

## Анотація

Рудюк О. С., Азаркевич А. А., Лебедєв О. Д., Попов Є. С., Гончаренко Є. В., Труфанова О. І.

Підвищення якості та розширення сортаменту загартованих рейок із конвертерної сталі

Представлено вимоги до якості рейок, основні елементи обладнання та технології поверхневого гартування рейок типів P65 і UIC60 зі сталі марки K76F в рейкогартівній машині рейкобалкового цеху ПАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ». Проаналізовано відмінність рейок типів P65 і UIC60. Показано, що найбільшу твердість по перетину загартованого шару головки мають рейки, загартовані по поверхні катання та бічним граням головки. Розроблено технологію гартування рейок типу P65 по поверхні катання та бічним граням головки і рейок типу UIC60 по поверхні катання.

## Ключові слова

сталь, рейки, тип, гартування, водоповітряна суміш, повітря, самовідпуск, твердість, механічні властивості

## Summary

Rudyuk A. S., Azarkevich A. A., Lebedev A. D., Popov Ye. S., Goncharenko Ye. V., Trufanova O. I.

Quality improving and widening of the range of hardened rails made of converter steel

There are presented the requirements for rails quality, main elements of equipment and technologies of surface hardening of rails of P65 and UIC60 types made of steel grade K76F in rail hardening machine of rail-beam shop at «MC «AZOVSTAL» PJSC. The difference between P65 and UIC60 types of rails was analyzed. It was shown that rails hardened along rolling surface and head sides edges are the hardest at head hardened layer cross-section. There was developed a technology for hardening of P65 rails along rolling surface and head sides edges and UIC60 rails along rolling surface.

## Keywords

steel, rails, type, hardening, water-air mixture, air, self-tempering, hardness, mechanical characteristics

Поступила 01.06.13

УДК 669.14:672.1

С. Я. Шипицин, Ю. З. Бабаскин, В. П. Короленко, Н. Я. Золотарь

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Новые рельсовые и колесные стали для железнодорожного транспорта недалекого будущего\*

Разработаны высокопрочные рельсовые и колесные перлитные стали с дисперсионным упрочнением наноразмерными, некогерентными, внутризеренными нитридами ванадия, которые превышают стандартные на 100-150 МПа по прочности, в 2 раза по циклической трещиностойкости, почти в 2 раза по износостойкости в условиях трения скольжением и качением, на 100 °С по теплостойкости и пониженной в 2 раза склонностью к образованию хрупких поверхностных мартенситных слоев. Это прогнозирует повышение не менее, чем в 2 раза надежности и долговечности рельсов и колес, в том числе для условий повышенных скоростей движения и грузоподъемности подвижного состава. В ДП «Укрзалізниця» представлены предложения о проведении опытно-промышленных испытаний сталей.

**Ключевые слова:** рельсовые и колесные стали, дисперсионное нитридное упрочнение, механические и функциональные свойства, износ

**Н**адежность и эксплуатационный ресурс железнодорожных рельсов и колес массового производства, которые находятся в наиболее жестких условиях эксплуатации и главным образом определяют

технично-экономические показатели эффективности работы железнодорожного транспорта, уже не отвечают современным требованиям повышенных скоростей движения и грузоподъемности подвижного

\*Исследования выполнены в рамках проекта 7.8 Программы «Ресурс» НАН Украины «Повышение эксплуатационной надежности и долговечности комплекса «железнодорожные рельсы – колеса – тормозные колодки» за счет улучшения механических и триботехнических свойств рельсовых и колесных сталей и колодочного чугуна нового поколения». Научный руководитель проекта академик НАН Украины В. Л. Найдек

состава. Это относится к Украине, странам СНГ и дальнего зарубежья. Главной причиной является применение нелегированных и низколегированных высоко- и среднеуглеродистых перлитных сталей для массового производства рельсов и колес. В частности для рельсов, – стали с содержанием (%) 0,71-0,82 C, 0,75-1,05 Mn, 0,2-0,8 Si, 0,03-0,15 V, 0-0,025 Ti, до 0,6 Cr (ГОСТ Р51685 Россия), а для колес – стали типа 48ГФ и 60Г (ГОСТ 10791-89, Россия), LG61 (60Г) (ТУ TZL-02-99), В1-В7 (40Г-80Г) Британского стандарта BS5892), ER6-ER9 (48Г-60Г) Европейского стандарта PR EN1326: 2000; классов L, A, B, C (47Г-70Г) спецификаций М-107-84 и М-208-84 Американской ассоциации железнодорожных путей.

