

В. А. Локтионов-Ремизовский, канд. техн. наук, ведущ. науч. сотр.,
e-mail: loktionov@ptima.kiev.ua

Н. В. Кирьякова, гл. технолог

В. Г. Новицкий, канд. техн. наук, ведущ. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА В СТАЛЯХ НА ИЗНАШИВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ

На основе анализа научных публикаций отечественных и зарубежных авторов и результатов собственных исследований установлено, что в системе железо–углерод, в стальном диапазоне содержания углерода 0,35–0,8 %, функции зависимости износа железнодорожных колес и рельсов и вязкости разрушения среднеуглеродистых сталей подобны, имеют нисходящую ветвь, перегиб в области 0,8 % углерода и выходят на экспоненту при содержании углерода более 0,8 %, что соответствует положениям закона Курнакова.

Ключевые слова: сталь, колесо, рельса, углерод, разрушение, износ.

Необходимость повышения безопасности и эффективности пассажирских и грузовых железнодорожных перевозок предъявляет высокие требования к надежности и долговечности работы деталей, узлов и транспортного средства в целом. 90 % выхода из строя деталей, узлов и транспорта в целом обусловлено изнашиванием отдельных деталей, узлов и механизмов. Увеличение скоростей и грузоподъемности железнодорожного транспорта является следствием экономической целесообразности. Проблемой надежности и долговечности при эксплуатации железнодорожного транспорта занимаются ведущие научные организации во всех передовых странах мира.

В зоне контакта пары трения либо на изнашиваемой поверхности отдельных деталей, работающих в условиях трения скольжения, трения качения, абразивного, гидроабразивного и других условиях эксплуатации, практически одновременно проходит множество процессов в силу энергетического (механического, коррозионного, термического, химического и т. п.) внешнего воздействия на рабочую поверхность детали. Следствием внешнего воздействия на рабочую поверхность детали является разрушение микрообъемов изнашиваемой поверхности (изменение геометрии поверхности), что и считают износом. В настоящее время единая теория изнашивания не разработана, как и отсутствуют алгоритмы синтеза (выбора) состава сплава для изнашиваемых деталей. Оптимизация состава и структурного состояния сплавов для деталей, работающих в конкретных условиях эксплуатации, требует большого количества экспериментов и времени. Износостойкость является не свойством (механическим, физическим или каким-либо другим), а интегральной характеристикой. Лабораторные и разные виды стендовых испытаний могут показать лишь тенденцию изменения качества новых материалов, разрабатываемых для железнодорожных колес и рельсов.

В металловедении существует фундаментальный закон, связывающий свойства сплавов с их составом и структурным состоянием, – закон Курнакова [1]. Одним из базовых положений этого закона является отсутствие разрыва функции в пределах одной фазовой области диаграммы состояния. В работах отечественных специалистов были показаны особенности действия закона Курнакова при формировании функций концентрационных зависимостей износостойкости и коэффициента трения сплавов эвтектических систем металл – фаза внедрения [2–8].

Были исследованы функции концентрационной зависимости износостойкости литых сплавов в условиях трения скольжения и в условиях абразивного изнашивания о полужакопленный абразив. Установлено наличие экстремумов на указанных функциях в области концентраций соответствующих составу эвтектических точек в исследованных системах сплавов. При изнашивании в условиях трения скольжения минимум суммарного износа пары трения соответствует области эвтектики. Функции изнашивания элементов пары трения имеют перегибы в области концентраций, соответствующих эвтектике. Функция концентрационной зависимости коэффициента трения скольжения имеет минимум в области эвтектики. Изменение условий изнашивания (скорости или давления) не изменяет общего вида функций. В работе А. А. Жукова с коллегами проведено обобщение ряда публикаций и представлены общие схемы функций концентрационных зависимостей механических свойств и износа сплавов эвтектических систем металл–фаза внедрения (рис. 1) [9]. Из приведенных материалов следует, что критическим точкам диаграммы состояния соответствуют экстремумы и перегибы на функциях свойств. Приведенные выше результаты существенно дополняют положения закона Курнакова, не изменяя его сути.

