

УДК: 621.017:669.14.018.294.083.133

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280519.16.430

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ ДЕФЕКТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ОПЫТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

БАБАЧЕНКО А. И.^{1*}, *д-р техн. наук*,
КОНОНЕНКО А. А.², *канд. техн. наук*,
ПОДОЛЬСКИЙ Р. В.³,
ШПАК Е. А.⁴

^{1*} Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 713-59-51, отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6707-0877

Аннотация. Постановка проблемы. Разработка химического состава сталей для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их ресурса в различных условиях эксплуатации. **Методика.** В лабораторных условиях в индукционной печи были выплавлены слитки малого объема (до 10 кг) диаметром 80 мм с повышенным содержанием марганца и кремния (сталь «К»), а также с системой Al–Ti–N на основе стали марки «2» (ДСТУ ГОСТ 10791-2016) и стали «К». Содержание углерода в опытных сталях было до 0,6 % масс. Плавка «Т» являлась сравнительной в данных исследованиях и по своему химическому составу соответствуют требованиям ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Все плавки были выплавлены в одинаковых условиях. Прокаливаемость стали определяли методом торцевой закалки (метод Джомини) по ГОСТ 5657. **Результаты.** Исследованы пути повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес. Разработаны системы легирования с принципиально новым способом упрочнения стали для железнодорожных колес - тугоплавкой дисперсной фазой совместно с твердорастворным упрочнением. Установлено положительное влияние опытного химического состава с системой Al–Ti–N на показатели вязкости и пластичности при нескольких более низких показателях прочности и твердости по сравнению с высокопрочной сталью марки Т, нормируемой ДСТУ ГОСТ 10791–2016. Показано, что опытные стали 2+(Al–Ti–N) и К+(Al–Ti–N) имеют на 20...30 % меньшую зону структурных изменений, что свидетельствует о более высокой стойкости к образованию дефектов термического происхождения на поверхности катания железнодорожных колес. **Научная новизна.** Установлено влияние химического состава опытных сталей на прокаливаемость. **Практическая значимость.** Обоснованы составы сталей с новой системой микролегирования для железнодорожных колес с высокой стойкостью к образованию выщербин и белых слоев на поверхности катания.

Ключевые слова: железнодорожные колеса; химический состав; микролегирование; чувствительность к термическому воздействию; прокаливаемость

ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ ДО УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТЕРМІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ ДОСЛІДНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

БАБАЧЕНКО О. І.^{1*}, *д-р техн. наук*,
КОНОНЕНКО Г. А.², *канд. техн. наук*,
ПОДОЛЬСКИЙ Р. В.³,
ШПАК О. А.⁴

^{1*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 713-59-51, відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net; ORCID ID: 0000-0002-6707-0877

Анотація. Постановка проблеми. Розроблення хімічного складу сталей для залізничних коліс, що забезпечує підвищення їх ресурсу в різних умовах експлуатації. **Методика.** У лабораторних умовах в індукційній печі були виплавлені злитки малого об'єму (до 10 кг) діаметром 80 мм із підвищеним вмістом марганцю і кремнію (сталь «К»), а також із системою Al–Ti–N на основі сталі марки «2» (ДСТУ ГОСТ 10791-2016) та сталі «К». Вміст вуглецю в дослідних сталях був до 0,6 % мас. Плавка «Т» була порівняльною в даних дослідженнях і за своїм хімічним складом відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Всі плавки виплавлені в однакових умовах. Прогартуваність сталі визначали методом торцевого гарту (метод Джоміні) за ГОСТ 5657. **Результати.** Досліджено шляхи підвищення експлуатаційної стійкості залізничних коліс. Розроблено системи легування з принципово новим способом зміцнення сталі для залізничних коліс - тугоплавкою дисперсною фазою спільно з твердорозчинним зміцненням. Установлено позитивний вплив дослідного хімічного складу із системою Al–Ti–N на показники в'язкості і пластичності за дещо нижчих показників міцності і твердості порівняно з високоміцною сталлю марки Т, нормованої ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Показано, що дослідні сталі 2+(Al–Ti–N) і К+(Al–Ti–N) мають на 20...30 % меншу зону структурних змін, що свідчить про більш високу стійкість до утворення дефектів термічного походження на поверхні кочення залізничних коліс. **Наукова новизна.** Установлено вплив хімічного складу дослідних сталей на прогартуваність. **Практична значимість.** Обґрунтовано склади сталей з новою системою мікролегування для залізничних коліс із високою стійкістю до утворення вищербин і білих шарів на поверхні кочення.