В сталях этих классов повышение статической прочности за счет увеличения содержания углерода сопровождается снижением циклической прочности, статической и циклической вязкости разрушения, пластичности, контактной выносливости [1-3]. Кроме того, у них недостаточная усталостная и термоусталостная прочность, теплостойкость, хладостойкость, они склонны к образованию аустенитных слоев с последующим  $\gamma \rightarrow M$  превращением при локальном нагреве поверхностных зон до температур выше  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  при скольжении и буксовании колеса. Такой уровень свойств обуславливает формирование на рельсах и колесах таких дефектов, как хрупкое макроразрушение, выкрашивание металла по боковой рабочей поверхности головки рельса, отслоение и выкрашивание металла на поверхности качения рельса и колеса, волнообразная деформация головки рельса и др.

Повышение металлургического качества стандартных рельсовых и колесных сталей, в частности уменьшение загрязненности неметаллическими включениями и вредными примесями, повышение дисперсности микроструктуры и снижение уровня химической и структурной неоднородности за счет различных видов внепечной обработки и непрерывной разливки, а также усовершенствование термического упрочнения проблем коренного одновременного повышения статической и циклической прочности, тепло- и термостойкости, хладостойкости, статической и циклической вязкости разрушения решит проблему только частично, потому что практически все это не влияет на тепло- и термостойкость сталей, которые определяют уровень циклической прочности, усталостной выносливости и износостойкости локальных поверхностных слоев металла в зонах контакта колесо-рельс, колесо-колодка, которые циклически нагреваются до температур 500-800 °С и выше.

В экономически развитых странах наметили путь по замене перлитных высоко- и среднеуглеродистых сталей на низкоуглеродистые стали со структурой нижнего бейнита и даже на жаропрочные сплавы на никелевой основе [4, 5]. Эти стали, например рельсовая сталь фирмы Nippon Steel Corp. (Япония) с содержанием (%): 0,15-0,45 C; 0,15-0,20 Si; 0,3-2,0 Mn; 0,5-3,0 Cr; 0,1-0,6 Mo; 0,05-0,40 Ni; 0,03-0,30 V; 0,05-0,50 Cu; 0,01-0,05 Ti; 0,01-0,05 Nb и сталь для колесного обода RXT (Великобритания) с содержанием (%): 0,25 C; 1,1 Si; 1,1 Mn; Cr + Mo + Ni = 1,8; 0,05 V;

0,30 Cu, а также никелевые сплавы имеют высокую прочность, износостойкость, тепло- и термостойкость, не склонны к  $\alpha(P) \rightarrow \gamma \rightarrow M$  превращениям. Но, учитывая высокую себестоимость легирования и довольно большой объем производства и применения рельсов и колес в Украине и странах СНГ, такое направление у нас является нереальным.

В России и Украине до настоящего времени ведущие материаловедческие организации, в частности им. Байкова РАН, ФГУП ЦНИИЧермет, ФГУП ВНИИЖТ, ИЧМ НАН Украины и предприятия-производители рельсов (ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат», ПАО «МК «Азовсталь») и колес (ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат», ПАО «Интерпайп сталь» и ПАО «Интерпайп НТЗ») в качестве путей повышения эксплуатационных характеристик стандартных перлитных сталей рассматривают уже давно известную технологию микролегирования ванадием, а также методы термического и термомеханического упрочнения [6].

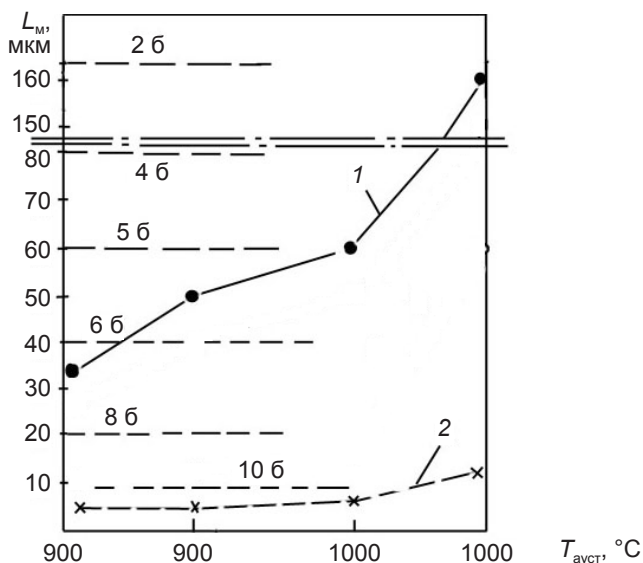
Микролегированию сталей азотом и нитридообразующими элементами ванадием, ниобием, титаном, алюминием в последние годы уделяют пристальное внимание [7, 8]. При этом решается задача диспергирования зерна аустенита и перлита, а также весьма ограниченного и нестабильного повышения дисперсионного упрочнения сталей.