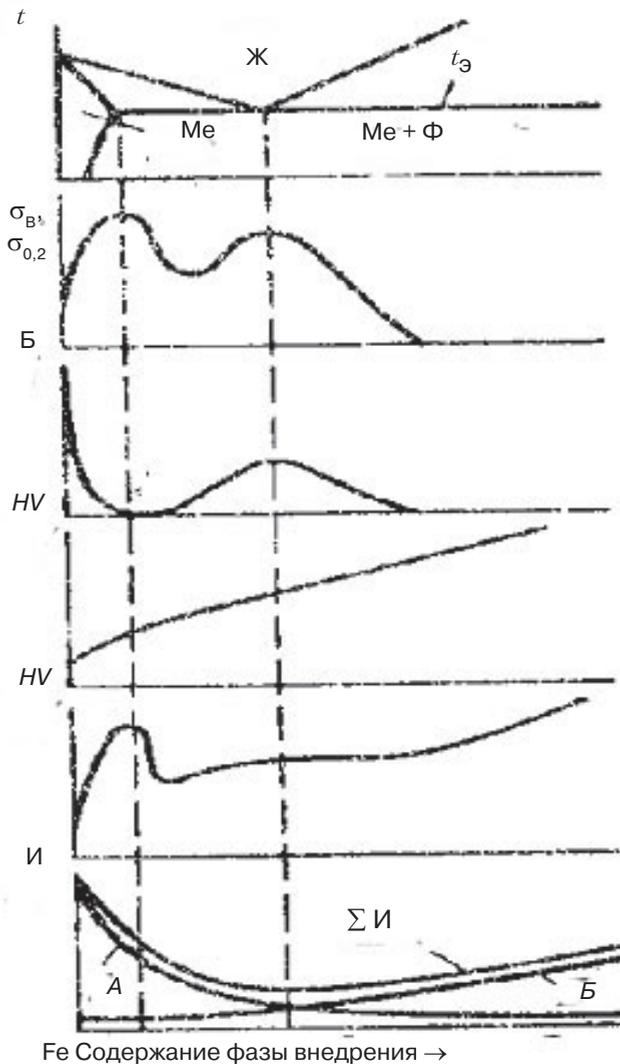


Рис. 1. Зависимость механических свойств и износа (И) сплавов квазибинарных эвтектических систем Me – фаза внедрения от их состава (схемы): А – износ образца; Б – износ контртела

Основной железнодорожного транспорта являются колесо и рельса. На рис. 2 приведена базовая схема мест и направлений механических нагрузок в зоне контакта пары колесо – рельса [10]. Эти усилия в совокупности со скоростью движения состава обуславливают значения параметров изнашивания указанных выше пар трения.

При эксплуатации колесо и рельса формируют пары трения: качения сформированной поверхностью катания (ободом) колеса и верхней плоскостью головки рельсы; скольжения сформированной боковой поверхностью головки рельсы и боковой поверхностью реборды колеса.

Следует отметить наличие и третьей пары трения в узле колесо – рельса – тормозная колодка. Таковой является пара трения скольжения (колесо – тормозная колодка).

При работе пары трения качения периодически возникают условия, характерные для трения скольжения (при торможении состава). Характерным и системным воздействием на поверхность катания колеса являются и ударные нагрузки, при прохождении колесом на скорости стыков рельс, крестовин и стрелок. Учитывая высокие нагрузки на оси пар колес и высокие скорости движения вагонов, можно считать, что такие нагрузки имеют ударный характер. Условия эксплуатации ужесточаются процессами атмосферной коррозии, наличием в зоне контакта пар трения пылевидных абразивных частиц (продуктов изнашивания самих пар трения и абразивных частиц, поступающих из окружающей среды) и температурными условиями эксплуатации от +50 °С и выше в экваториальных широтах, и до –70 °С в полярных широтах. Очевидно, что выработать единый алгоритм синтеза материала для железнодорожных колес и рельсов теоретически не представляется возможным. Моделирование процессов изнашивания при лабораторных испытаниях образцов новых колесных и рельсовых сталей мало отображает реальные условия эксплуатации и позволяет определять лишь тенденцию изменения износостойкости.

