

УДК: 621.771.294.04.001.76

РАЗРАБОТКА НОВОЙ СИСТЕМЫ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

БАБАЧЕНКО А.И.^{1*}, д. т. н.,
ФИЛИППОВ А.А.²,
ДЕМЕНТЬЕВА Ж.А.³,
КОНОНЕНКО А.А. к. т. н.⁴,

¹ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Днепрпетровск, Украина, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Днепрпетровск, Украина, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: thstrongwings@gmail.com, ORCID: 0000-0003-8741-5498

³ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Днепрпетровск, Украина, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8863-4558

⁴ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Днепрпетровск, Украина, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: A_Kononenko@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-7446-4105

Аннотация. *Цель.* Разработка новой системы микролегирования стали для железнодорожных колес с высоким комплексом служебных и эксплуатационных свойств. *Методика.* Аналитические исследования, выплавка слитков малого объема в лабораторных условиях, микроструктурные исследования с помощью световой микроскопии. *Результаты.* Выполнены аналитические исследования влияния химического состава и различных методов упрочнения на механические свойства и формирование структурного состояния. Установлено, что для достижения высокой эксплуатационной стойкости железнодорожных колес необходимо создание стали с содержанием углерода до 0,6% и ее упрочнение с помощью нескольких методов. Одним из наиболее эффективных направлений является формирование структурного состояния с наличием тугоплавких дисперсных частиц, при этом задействуются дисперсионное и зернограничное упрочнение. В лабораторных условиях изготовлены слитки малого объема (до 10 кг) стали, с системой микролегирования Al-Ti-N. *Научная новизна.* Установлено перспективное направление по совершенствованию химического состава стали для железнодорожных колес, которое может обеспечить повышение их служебных и эксплуатационных свойств. *Практическая значимость.* Отработана методика выплавки азотсодержащих сталей в лабораторных условиях с учетом следующих факторов: размер кусков азотированного ферросплава; условия введения азотированного ферросплава; предварительное глубокое раскисление расплава; достижение необходимых температур расплава; оптимальная продолжительность выдержки после введения лигатуры.

Ключевые слова: цельнокатаные железнодорожные колеса, химический состав стали, эксплуатационные дефекты на поверхности катания, карбонитридное упрочнение.

РОЗРОБКА НОВОЇ СИСТЕМИ МІКРОЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ДЛЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

БАБАЧЕНКО О.І.^{1*}, д. т. н.,
ФІЛІПОВ А.О.²,
ДЕМЕНТЬЄВА Ж.А.³,
КОНОНЕНКО Г.А.⁴, к. т. н.

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: thstrongwings@gmail.com, ORCID: 0000-0003-8741-5498

³ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8863-4558

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Kononenko@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-7446-4105.

Анотація. Мета. Розробка нової системи мікролегування сталі для залізничних коліс з високим комплексом службових і експлуатаційних властивостей. **Методика.** Аналітичні дослідження, виплавка злитків малого об'єму в лабораторних умовах, мікроструктурні дослідження за допомогою світлової мікроскопії. **Результати.** Виконано аналітичні дослідження впливу хімічного складу і різних методів зміцнення на механічні властивості і формування структурного стану. Встановлено, що для досягнення високої експлуатаційної стійкості залізничних коліс необхідне створення сталі з вмістом вуглецю до 0,6% і зміцненням її за допомогою декількох методів. Одним з найбільш ефективних напрямків є формування структурного стану з наявністю тугоплавких дисперсних частинок, при цьому здійснюються дисперсійне і зернограничне зміцнення. У лабораторних умовах виготовлені злитки малого об'єму (до 10 кг) сталі, з системою мікролегування Al-Ti-N. **Наукова новизна.** Встановлено перспективний напрямок з вдосконалення хімічного складу сталі для залізничних коліс, який може забезпечити підвищення їх службових і експлуатаційних властивостей. **Практична значимість.** Відпрацьована методика виплавки азотовмісних сталей в лабораторних умовах з урахуванням наступних факторів: розмір шматків азотованого феросплаву; умови введення азотованого феросплаву; попереднє глибоке розкислення розплаву; досягнення необхідних температур розплаву; оптимальна тривалість витримки після введення лігатури.

Ключові слова: суцільнокатані залізничні колеса, хімічний склад сталі, експлуатаційні дефекти на поверхні кочення, карбонітридне зміцнення.