Системные фундаментальные исследования в течение нескольких десятилетий в ФТИМС НАН Украины и накопленный опыт промышленного применения показали, что технология микролегирования азотом и ванадием является методом коренного повышения всего комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств литейных и деформируемых углеродистых, низколегированных и легированных сталей различного функционального назначения, в том числе средне- и высокоуглеродистых [9]. Авторами впервые установлено, что необходимым условием эффективного микролегирования азотом и ванадием являются не только оптимизация процесса дисперсионного нитридного упрочнения, но и влияние азота и нитридной фазы на процессы кристаллизации и связанные с ней развитие первичной химической и структурной неоднородности металла, размер зерна аустенита, термодинамические и кинетические параметры перлитного, бейнитного и мартенситного превращений, морфология карбидных фаз при распаде пересыщенного твердого раствора аустенита и феррита, развитие вторичной химической и структурной неоднородности, в том числе зернограничной. Наиболее важным преимуществом разработанных в ФТИМС НАН Украины сталей, микролегированных азотом и ванадием, является одновременное существенное повышение их статической и циклической прочности, статической и циклической вязкости разрушения, тепло- и термостойкости, износостойкости, прокаливаемости, свариваемости, снижение или полное устранение склонности к естественному, деформационному и тепловому охрупчиванию.

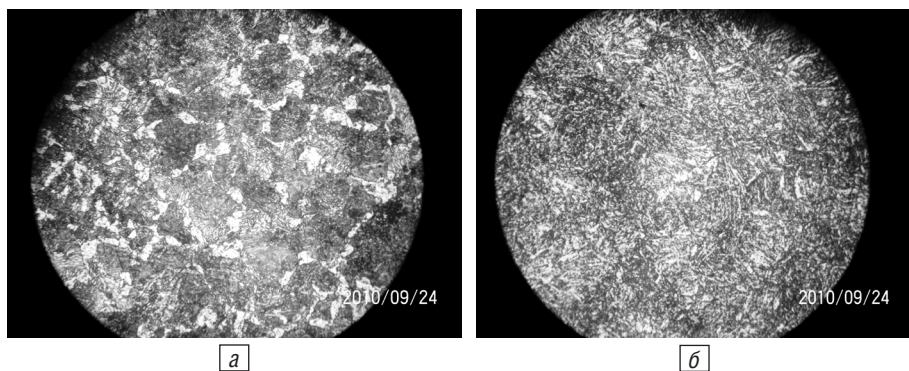
Выполненные исследования показали, что такой же результат достигают и на высокоуглеродистых

рельсовых и колесных сталях. Так, за счет диспергирования аустенитного зерна (рис. 1), уменьшения химической и структурной неоднородности (рис. 2), дополнительного дисперсионного упрочнения наноразмерными внутризеренными частицами нитрида ванадия обеспечивается существенное повышение прочности сталей без уменьшения их пластичности и вязкости (таблица). Этот результат достигают при уменьшении на 0,07-0,10 % содержания углерода в сталях.

Дисперсионное нитридное упрочнение обеспечивает повышение почти на 100 °С теплостойкости сталей (рис. 3). Это, в свою очередь, является главной причиной повышения не менее чем в 2 раза изно-



