуществлять термообработку без нанесения поглощающих покрытий; компактные размеры лазерного оборудования; отсутствие необходимости в применении газовых смесей; передача излучения по транспортному волокну без юстировки.

Принцип термообработки с использованием волоконных лазеров схож с традиционными процессами термообработки. Как показано на рис. 1, нагрев до температуры выше критической происходит энергией расфокусированного лазерного луча, перемещаемого по поверхности заготовки.

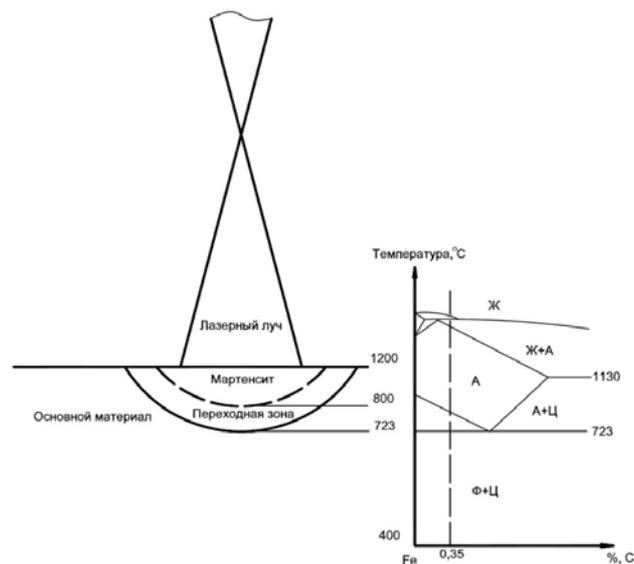


Рис. 1. Механизм лазерной термообработки

На этой стадии происходит фазовое превращение из феррита в аустенит. Далее происходит быстрый теплоотвод за счет основного материала изделия, что приводит к образованию аустенита в мартенсит. Кристалл мартенсита образуется в пределах зерна аустенита и не переходит границу между его зернами. Получаемая структура обладает высокой твердостью и повышенной износостойкостью.

Высокая твердость углеродистых сталей со структурой мартенсит достигается вследствие искажений кристаллической решетки пересыщенного твердого раствора вследствие внедрения атомов углерода [7]. Результат лазерной термообработки – повышение износостойкости и контактно-усталостной прочности обработанной детали в несколько раз [8].

По мнению авторов лазерная термообработка в железнодорожной сфере может быть эффективна не только для решения задачи повышения прочностных характеристик в рамках трибосистемы «колесо–рельс». Возможные применения лазерной термообработки в промышленных циклах ОАО «РЖД» – это упрочнение надрессорных балок и боковин тележек грузовых вагонов в зоне пятниковых узлов и в зонах буксовых проемов соответственно; упрочнение фрикционных клиньев вагонов, гильз цилиндров тепловозов.

Кроме того, одно из возможных применений лазерного оборудования для ОАО «РЖД» – это закалка стыков рельс после алюминотермитной сварки. Данный способ может предупредить образование характерных дефектов рельса, сваренного алюминотермитным способом – седловин, которые, в свою очередь, образуются при контактном взаимодействии с колесом.

В настоящее время в ОАО «РЖД» задача упрочнения поверхности колесных пар решается с учетом ТУ 0943-218-01124323-2006 «Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня».

Экспериментальная часть

Работа проводилась в центре лазерных технологий ООО НТО «ИРЭ-Полус» в г. Фрязино. Для выполнения поставленной задачи было использовано следующее оборудование: лазер ЛС-10 (НЛС-8, 100 мкм); робот KR 60 НА; оптическая голова IPG, коллиматор 160 мм, фокус 500 мм [10](рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид станда для отработки лазерных технологий

Предварительные измерения микротвердости проводились на приборе Piccolo 2. Измерения микротвердости на шлифах проводились микротвердометром модели DURASCAN-70. Подбор режима лазерной термообработки производился на колесной стали марки 2, химический состав которой приведен в табл. 1.