DEVELOPMENT OF A NEW SYSTEM MICROALLOYAGE STEEL FOR HIGH-DURABLE RAILWAY WHEELS

BABACHENKO A. I. ^{1*}, *Doc. Sc. (Tech.)*
FILIPPOV A. A. ²,
DEMENT'EVA Zh. A. ³,
KONONENKO A. A. ⁴, *Cand. Sc. (Tech.)*

¹Department of Deformation and Heat Treatment of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Department of Deformation and Heat Treatment of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: thestrongwings@gmail.com, ORCID: 0000-0003-8741-5498

³Department of Deformation and Heat Treatment of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8863-4558

⁴ Department of Deformation and Heat Treatment of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: A_Kononenko@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-7446-4105

Abstract. Purpose. Development of a new microalloying system for railwheels with a high level of technical and operational properties. **Methodology.** Analytical studies, smelting of small ingots in laboratory conditions, microstructural studies using light microscopy. **Results.** Analytical research of the influence of the chemical composition and various methods of hardening on mechanical properties and the formation of a structural state are performed. It is established that to achieve high operational stability of railway wheels, it is necessary to create steel with a carbon content of up to 0.6% and hardening of steel using several methods. One of the most effective directions is the formation of a structural state with the presence of refractory dispersed particles, while dispersive and grain-boundary hardening are involved. In the laboratory, ingots of small volume (up to 10 kg) of steel, microalloyed Al-Ti-N system are produced. **Originality.** A perspective direction has been established to change the chemical composition of steel for railway wheels, which can provide an increase in their technical and operational properties. **Practical value.** The technique of smelting nitrogen-containing steels in laboratory conditions is worked out, taking into account the following factors: the size of pieces of nitrided ferroalloy; conditions for the introduction of nitrided ferroalloy; preliminary deep deoxidation of the melt; achieving the required melt temperatures; optimal duration of exposure after the introduction of ligature.

Keywords: all-rolled railway wheels, chemical composition of steel, operational defects on the rolling surface, carbonitride hardening

Состояние вопроса.

Железнодорожные колеса – ответственный элемент подвижного состава. Они являются неподрессоренной частью вагона и непосредственно

воспринимают все нагрузки. В настоящее время в связи с ростом на железных дорогах скоростей движения и увеличением осевых нагрузок, как для пассажирских, так и для грузовых поездов, особую

актуальность приобретает проблема повышения устойчивости колес к образованию на поверхности катания дефектов эксплуатационного происхождения.

В процессе эксплуатации наряду с нормальными напряжениями от давления колеса при его качении по рельсу в месте контакта возникают касательные напряжения и напряжения от тепла трения торможения [1], которые приводят к появлению различных повреждений железнодорожных колес, основными видами которых являются [2]: износ (прокат) поверхности катания; дефекты теплового воздействия (в процессе интенсивного торможения на ободе могут иметь место повреждения термического (термомеханического) происхождения: ползуны, навары, тормозные выщербины, термические трещины и др.; усталостные выщербины (при высоких циклических напряжениях в контакте на поверхности катания обода колеса появляются трещины, которые распространяются и на более значительную глубину (15-20 мм)), разрушение колес.

На устойчивость колес против износа существенно влияет твердость колес. При выборе оптимального соотношения прочности элементов пары колесо - рельс рекомендуется использовать комплексный подход [1, 2]. На образование выщербин влияет целый ряд факторов из них материаловедческий характер носят химический состав колесной стали и уровень твердости колеса [3-8].

Химический состав стали для железнодорожных колес, наряду с термической обработкой и совершенствованием их геометрических размеров, является одним из главных факторов, определяющих их свойства, а его совершенствование - эффективным способом повышения надежности и долговечности этих изделий.

Так как пластическая деформация в кристаллических телах осуществляется движением дислокаций, то упрочнение металла может быть достигнуто путем создания препятствий для их продвижения [9]. Такими препятствиями могут быть [10]: атомы другого химического элемента; другие дислокации или их скопления и конфигурации; границы зерен и элементов субструктуры (субзерна, ячеистая субструктура), частицы второй фазы. Соответственно, методами упрочнения металлических материалов являются [11, 12]: твердорастворное упрочнение (упрочнение за счет легирования); деформационное упрочнение и упрочнение с помощью термообработки (создание дефектов кристаллической структуры с помощью деформации или термообработки); зернограничное и субструктурное упрочнение; дисперсионное упрочнение (дисперсионное твердение – упрочнение за счет выделения частиц второй фазы).

Все эти механизмы упрочнения могут работать вместе и влиять друг на друга.

Результаты исследований и их обсуждение.