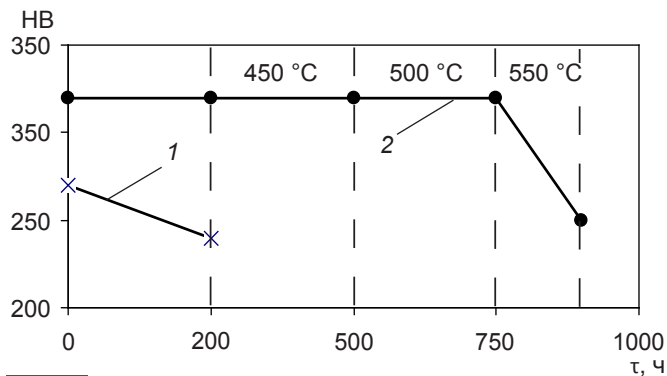
**Рис. 1.** Влияние температуры аустенизации ( $T_{ауст}$ ) на размер аустенитного зерна по длине игл мартенсита ( $L_m$ ) и по баллу зерна по ГОСТ 5639-82 стандартной (1) и с нитридами VN (2) рельсовых сталей



**Рис. 2.** Микроструктура ( $\times 250$ ) колесных сталей: стандартной, нормализованной от 900 °С и отпущенной при 450 °С (а); с нитридами VN, нормализованной от 1000 °С и отпущенной при 625 °С (б)

### Механические свойства рельсовых и колесных сталей после нормализации и отпуска

Сталь	Температура, °С		$\sigma_b$	$\sigma_t$	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
	нормализации	отпуска					
Рельсовая стандартная	900	450	1082	816	20	11	43
Рельсовая с VN	1000	600	1118	937	19	10	42
Колесная стандартная	860	450	980	820	20	49	25
Колесная с VN	1000	600	1080	950	20	49	30



**Рис. 3.** Влияние температуры и продолжительности провоцирующих отпусков на твердость стандартной (1) и с VN (2) колесных сталей

состойкости сталей при сухом трении скольжением. Так, при эксперименте по схеме диск (контртело) – палец (образец) при скорости перемещения образца по контртелу 15 м/с и давлению 0,196 МПа потеря массы образца на длине пути трения 10 км для стандартной рельсовой стали составила 0,2493 г при ее закалке на мартенсит и 0,0655 г – при нормализации на перлит. В то же время, эти показатели для стали с VN были на уровне 0,0631 г и 0,0358 соответственно. Относительная износостойкость в первом случае составила 3,95, а во втором – 1,83. При этом существенного изменения коэффициента трения не отмечено, что важно для условий эксплуатации комплекса рельс-колесо.

Циклическую трещиностойкость сталей определяли по методике и на оборудовании Физико-механического института НАН Украины (д-р техн. наук, проф. О. П. Осташ). По экспериментальным диаграммам циклической трещиностойкости определяли характеристики:  $\Delta K_{th}$  – пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН), ниже которого трещина не растет, и  $\Delta K_{fc}$  – критическое значение размаха КИН, выше которого трещина теряет устойчивость и начинает развиваться спонтанно, где КИН:  $K_1 = f_1(P, a, Y)$  – параметр, учитывающий приложенные к образцу нагрузки ( $P$ ), размеры трещины ( $a$ ), геометрию тела ( $Y$ ) и описывающий поле напряжений и деформации у вершины трещины нормального отрыва.

Для нормализованных колесных сталей получены следующие результаты: стандартной –  $K_{th} = 6,8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ;  $\Delta K_{fc} = 60 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ; стали с VN –  $K_{th} = 10,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ ;  $\Delta K_{fc} = 115 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$ . То есть, дисперсионное нитридное упрочнение почти в 2 раза повышает характеристики циклической трещиностойкости стали, непосредственно характеризующие ее усталостную выносливость, которая в значительной степени определяет устойчивость колес к разрушению поверхности качения.



Контактно-усталостную повреждаемость поверхности качения проводили в ФМИ НАН Украины на модельных образцах колеса (диаметр – 40 мм, толщина – 4 мм) и рельса (длина – 500 мм, ширина – 4 мм, высота – 16 мм) на специальном стенде конструкции ФМИ при нагрузке на колесо 250 кг и напряжении в зоне контакта пары колесо-рельс 105 МПа. Эти исследования дают возможность получать повреждения поверхностей качения модельных образцов, аналогичные наблюдаемым на поверхности качения реальных железнодорожных колес.

Установлено, что контактно-усталостная повреждаемость поверхности качения модельного образца в стали с VN более чем в 2 раза меньше, чем в стандартной колесной стали (рис. 4). Так, суммарное количество выщербин, которые образуются как вследствие расслоения металла, так и питингообразования, в стали с VN достигает 15-20 мм<sup>2</sup>, а в стандартной колесной стали – 33-44.