В работе Yoshinori Okagata, наряду с исследованиями механических аспектов контакта при взаимодействии железнодорожного колеса и рельсы, представлены результаты многолетних натурных и стендовых испытаний экспериментальных пар колесо – рельса с вариациями марок колесных и рельсовых сталей [10]. Составы сталей соответствовали требованиям международных стандартов: Европы – EN 13262; Северной Америки – AAR M-107/M-208 и Японии – JIS E 5402-1.

Эксплуатационные испытания провели с использованием рельсовой стали R260 по стандарту EN 13764-1. Содержание углерода в рельсовой стали было в пределах 0,6–0,82 %. Одна партия колес была изготовлена из стали ER7 по стандарту EN13262 и содержание углерода в стали составило $\leq 0,52$ %мас. Вторая партия колес изготовлена из стали SSV стандарта JIS E 5402-1 и содержание углерода в стали находилось в пределах 0,60–0,75 %мас. Твердость колес из стали ER7 находилась в пределах 247–282 HB. Данных о твердости колес из стали JIS, прошедших испытания, авторы не привели.

Для стендовых испытаний использовали рельсовые стали с содержанием углерода в пределах от 0,31 до 0,80 %мас. и колесные стали с содержанием углерода от 0,43 до 0,74 %мас. Стендовые испытания проводили на железнодорожном полотне, исполненного кольцом диаметром 24,5 м. Колеса изготовили по чертежу

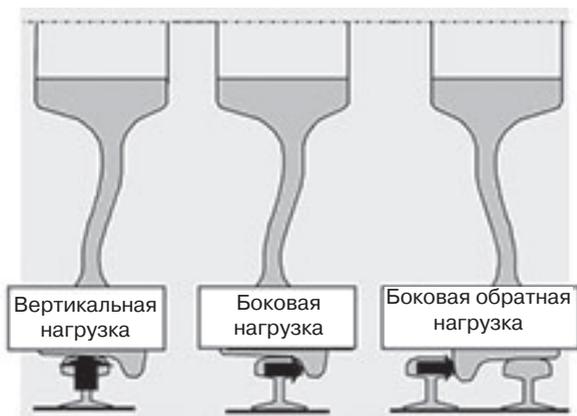


Рис. 2. Позиции и направления механических нагрузок в паре колесо – рельса при эксплуатации

Новые литые материалы

железнодорожного колеса с коэффициентом уменьшения размеров 3. По результатам испытаний автор сделал вывод, что повышение содержания углерода в колесной стали не повышает износ рельсов.

Авторами проведен анализ результатов исследований Yoshinori Okadata, на основе нашего понимания применения закона Курнакова. На рис. 3 (в оригинале рис. 13) приведены результаты исследований по влиянию углерода на вязкость разрушения (ударную вязкость) сталей. Даже при наличии разброса данных фиксируется закономерность снижения вязкости разрушения с увеличением содержания углерода в сталях. Результаты стендовых испытаний пар колесо – рельса приведены на рис. 4 (в оригинале рис. 11). В таблице авторами приведены расчетные данные величины износа (потеря массы) рельсов и колес при различном содер-