Достижение высокого комплекса свойств обода железнодорожного колеса при низкой чувствительности к тепловому воздействию, возникающему в процессе торможения, возможно при снижении содержания углерода, а имеющее место при этом разупрочнение должно быть компенсировано одним из известных методов упрочнения металлов.

Для повышения комплекса эксплуатационных свойств кроме твердорастворного упрочнения, результатом использования которого является разработка марки К (Пат. UA101757), применили еще и упрочнение другими способами. Химический состав опытных сталей базируется на известных марках стали с пониженным содержанием углерода по сравнению с маркой Т (ГОСТ 10791-2011) и введена система микролегирования алюминий-титан-азот. Еще в жидкой стали должны образоваться дисперсные частицы карбонитридов титана и алюминия. Это должно повлиять на формирование литой структуры в направлении уменьшения размеров зерен, и в дальнейшем при нагреве стали под деформационную и термическую обработку сдерживать рост зерен. Также сами частицы будут сопротивляться движению дислокаций. Благодаря этому новая опытная сталь будет иметь повышение прочностных свойств.

Доля собственно карбонитридного упрочнения в общем упрочнении может составлять около 15...25%. Кроме того, дисперсные частицы способствуют измельчению аустенитного зерна стали, тормозят движение дислокаций, и доля упрочнения в результате измельчения зерна может составлять до 30...40%. Граница зерна является препятствием для движения дислокаций [13]. И чем больше границ зерен, тем мельче зерно, и тем большее упрочнение. Данный метод имеет некоторое преимущество перед большинством других: зернограничное упрочнение не сопровождается охрупчиванием. Более того, некоторые участки границ зерен при деформации сами являются источником дислокаций [13], а если дислокаций в объеме становится больше, то при своем движении они еще более интенсивно взаимодействуют, что вновь приводит к упрочнению. Таким образом, чем больше будет дисперсных тугоплавких частиц в объеме металла, тем мельче будет зерно.

Для разработки рекомендаций по химическому составу стали для железнодорожных колес с высоким уровнем механических свойств и повышенной стойкостью к образованию эксплуатационных дефектов на поверхности катания, в лабораторных условиях были выплавлены стали опытного состава, с системой легирования Al-Ti-N. Рекомендуемое содержание элементов в опытных сталях, % масс: азота - 0,015-0,020 (до 0,030); алюминия - 0,02-0,03 (до 0,06) титана - 0,01-0,02 (до 0,03). При выплавке необходимо было повысить в этих сталях содержание азота. Однако, технология азотирования до сих пор

остаётся сложной задачей в практике производства сталей, поскольку зависит от многих факторов, иногда взаимоисключающих друг друга. Выплавка подобных марок сталей требует строгого контроля дозировки и времени введения, выдержки легирующих элементов, экспресс контроль содержания газов в процессе доводки стали, строгого соблюдения температурного режима процесса.

Особенно сложно достичь желаемого результата в лабораторных условиях, где нет возможности обеспечить экспресс анализ химического состава полупродукта перед доводкой.

Азот при повсеместной его доступности и низкой стоимости является сильным аустенитообразующим элементом и эффективно применяется в производстве экономно-легированных сталей различного назначения. В низколегированных сталях с нитридным упрочнением обычно содержится от

0,010 до 0,040% азота, а в высоколегированном металле концентрация азота может превышать 1%.

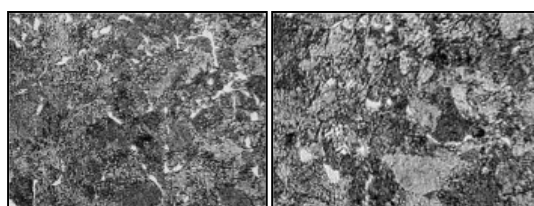
В лабораторных условиях с помощью экспериментального комплекса в индукционной печи были выплавлены слитки малого объема диаметром 80 мм с повышенным содержанием марганца и кремния, а также с системой микролегирования Al-Ti-N. Химический состав опытных плавков представлен в таблице 1. Плавки К и Т были выплавлены в одинаковых условиях с другими опытными плавками и по своему химическому составу соответствуют сталям марки К и Т (Пат. UA101757 и ГОСТ 10791-2011 соответственно), железнодорожные колеса из этих сталей имеют твердость не менее 320НВ. Они используются в данных исследованиях как сравнительные. Опытные стали содержат систему микролегирования Al-Ti-N на базе стали марки К и марки 2 с содержанием углерода не более 0,6% масс.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей/ The chemical composition of the investigated steels