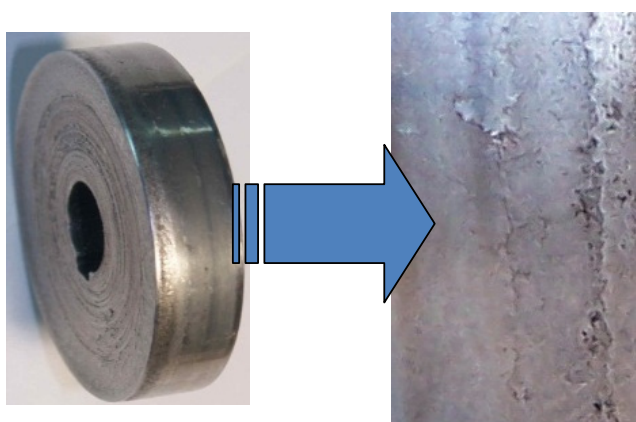


Рис. 4. Контактно-усталостное повреждение поверхности модельного колеса

Также установлено, что дисперсионное нитридное упрочнение почти в 2 раза уменьшает склонность стали к образованию хрупких мартенситных поверхностных слоев при ненормативном локальном разогреве металла выше температур  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  (юз, пробуксовка). При нагревании образцов со скоростью около 40 °C/c (в расплаве алюминиевого сплава АК-12) до 800 °C и следующей закалке в воде ширина поверхностной мартенситной зоны в стандартной колесной стали составила 0,6 мм, а в стали с VN – 0,33 мм. Это связано с повышением температур  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  твердорастворимым азотом и снижением нитридванадиевой фазой, не растворившейся при кратковременном нагреве, устойчивости к  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению в перлитной области.

На основе результатов исследований разработаны технические требования и технические условия для рельсовых и колесных сталей с нитридным упрочнением.

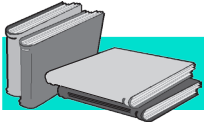
## Выводы

1. Установлено, что дисперсионное упрочнение наноразмерными, некогерентными, внутризеренными нитридами ванадия обеспечивает повышение

на 100-150 МПа статической прочности рельсовых и колесных перлитных высокоуглеродистых сталей без уменьшения их пластичности и вязкости, увеличение до двух раз циклической трещиностойкости, в 2-4 раза износостойкости в условиях трения скольжением и качением, подъем на 100 °C теплостойкости, уменьшение в 2 раза склонности к образованию поверхностных хрупких мартенситных слоев. Результаты исследований показывают бесспорные актуальность и перспективность применения рельсовых и колесных сталей с нитридным упрочнением для повышения в 2-3 раза надежности и эксплуатационного ресурса рельсов и колес, в том числе для условий повышенных скоростей движения и грузоподъемности подвижного состава.

2. Полученные результаты дают возможность надеяться убедить Министерство инфраструктуры Украины и Государственную администрацию железнодорожного транспорта Украины (ГП «Укрзалізниця») как главных государственных «Заказчиков» и директивных ведомств по железнодорожному транспорту в необходимости проведения опытно-промышленных работ и дальнейшего освоения производства сталей с нитридным упрочнением для железнодорожных рельсов и колес нового поколения. Для этого сотрудники ФТИМС НАН Украины подготовили и направили в ГП «Укрзалізниця» предложения по включению в Программу «Создание высокопрочной металлопродукции для грузовых вагонов нового поколения с повышенными эксплуатационными характеристиками» (письмо № 87/454-6 от 20.10.2011 г.), а также проект Программы по теме «Разработка и внедрение высокопрочных сталей с нитридным упрочнением для железнодорожных колес, осей, сортового, фасонного, листового проката и ответственного вагонного литья, применение которых обеспечит уменьшение на 22-34 % общей массы грузовых вагонов, повышение в 2-3 раза надежности и долговечности их основных узлов и деталей (тележка, автосцепное устройство, колесо) и уменьшение на 15-20 % общих затрат на обслуживание, ремонт и обновление вагонов» (письмо № 87/562-6 от 05.12.2011 г.).