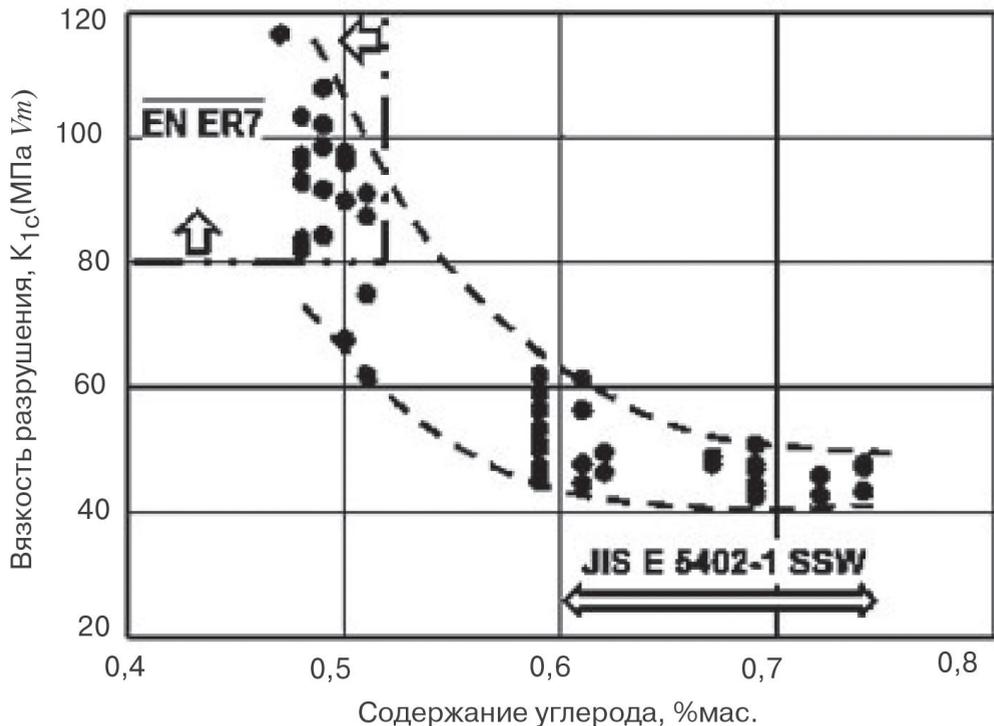


Рис. 3. Вязкость разрушения сталей в зависимости от содержания углерода [10]

Величина износа рельсов и колес при стендовых испытаниях*

Номер пар колесо – рельса	Содержание углерода в рельсовой стали, %мас.	Содержание углерода в колесной стали, %мас.	Потеря** массы рельсов, кг	Потеря** массы колес, кг
1	0,31	0,43	56	16
2	0,53	0,43	45	18
3	0,80	0,43	25	17
4	0,35	0,62	40	3
5	0,53	0,62	23	3
6	0,8	0,62	15	4
7	0,35	0,74	29	2
8	0,53	0,74	17	1
9	0,80	0,74	8	1

Примечания: *использованы данные публикации [10]; **величина износа (потеря массы) вычислена по материалам публикации [10]

Новые литые материалы

жании углерода в сталях и разных сочетаниях сталей в парах колесо – рельса после испытаний на стенде. Расчеты величины износа проведены по графическому материалу рис. 4.