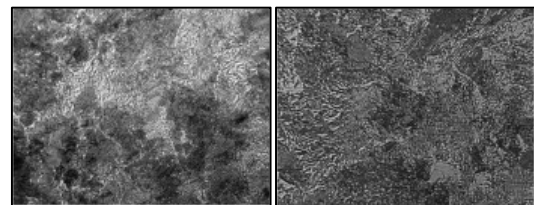
Усл. обознач. плавки	Содержание элементов, % масс.										
	C	Si	Mn	P	S	V	Mo	Al	Ti	(N)	(O)
1 К	0,58	0,81	0,93	0,009	0,007	0,079	≤0,010	0,019	≤0,005	0,004	0,011
2 Т	0,63	0,31	0,74	0,008	0,005	0,115	≤0,010	0,021	≤0,005	0,007	0,073
3 К+(Al-Ti-N)	0,58	0,88	0,89	0,013	0,005	≤0,005	0,016	0,026	0,022	0,018	0,007
4 2+(Al-Ti-N)	0,60	0,36	0,76	0,016	0,004	≤0,005	0,023	0,042	0,018	0,013	0,0065

В результате микроструктурного анализа установлено, что в опытных сталях, микролегированных азотом произошло формирование дисперсных тугоплавких частиц (нитридов и карбонитридов титана, нитридов алюминия). В литом состоянии структура представляет собой перлит с небольшим количеством доэвектоидного феррита.



Плавка 1

Плавка 2



Плавка 3

Плавка 4

Рис. 1. Микроструктура опытных сталей/ The microstructure of experimental steels. ×400

Выводы.

1. Исследованы виды повреждений, возникающих при эксплуатации. Показано, что химический состав колесной стали является одним из определяющих факторов, влияющих на эксплуатационные свойства колес, а его совершенствование – эффективным способом повышения надежности и долговечности этих изделий.

2. Рассмотрены возможные способы повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес. Разработаны системы микролегирования с принципиально новым методом упрочнения стали для железнодорожных колес – дисперсными частицами тугоплавкой фазы.

3. Отработаны режимы выплавки сталей различного химического состава для железнодорожных колес. Произведена выплавка опытных плавков с различным содержанием микролегирующих элементов, в том числе и азотсодержащими.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колесная сталь / Узлов И.Г., Гасик М.И., Есаулов А.Т. и др. – К.: Техник, 1985. – 168 с.
2. Узлов И.Г. Создание новой металлопродукции для обновления железнодорожного подвижного состава Украины / И.Г. Узлов // Металлургическая и горнорудная промышленность.- 2006.- № 1.- С. 62-66.

3. Промышленное производство высокопрочных железнодорожных колес / И.Г. Узлов, К.И. Узлов, А.В. Кныш, Г.Н. Польский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. №1. С. 98 – 101.
4. Втомна довговічність сталей залізничних коліс / О.П. Остащ, І.М. Андрейко, В.В. Кулик, І.Г. Узлов, О.І. Бабаченко // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. - 2007. - № 3. – С. 93-102.
5. Критический коэффициент интенсивности напряжений железнодорожных колес и влияние на него параметров структуры колесной стали / И.Г. Узлов, А.И. Бабаченко, Ж.А. Деметьева, А.А. Кононенко // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: ПГАСА, 2007. - Выпуск 41. – ч. 2. - С. 49-53.*
6. Эффективность различных показателей оценки надежности железнодорожных колес / И.Г. Узлов, А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, А.Л. Сафронов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2007. - № 1. - С. 70-74.
7. Влияние циклических нагрузок на критическую длину усталостной трещины железнодорожных колес различного химического состава / А.И. Бабаченко, А.А. Кононенко, А.В. Рослик, С.В. Беседнов, А.Е. Камышный // *Материалы международной конференции «2011 International Heavy Haul Association Conference»*. – Калгари, 2011.
8. Ларин Т.В. Исследование механизма износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатаных колес. – В кн.: *Повышение надежности и долговечности деталей подвижного состава и пути: Тр. ВНИИЖТ. М., 1977. – С. 51-68.*
13. Гуляев А.П. *Металловедение. Учебник для вузов. 6-е издание., перераб. и доп.* М: *Металлургия*, 1986. 544.
14. *Металловедение и термическая обработка стали. Справ. изж. — 3-е., перереб. и доп.* В 3-х т. Т. II *Основы термической обработки/Под ред. Бернштейна М.Л., Рахшгадта А.Г.* М: *Металлургия*, 1983. 368 с.
15. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. *Специальные стали. Учебник для вузов.* М: *Металлургия*, 1985, 408 с.
16. Матросов Ю.И. Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. *Сталь для магистральных газопроводов*, М.: *Металлургия*, 1989. 288 с.
17. *Металлофизика высокопрочных сплавов. Учебное пособие для вузов.* Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. М: *Металлургия*, 1986. 312 с.