3. Современное производство рельсов и колес в Украине основано на многотоннажной выплавке сталей. В частности, в ПАО «Интерпайп сталь», основном производителе заготовок колесных сталей, это плавки в электропечах емкостью 190 т, а в ПАО «МК «Азовсталь» (производство рельсов) – 350-тонная плавка в конвертерах. Эти предприятия, очевидно, не рискнут без веских оснований проводить опытно-промышленные плавки рельсовой и колесной сталей с нитридным упрочнением. Такими основаниями могут быть только положительные результаты стендовых и натурных испытаний рельсов и колес. А для этого необходима возможность изготовления небольших партий опытных рельсов и колес на экспериментальном участке, который необходимо создать на предприятиях, изготавливающих рельсы и колеса, либо на базе одного из институтов НАН Украины, например в Институте черной металлургии НАН Украины.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Освоение производства новых видов цельнокатаных колес для железнодорожного транспорта / В. С. Маркин, А. А. Шишов, А. В. Сухов и др. // *Сталь*. – 2007. – № 9. – С. 79-82.
2. Влияние неоднородности структуры и неметаллических включений на вязкость разрушения колесной стали / М. Е. Гетманова, А. С. Гриншпон, А. В. Сухов и др. // *Там же*. – 2007. – № 9. – С. 96-99.
3. Втомна довговічність сталей залізничних коліс / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2007. – № 3. – С. 93-102.
4. *Кассиді Ф. Д.* Леговані метали можуть подовжити життя коліс // *Залізничний транспорт України*. – 2002. – № 5. – С. 69-70.
5. *Poshman J., Heermant C.* Новые марки колесной стали // *ЖДМ*. – 2004. – № 1. – С. 47-56.
6. Микролегирование колесной стали карбидообразующими элементами / А. М. Арсенкин, А. Ю. Далматов, К. Ю. Демин и др. // *Сталь*. – 2007. – № 9. – С. 29-30.
7. *Узлов И. Г., Узлов К. И., Перков О. Н.* Высокопрочные железнодорожные колеса из микролегированной ванадием стали // *Металлургическая и горнорудная пром-сть*. – 2004. – № 1. – С. 84-88.
8. Умовля ефективного впливу нітридних і карбонітридних фаз на измельчение структуры конструкционных перлитных сталей / Н. Г. Шапошников, А. А. Конов, Б. М. Могутов и др. // *Сталь*. – 2004. – № 7. – С. 84-87.
9. *Бабаскин Ю. З., Шипицын С. Я., Кирчу И. Ф.* Конструкционные и специальные стали с нитридной фазой. – К.: *Наук. думка*, 2005. – 371 с.

### Анотація

*Шипіцин С. Я., Бабаскін Ю. З., Короленко В. П., Золотар Н. Я.*  
Нові рейкові та колісні сталі для залізничного транспорту  
недалекого майбутнього

*Розроблено високоміцні рейкові та колісні перлітні сталі з дисперсійним зміцненням нанорозмірними, некогерентними, внутрішньозеренними нітридами ванадію, які перевищують стандартні на 100-150 МПа по міцності, в 2 рази по циклічній тріщиностійкості, майже в 2 рази по зносостійкості в умовах тертя ковзанням і коченням, на 100 °С по теплостійкості та зниженою в 2 рази схильністю до утворення крихких поверхневих мартенситних шарів. Це прогнозує підвищення не менш ніж у 2 рази надійності та довговічності рейок і коліс, в тому числі для умов підвищених швидкостей руху і вантажопідйомності рухомого складу. В ДП «Укрзалізниця» представлено пропозиції щодо проведення дослідно-промислових випробувань сталей.*

### Ключові слова

*рейкові та колісні сталі, дисперсійне нітридне зміцнення, механічні та функціональні властивості, знос*

### Summary

*Shipitsin S. Ya., Babaskin Yu. Z., Korolenko V. P., Zolotar N. Ya.*  
New rail and wheel types of steel for the rail transport system  
of the near future

*There are developed the high-strength rail and wheel pearlite steel with nanoscale dispersion hardening, incoherent, intragranular nitrides of vanadium that exceed the standard on the strength of 100-150 MPa, a 2-fold cyclic crack, almost 2 times the wear resistance to sliding friction and rolling on heat resistance at 100 °C and 2-fold reduced tendency to form a brittle martensitic surface layer. This predicts increasing the reliability and durability of the rails and the wheels not less than twice, including conditions for high speeds and load-carrying capacity of rolling stock. In «Ukrzaliznytsya» are presented proposals for pilot testing of steel.*

### Keywords

*steel, rails, type, hardening, water-air mixture, air, self-tempering, hardness, mechanical characteristics*

Поступила 07.06.13