1. Химический состав, %, колесной стали марки 2

Углерод	Марганец	Кремний	Ванадий	Сера	Фосфор	Хром	Никель	Медь
0,55...0,63	0,50...0,90	0,22...0,45	до 0,10	до 0,025	до 0,03	до 0,30	до 0,30	до 0,30

Проведенные эксперименты позволили оптимизировать оптимальные технологические параметры для лазерной термообработки колесной стали. Мощность лазерного излучения при подборе оптимального режима варьировалась от 2 до 10 кВт, скорость термообработки от 10 до 800 мм/с, диаметр пятна от 5,8 до 14,5 мм, а плотность мощности находилась в интервале от 12 до 168 МВт/м².

На режимах 1 – 9 с высокой скоростью обработки 200...800 мм/с глубина упрочненного слоя варьируется в пределах 0,1...0,3 мм. Без оплавления поверхности глубина упрочнения составила 0,2 мм (рис. 3). На режимах 10 – 14 со скоростью обработки 5... 50 мм/с глубина упрочненного слоя составила 0,5...1,0 мм. Без оплавления поверхности глубина упрочнения составила 0,8 мм. Согласно подобранному режиму был поставлен эксперимент по поверхностному упрочнению колесной стали марки 2. В табл. 2 представлены рабочие режимы термообработки колесной стали марки 2.

В табл. 3 представлен общий вид дорожек после лазерного упрочнения.

Результаты экспериментов

На рис. 4 и 5 представлены результаты из

мерений микротвердости и глубины упрочнения при различных позициях расфокусирования луча соответственно. Наблюдается тенденция спада микротвердости и глубины упрочнения при увеличении расфокусирования лазерного пятна. В среднем, на каждые 50 мм расфокусирования глубина упрочнения спадает на 200 мкм. Оплавление поверхности наблюдалось на режимах при расфокусировании 150, 200, 250 мм, поэтому в качестве отправной точки для следующего эксперимента выбран фокус 300 мм.

На рис. 6 и 7 представлены результаты измерений микротвердости и глубины упрочнения при различной мощности лазерного излучения соответственно. Наблюдается тенденция спада глубины упрочнения при уменьшении мощности. В среднем при уменьшении мощности на 1 кВт, глубина упрочнения уменьшается на 250 мкм.

Исходя из результатов экспериментов, выбран наиболее оптимальный режим термоупрочнения для данной колесной стали. На рис. 7 показаны результаты измерения микротвердости оптимального образца: нагрузка 100 г; шаг измерения 100 мкм; измерения проводились согласно ГОСТ 9450-76.