Ключові слова: залізничні колеса; хімічний склад; мікролегування; чутливість до термічного впливу; прогартуваність

EVALUATION OF THE TENDENCY TO THE FORMATION OF DEFECTS OF THERMAL ORIGIN OF EXPERIMENTAL STEELS FOR RAILWAY WHEELS

BABACHENKO O.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.)*,
KONONENKO H.A.², *Cand. Sc. (Tech.)*,
PODOLSKYI R.V.³
SHPAK O. A.⁴

^{1*} Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Department of heat treatment of metals, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Hagarina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 713-59-51, Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of NAS of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net; ORCID ID: 0000-0002-6707-0877

Abstract. Problem statement. The development of the chemical composition of steels for railway wheels, which increases their life in various operating conditions. **Methods.** Ingots of small volume (up to 10 kg) with a diameter of 80 mm with a high content of manganese and silicon (steel "K"), as well as with the Al–Ti–N system based on the steel grade "2" (DSTU GOST 10791-2016) and steel "K" were melted in induction furnace under laboratory conditions. The carbon content in the experimental steels was up to 0.6 % of the mass. Melting of the steel "T" was comparative in these studies and in its chemical composition corresponds to the requirements of DSTU GOST 10791-2016. All meltings were made under the same conditions. Steel hardenability was determined by Jeminy test according to GOST 5657. **Results.** Ways of increasing the operational durability of railway wheels are investigated. Alloying systems are

developed with a fundamentally new method of steel hardening for railway wheels – a refractory dispersed phase together with solid solution hardening. The positive effect of the experimental chemical composition with the Al–Ti–N system on the viscosity and ductility indicators with a slightly lower strength and hardness ones compared with high-strength steel grade T, standardized by DSTU GOST 10791-2016, is established. It is shown that the experimental steels 2+ (Al–Ti–N) and K + (Al–Ti–N) have a zone of structural changes less by 20...30 % that indicates a higher resistance to the formation of defects of thermal origin on the rolling surface of railway wheels. **Scientific novelty.** The influence of the chemical composition of the experimental steels on the hardenability is established. **Practical significance.** The compositions of steels with a new microalloying system for railway wheels with high resistance to the formation of shelled treads and white layers on the rolling surface are substantiated.

Keywords: railway wheels; chemical composition; microalloying; sensitivity to thermal effects; hardenability

Введение. Высокие требования, предъявляемые к эксплуатационной надежности и долговечности железнодорожных колес, определяют их ответственным назначением в структуре подвижного состава, непосредственным влиянием на безопасность движения и сложными специфическими условиями работы. Основными видами эксплуатационных дефектов колес являются: износ (прокат) поверхности катания; дефекты термического и термомеханического происхождения: ползуны, навары, тормозные выщербины, связанные с образованием «белого слоя», термические трещины и др.; усталостное выкрашивание; разрушения колес.

Цель работы - разработка химического состава сталей для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их ресурса в различных условиях эксплуатации.

Повышение стойкости к образованию усталостных дефектов в виде выкрашивания и износостойкости стали может достигаться путем увеличения прочности и твердости стали. Достижение этого за счет повышения содержания углерода не всегда дает желаемый результат, так как при этом снижается пластичность стали и повышается чувствительность к концентраторам напряжений, а также возрастает чувствительность к тепловому воздействию, то есть возрастает количество выщербин, связанных с образованием «белого слоя». Достижение высокого комплекса свойств при низкой чувствительности к тепловому воздействию возможно при снижении содержания углерода, а имеющее место при этом разупрочнение стали должно быть компенсировано одним из известных методов упрочнения металлов.

Материал и методика исследования. Установлено, что применение дисперсион-

ного упрочнения и зернограничного, при которых дисперсные частицы тугоплавкой фазы являются серьезными препятствиями для движения дислокаций и границ зерен, является перспективным, наряду с твердорастворным упрочнением, в результате использования которого была разработана сталь «К» с повышенным содержанием кремния и марганца. В лабораторных условиях в индукционной печи были выплавлены слитки малого объема (до 10 кг) диаметром 80 мм с повышенным содержанием марганца и кремния (сталь «К»), а также с системой Al–Ti–N на основе стали марки «2» (ДСТУ ГОСТ 10791-2016) и стали «К». Эффективность применяемой системы легирования подтверждена рядом работ [1–4]. Содержание углерода в опытных сталях было до 0,6 % масс. Плавка «Т» являлась сравнительной в данных исследованиях и по своему химическому составу соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791-2016. Все плавки выплавлены в одинаковых условиях.

В работе выполнен анализ структурного состояния по сечению слитка, проведены исследования комплекса механических свойств опытных сталей в литом состоянии. Образцы вырезали из донной части слитков, схема вырезки была идентична для всех случаев. Испытания проводили на трех образцах для каждой стали. На рисунке 1 показаны средние значения определяемых характеристик.

Установлено положительное влияние опытного химического состава на показатели вязкости и пластичности при близких показателях прочности и твердости по сравнению с высокопрочной сталью марки Т, нормируемой ДСТУ ГОСТ 10791-2016.