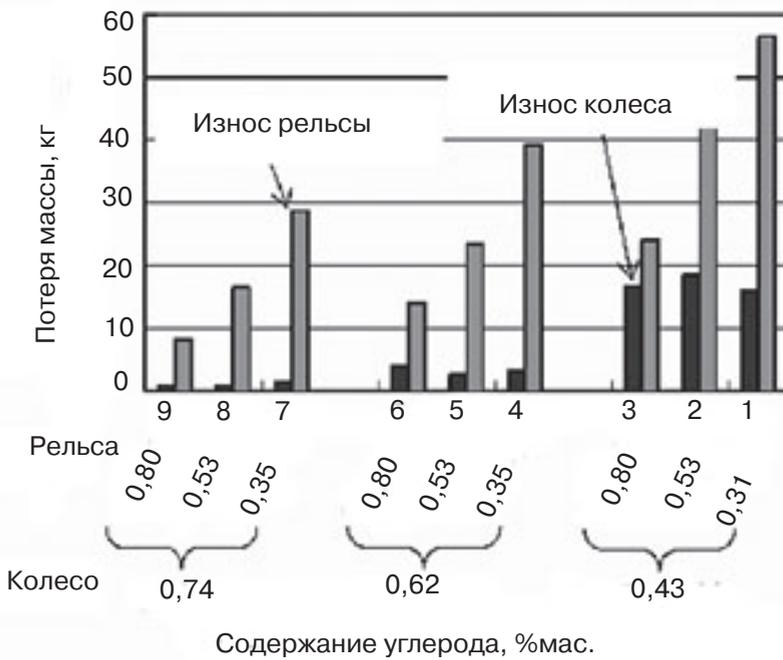


Рис. 4. Износ рельсов и колес [10]: 1–9 – номера пар колесо – рельса

На рис. 5 представлено сопоставление функций концентрационных зависимостей усредненных значений вязкости разрушения (ударной вязкости) среднеуглеродистых сталей и величины износа колес и рельсов из таких сталей с диаграммой состояния железо – углерод в стальной области концентраций углерода. Результаты стендовых испытаний показали, что повышение содержания углерода в рельсовой стали не оказывает влияния на повышение износа колес (рис. 5, в), а повышение углерода в колесной стали повышает износ рельсов при фиксированном углероде в рельсовой стали. Эксплуатационные испытания экспериментальных колес и рельсов проводили на железной дороге. Очевидно, что соотношение прямых участков железнодорожного полотна и криволинейных (повороты полотна) в пользу прямолинейных. На прямолинейных участках полотна доля износа при трении качении пары колесо – рельса в суммарном износе пары доминирует. На криволинейных участках полотна суммарный износ пары колесо – рельса существенно дополняется износом трения скольжения. Краткое описание видов изнашивания приведены выше. Изменение соотношения долей износа при трении качения и износа при трении скольжения в процессе работы пары железнодорожные колесо – рельса обуславливает изменение уровня износа элементов пары.

Вид функций вязкости разрушения и изнашивания колес и рельсов одинаков и функции характеризуются наличием нисходящей ветви, перегибом в области концентрации углерода, соответствующей составу эвтектоида, и выходом на горизонталь при содержании углерода более 0,8 %мас. Фактически рис. 5 является диаграммой состав – структура – свойство и позволяет связать состав рельсовых и колесных сталей по углероду, их структурное состояние, механические свойства (ударную вязкость) и величину износа элементов пары трения колесо – рельса, что подтверждает фундаментальность закона Курнакова и позволяет прогнозировать уровень и сочетание свойств и характеристик сплавов.