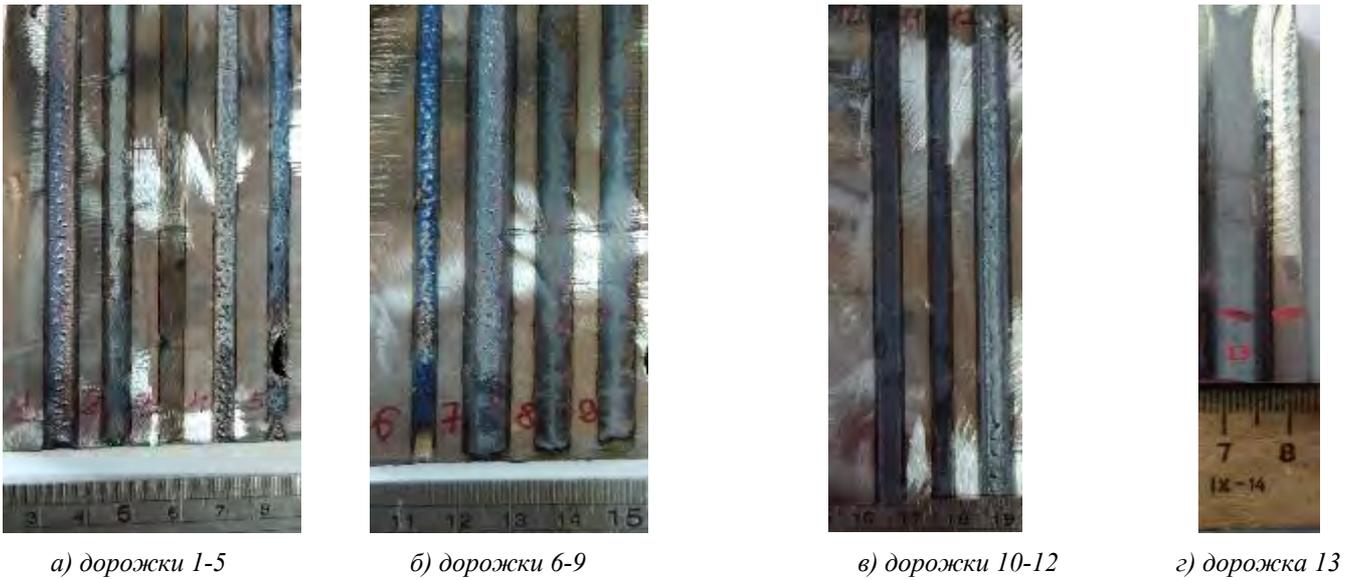


Рис. 3. Внешний вид дорожек после упрочнения волоконным лазером

2. Рабочие режимы термообработки колесной стали марки 2

№	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Диаметр пятна, мм	Примечание
1	5000	25	17,3	Поверхностная твердость после ЛТО лежит в диапазоне от 750 до 850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности составила 1,1 и 1,0 мм соответственно.
2	4000	25	17,3	

3. Общий вид полученных дорожек после лазерного упрочнения



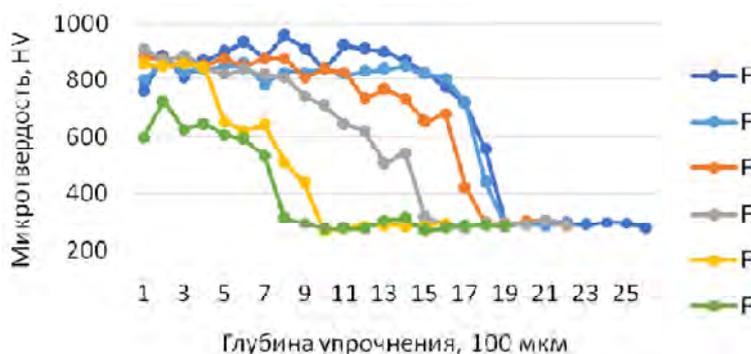


Рис. 4. Изменение микротвердости от поверхности вглубь металла в зависимости от различного положения фокусного расстояния



Рис. 5. Изменение глубины упрочнения ($HV > 650$) для образцов 3.1 - 3.6 в зависимости от величины расфокусирования лазерного пятна

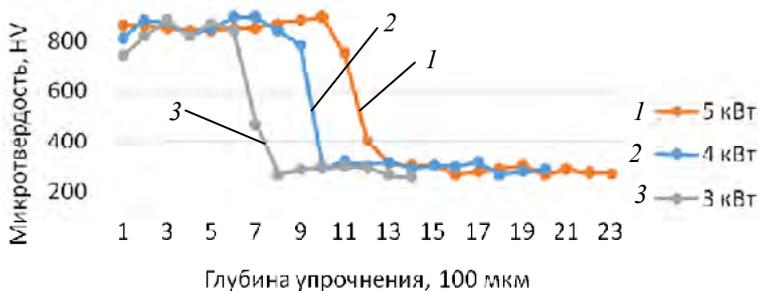


Рис. 6. Изменение микротвердости от поверхности вглубь металла в зависимости от различной мощности лазерного излучения



Рис.7. Микротвердость оптимального образца, полученного на следующем режиме: скорость обработки 25 мм/с; мощность лазерного излучения 5 кВт; ширина обработки 10 мм; плотность мощности 21 МВт/м²

Замечено, что с уменьшением скорости обработки увеличивается глубина упрочнения без оплавления поверхности. Поверхностная микротвердость лежит в диапазоне от 750 до 850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя на оптимальном режиме без оплавления поверхности составила 1,1 мм. При этом, плотность мощности на данных режимах составила $2,1 \times 10^3$ Вт/см².