REFERENCES

1. Uzlov I.G. Kolesnaya stal [Wheel steel] Uzlov I.G., Gasik M.I., Esaulov A.T. – K.: *Tehnik*, 1985. – 168 p.
2. Uzlov I.G. Sozdanie novoy metalloprodykzii dlya obnovenia zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava Ukrainy [Creation of new metal products for the renewal of the railway rolling stock of Ukraine] /Uzlov I.G. // *Metallurgical and mining industry*. - 2006.- № 1.- P. 62-66
3. Uzlov I.G. Promyshleoe proizvodstvo vysokoprochnykh zheleznodorozhnykh koles [Industrial production of high-strength railway wheels] / Uzlov I.G., Uzlov K.I. Knysh A.V., Polskii G.N. // *Промышленное производство высокопрочных железнодорожных колес / И.Г. Узлов, К.И. Узлов, А.В. Кныш, Г.Н. Польский // Metallurgical and mining industry*. - 2008. №1. P. 98 – 101.
4. O.P. Ostash Vtomna dovgovichnist staley zaliznychnykh kolis [Fatigue durability of steel railway wheels] / O.P. Ostash, I. M. Andreiko, V.V. Kulik, I.G. Uzlov, OI Babachenko // *Physico-chemical mechanics of materials*. - 2007. - № 3. - P. 93-102.
5. Uzlov I.G. Kriticheskiy koeffitsient intensivnosti naprazheniy zheleznodorozhnykh koles I vlianie nan ego parametrov struktury kolesoi stali [Critical stress intensity coefficient of railway wheels and the impact on it of the parameters of the wheel steel structure] / I.G. Uzlov, A.I. Babachenko, J.A. Dementieva, A.A. Kononenko // *Building, Material Science, Mechanical Engineering: Sat. Scientific. W. - Dnepropetrovsk: PGAASA, 2007. - Issue 41. - Part 2. - P. 49-53.*
6. I.G. Uzlov Effektivnost razlichnykh pokasateley ozenki nadezhnosti zheleznodorozhnykh koles [Efficiency of various indicators of railway wheels reliability assessment] / I.G. Uzlov, A.I. Babachenko, A.A. Kononenko, A.L. Safronov // *Metallurgical and mining industry*. - 2007. - No. 1. - P. 70-74.
7. Babachenko A.I. Vliyanie ziklicheskiy nagrusok na kriticheskuyu dlinu treshiny zheleznodorozhnykh koles raslichogo himicheskogo sostava [Influence of cyclic loads on the critical length of a fatigue crack of railway wheels of different chemical composition] / A.I. Babachenko, A.A. Kononenko, A.V. Roslik, S.V. Besednov, A.E. Kamyshnyy // *Materials of the international conference "2011 International Heavy Haul Association Conference"*. – Calgary.
8. Larin T.V. Issledovanie mehanizma iznosa, ustalostnogo vykrashivania, obrazovania vysherbin [Investigation of the mechanism of wear, fatigue dying, the formation of scrapes and the rolling on the rolling surface of solid-rolled wheels]. - In: *Improving the reliability and durability of rolling stock parts and ways: Tr. VNIIZhT. M., 1977. - P. 51-68.*
9. Gulyaev A.P. *metallovedenie [Metallurgy]. Textbook for high schools. 6 th edition.* M: *Metallurgy*, 1986. 544.p.
10. *Metallovedenie I termicheskaya obrabotka stali [Metallurgy and heat treatment of steel]. Ref. Viz. - 3rd.,. In 3 volumes, T. II. Fundamentals of heat treatment, Ed. Bernshteyn M.L., Rakhshadt A.G.* M: *Metallurgy*, 1983. 368 p.
11. Goldstein MI, Grachev SV, Veksler Yu.G. *spesialnie stali [Special steels].* M: *Metallurgy*, 1985, 408 p.
12. Matrosov Yu.I. Litvinenko DA, Golovanenko S.A. *stal dlia magistralnykh truboprovodov [Steel for trunk gas pipelines],* M.: *Metallurgy*, 1989. 288 p.
13. *Metallofizika vsokoprochnykh splavov [Metallophysics of high-strength alloys] / Goldshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. / M. Metallurgia, 1986. – 312 p.*

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром.техн.наук, В.А. Луценко (Украина); д-ром.техн.наук, проф. Л.Н. Дейнеко (Украина)»