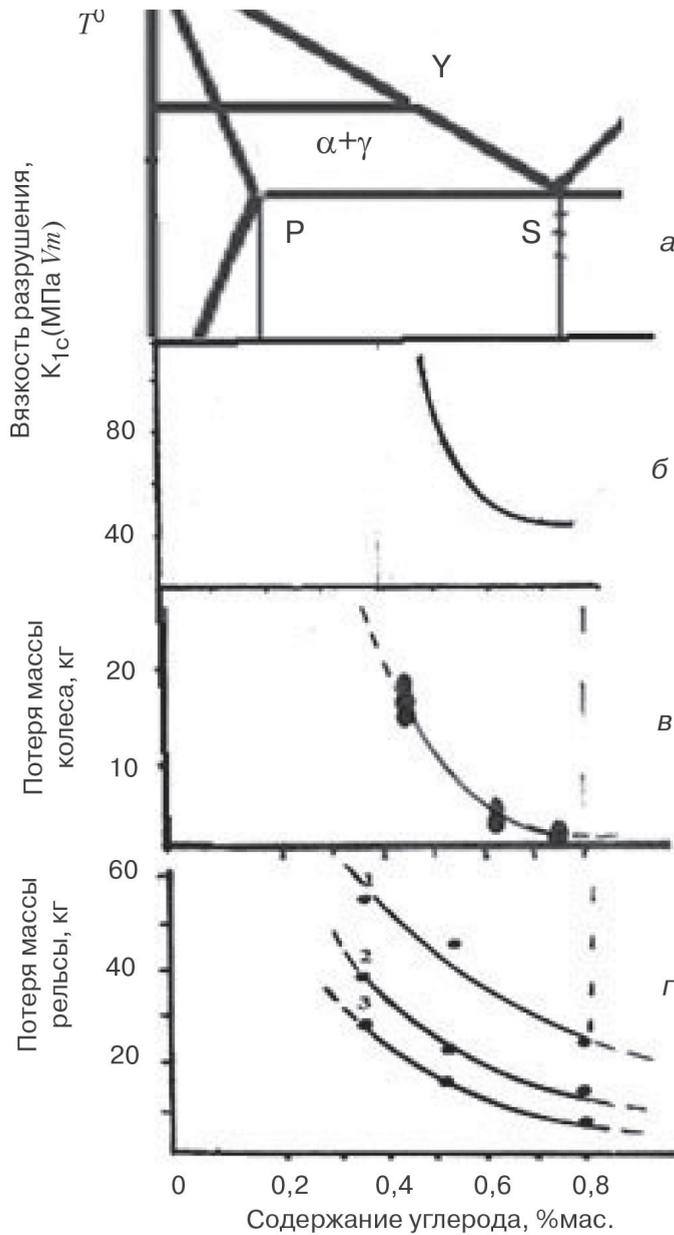


Рис. 5. Зависимость вязкости разрушения и износа сталей от содержания углерода (схемы): а – диаграмма железо – углерод; б – вязкость разрушения сталей (усредненное значение); в – влияние содержания углерода в колесной стали на износ колеса при содержании углерода в рельсовой стали 0,35; 0,51 и 0,8, %мас.; г – влияние содержания углерода в рельсовой стали на износ рельсы при различном содержании углерода в колесной стали: 1 – износ рельсы при содержании углерода в колесной стали 0,43 %мас.; 2 – износ рельсы при содержании углерода в колесной стали 0,62 %мас.; 3 – износ рельсы при содержании углерода в колесной стали 0,74 %мас.

Выводы

- Изменение содержания углерода в рельсовой стали в пределах от 0,35 до 0,8 % не оказывает заметного влияния на величину износа колес при изменении содержания углерода в колесной стали в пределах от 0,43 до 0,74 %.

- Увеличение содержания углерода в колесной стали в пределах от 0,43 до 0,74 % увеличивает изнашивание рельсы в одинаковой степени при содержании углерода в рельсовой стали в пределах от 0,35 до 0,8 %.
- Функции концентрационных зависимостей вязкости разрушения среднеуглеродистых сталей и функции изнашивания элементов пары трения колесо – рельса из таких сталей подобны.
- Перегиб концентрационных функций вязкости разрушения среднеуглеродистых сталей и износа элементов изнашиваемой пары колесо – рельса из таких сталей практически соответствует точке эвтектоида на диаграмме железо – углерод и обусловлен инверсией структуры сталей при переходе состава сталей из доэвтектоидной в заэвтектоидную область.
- Перегиб функций свойств среднеуглеродистых сталей в области эвтектоида соответствует положениям закона Курнакова.

Список литературы

1. Гуляев А. П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Тихонович В. И., Шурин А. К., Локтионов В. А., Панарин В. В. Исследование строения и износостойкости сплавов на основе железа с диборидом титана // В кн.: *Литые износостойкие материалы*. – К.: ИПЛ АН УССР, 1972. – С. 70–75.
3. Шурин А. К., Локтионов В. А., Тихонович В. И., Панарин В. В. Исследование строения и износостойкости сплавов на основе стали Х18Н9 с диборидом титана // *Проблемы трения и изнашивания: Респ. межведомственный науч.-техн. сборник*. – К., 1974. – Вып. 5. – С. 82–85.
4. Шурин А. К., Локтионов В. А., Тихонович В. И., Панарин В. В. Исследование строения и износостойкости сплавов железа с диборидом титана // В кн.: *Металловедение и термическая обработка сплавов*. – К.: ИПЛ АН УССР, 1974. – С. 91–94.
5. Локтионов В. А. Влияние диборида гафния на антифрикционные свойства сплавов на основе железа // В кн.: *Литые износостойкие материалы*. – К.: ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 76–81.
6. Тихонович В. И., Локтионов В. А. Диаграмма состав-износостойкость гетерогенных сплавов // В кн.: *Диаграммы состояния в материаловедении*. – К.: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 67–71.
7. Тихонович В. И., Локтионов В. А. Применение закона Курнакова при исследовании износостойких характеристик сплавов // *Диаграммы состояния металлических систем: Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания*. – М.: Наука, 1982. – С. 150–151.
8. Локтионов В. А., Конопелько Б. Б., Шевченко А. И. Исследование структуры и свойств сплавов Со–Cr–С // *Новые коррозионностойкие литейные материалы*. – К.: ИПЛ АН УССР, 1984. – С. 67–72.
9. Жуков А. А., Сильман Г. И., Фрольцов М. С. Износостойкость отливок из комплексно-легированных белых чугунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104 с.
10. Yoshinori Okagata. Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects // *Nippon steel & Sumitomo metal technical report*. – December 2013. – no. 105. – pp. 26–33.