Согласно [8] критическая плотность мощности при использовании CO₂ лазера, выше которой происходит оплавление поверхности для различных сталей лежит в диапазоне $(2 \dots 6) \times 10^4$ Вт/см². Глубина упрочненного слоя при этом не превышает 0,1...0,15 мм. При использовании волоконного лазера для термообработки колесной стали удалось добиться глубины упрочненного слоя более 1 мм при плотности мощности на порядок меньшей,

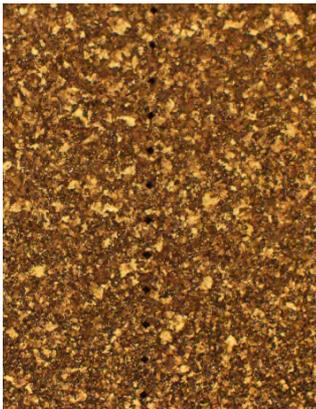
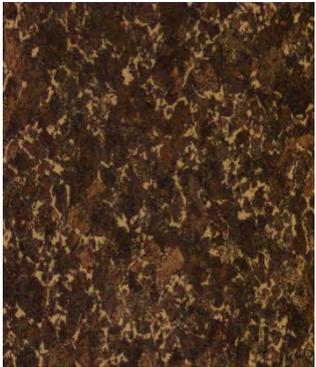
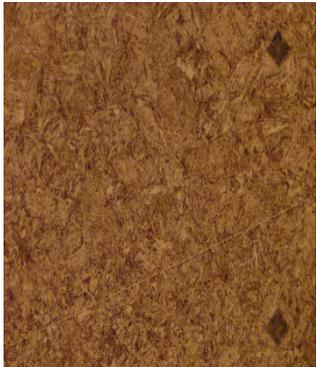
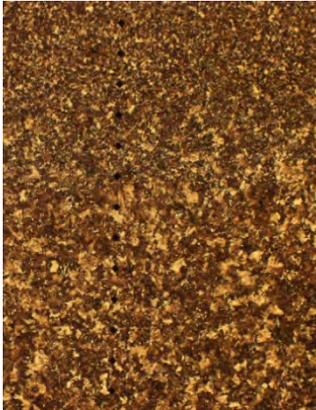
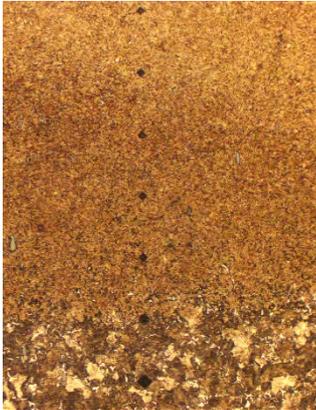
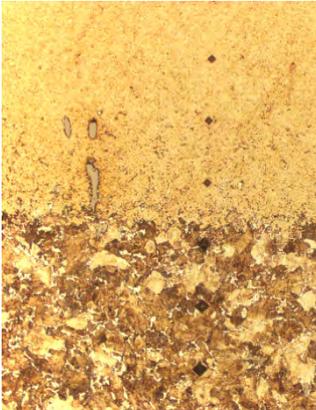
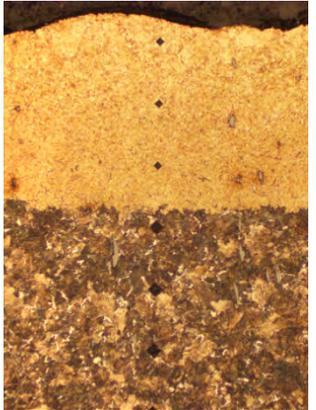
чем при использовании CO₂ лазера.

Исследование микроструктуры

Из табл. 4 видно, что с увеличением скорости термообработки структура закаленного слоя становится более мелкодисперсной, что

положительно влияет на прочностные характеристики упрочненного слоя [7]. Кроме того, можно увидеть микроструктуру упрочнения на скорости 1 мм/с, микротвердость составляет 400 HV, что обусловлено одновременным закаливанием и отпуском закалочной структуры.

4. Сравнение микроструктур упрочнения на различных скоростях

Скорость обработки 1 мм/с	Скорость обработки 10 мм/с	Скорость обработки 25 мм/с	Скорость обработки 200 мм/с
Увеличение ×200			
			
Увеличение ×1000			
			
Граница перехода «Упрочнение-ОМ» ×200			
			

Сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения

Опираясь на научную статью [9], выполнен сравнительный анализ термообработки колесной стали с использованием лазерной и плазменной установки.

Табл. 5 показывает, что скорости лазерной термообработки увеличиваются более чем в 3,5 раза, а требования по значениям микротвердости соответствуют ТУ 0943-218-01124323-2006 «Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня».

5. Сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения

Лазерное упрочнение круглым пятном	Плазменное упрочнение
Скорость обработки – 25 мм/с	Скорость обработки – 7 мм/с
Глубина упрочнения – 1,1 мм	Глубина упрочнения – 0,9 мм
Величина микротвердости – 750...850 HV	Величина микротвердости – 1600...1000 HV
Ширина полосы упрочнения за один проход – 10 мм	Ширина полосы упрочнения за один проход – 25 мм
Защитный газ – не используется	Защитный газ – азот. Расход – 5 л/мин
Рабочая мощность источника: 5 кВт	Рабочая мощность источника: 35 кВт
Площадь установки: 4 м ²	Площадь установки: 40 м ²

Для увеличения ширины упрочненного слоя необходимо провести дополнительные эксперименты используя оптическую систему, дающую в фокальной плоскости прямоугольную, либо линейную развертку.

Для получения ширины упрочнения 30 мм, согласно ТУ 0943-218-01124323-2006 за один проход необходимо проведение работ по лазерному упрочнению линейной разверткой с использованием специальной оптической системы.

Заключение

Указанную систему возможно изготовить на базе гомогенизатора с использованием растра цилиндрических линз, цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призме Френеля, системы трансформации лазерного пучка Pi-Sharp и др. Поскольку на этапе изготовления локомотивных и вагонных колес в изделия вносятся различные остаточные напряжения, для определения вида обрабатываемых колесных пар необходимо исследование остаточных напряжений после лазерной термообработки.

1. Исследования показали возможность использования волоконных лазеров для упрочнения колесной стали марки 2. Проведен эксперимент по лазерному упрочнению колесной стали 2. Подобраны технологические параметры обработки без оплавления поверхности, которые выглядят следующим образом: мощность – 4...5 кВт; скорость – 25 мм/с; диаметр пятна – 17 мм. Поверхностная микротвердость на оптимальных режимах лежит в диапазоне 750...850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9 – 3,3 раза. Глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности составила 1,1 и 1,0 мм. При этом плотности мощности на данных режимах составили $2,1 \times 10^3$ Вт/см² и $1,68 \times 10^3$ Вт/см² соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

2. Выявлена тенденция изменения микротвердости и глубины проплавления в зависимости от расфокусирования лазерного пятна.

3. Выявлена тенденция изменения микротвердости и глубины проплавления в зависимости от мощности лазерного излучения.

4. Выполнен сравнительный анализ лазерного и плазменного упрочнения, (см. табл. 5). Скорости лазерной термообработки, по сравнению с плазменной, увеличиваются более чем в 3,5 раза.

1. Балдин, В.Л., Буйносов, А.П., Тихонов, В.А. Повышение долговечности колесных пар за счет упрочнения гребней бандажей локомотивов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 5. – С. 57–60.

2. Марков, Д.П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 1. – С. 36–42.

3. Петров, С.Ю., Костюкевич, А.И., Рябов, А.А. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. – 2013. – №2.

4. Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – №6. – С.9–17.