Поступила 11.08.2018

References

1. Gulyaev, A. P. (1986) *Metal science*. Moscow: Metallurgy, 544 p. [in Russian].
2. Tikhonovich, V. I., Shurin, A. K., Loktionov, V. A., Panarin, V. V. (1972) Investigation of the structure and wear resistance of alloys based on iron with titanium diboride. Molded wear-resistant materials. K.: IPL AN USSR, pp. 70–75 [in Russian].
3. Shurin, A. K., Loktionov, V. A., Tikhonovich, V. I., Panarin, V. V. (1974) Investigation of the structure and wear resistance of alloys based on steel Cr18N9 with titanium diboride. Problems of friction and wear: Resp. interagency science-techn. collection, issue 5, pp. 82–85 [in Russian].
4. Shurin, A. K., Loktionov, V. A., Tikhonovich, V. I., Panarin, V. V. (1974) Investigation of the structure and wear resistance of iron alloys with titanium diboride. Metallurgy and heat treatment of alloys. K.: IPL AN USSR, pp. 91–94 [in Russian].
5. Loktionov, V. A. (1975) Effect of hafnium diboride on the antifriction properties of iron-based alloys. Molded wear-resistant materials. K.: IPL AN USSR, pp. 76–81 [in Russian].

6. *Tikhonovich, V. I., Loktionov, V. A. (1980) The composition-wear-resistance diagram of heterogeneous alloys. Diagrams of state in materials science. K.: IPL AN USSR, pp. 67–71 [in Russian].*
7. *Tikhonovich, V. I., Loktionov, V. A. (1982) Application of Kurnakov's law in the study of wear-resistant characteristics of alloys. Diagrams of the state of metallic systems: Tez. Reports of the Y All-Union Conference. Moscow: Science, pp. 150–151 [in Russian].*
8. *Loktionov, V. A., Konopelko, B. B., Shevchenko, A. I. (1984) Investigation of the structure and properties of Co–Cr–C alloys. New corrosion-resistant casting materials. K.: IPL AN USSR, pp. 67–72 [in Russian].*
9. *Zhukov, A. A., Silman, G. I., Froltsov, M. S. (1984) Durability of castings from complex-alloyed white cast irons. Moscow: Mechanical Engineering, 104 p. [in Russian].*
10. *Yoshinori Okagata (2013) Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects. Nippon steel & Sumitomo metal technical report, no. 105, pp. 26–33 [in English].*

Received 11.08.2018

В. А. Локтіонов-Ремізовський, канд. техн. наук, пров. наук. співр.,

e-mail: loktionov@ptima.kiev.ua

Н. В. Кір'якова, гол. технолог

В. Г. Новицький, канд. техн. наук, пров. наук. співр.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ВПЛИВ ВУГЛЕЦЮ В СТАЛЯХ НА ЗНОШУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС І РЕЙОК

На основі аналізу наукових публікацій вітчизняних і закордонних авторів та результатів власних досліджень встановлено, що в системі залізо – вуглець, в сталевому діапазоні вмісту вуглецю 0,35–0,8 %, функції залежності зносу залізничних коліс і рейок та в'язкості руйнування середньовуглецевих сталей подібні, мають низхідну гілку, перегин в області 0,8 % вуглецю і виходять на експоненту при вмісті вуглецю більше 0,8 %, що відповідає положенням закону Курнакова.

Ключові слова: сталь, колесо, рейка, вуглець, руйнування, знос.

V. A. Loktionov-Remizovsky, *Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher,*

e-mail: loktionov@ptima.kiev.ua

N. V. Kiryakova, *Chief Technologist*

V. G. Novitsky, *Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher*

Physico-technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

EFFECTS OF CARBON IN STEELS ON WEAR OF RAILWAY WHEELS AND RAILS

Based on the analysis of scientific publications of domestic and foreign authors and the results of own research, it has been established that in the iron-carbon system, in the steel range of the carbon content of 0.35–0.8 %, the functions of depreciation of railway wheels and rails and the fracture toughness of mildly-carbon steels are similar, have a descending branch, an inflection in the region of 0.8 % carbon, and go to the exponent with a carbon content of more than 0.8 %, which corresponds to the Kurnakov's law.

Keywords: steel, wheel, rail, carbon, destruction, wear.