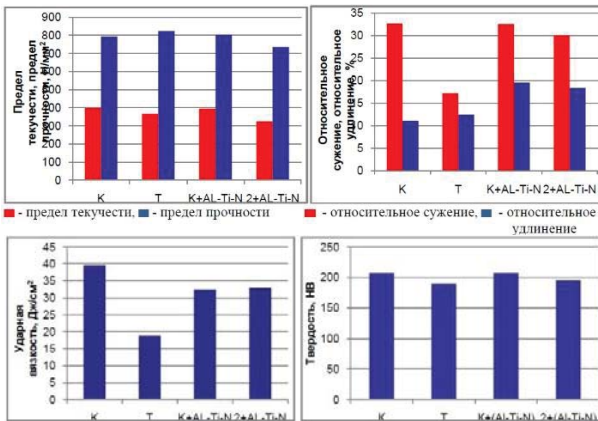


Рис. 1. Механические свойства опытных сталей / Fig. 1. Mechanical properties of experimental steels

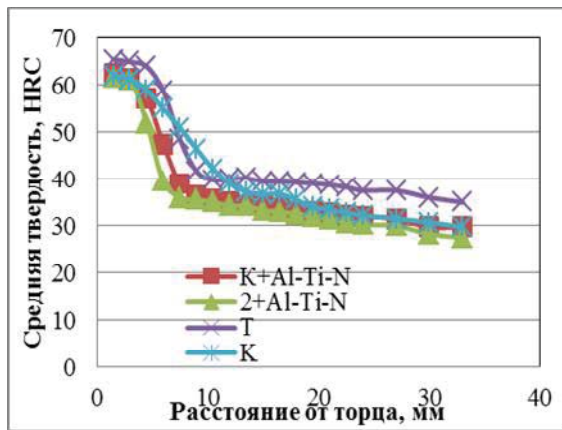


Рис. 2. Изменение твердости в зависимости от расстояния / Fig. 2. The change in hardness depending on the distance

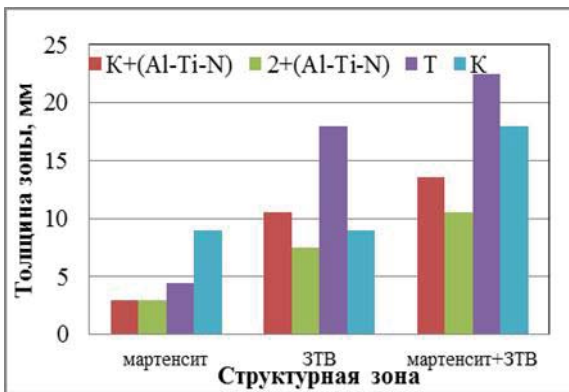


Рис. 3. Толщина структурных слоев опытных сталей после торцевой заковки / Fig. 3 The thickness of the structural layers of the experimental steels after end hardening

Одним из наиболее распространенных эксплуатационных дефектов является выкрашивание в процессе взаимодействия двух твердых тел – колеса и рельса, из-за которого приходится восстанавливать профиль железнодорожного колеса неэкономным методом, таким как переточка.

Преыдушими исследованиями [5; 6] показано, что механизм происхождения выщербин теплового происхождения напрямую связан с наличием и характеристиками «белого слоя». Прокаливаемость стали методом Джомини (ГОСТ 5657) характеризует глубину проникновения закаленного слоя при одностороннем охлаждении водой. В лабораторных условиях был выполнен эксперимент с определением прокаливаемости исследуемых сталей. Результаты приведены на рисунках 2 и 3.

Установлено, что опытные стали имеют меньшую прокаливаемость, то есть меньшую склонность к образованию структур закалки при термическом воздействии, которое может возникать при торможении в поверхностных слоях железнодорожных колес.

Выводы

1. Проведен анализ причин образования дефектов на поверхности катания железнодорожных колес. Показано, что химический состав является одним из определяющих факторов, влияющих на эксплуатационные свойства колес, а его совершенствование – эффективным способом повышения надежности и долговечности этих изделий.

2. Исследованы пути повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес. Разработаны системы легирования с принципиально новым способом упрочнения стали для железнодорожных колес – тугоплавкой дисперсной фазой совместно с твердорастворным упрочнением.

3. Установлено положительное влияние опытного химического состава с системой Al–Ti–N на показатели вязкости и пластичности при несколько более низких показателях прочности и твердости по сравнению с высокопрочной сталью марки Т, нормируемой ДСТУ ГОСТ 10791-2016.

4. Показано, что опытные стали 2+(Al–Ti–N) и K+(Al–Ti–N) имеют на 20...30 % меньшую зону структурных изменений, что свидетельствует про более стойкую к образованию дефектов термического происхождения на поверхности катания железнодорожных колес.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Inoue A. Mechanical strength of ultra-fine Al–AlN composites produced by a combined 65 method of plasma-alloy reaction, spray deposition and hot pressing / A. Inoue, T. Yamaguchi, B.G. Kim, K. Nosaki, T. Masumoto // *Journal Of Applied Physics*. – 1992. – Vol. 71. – P. 3278.
2. Jeffrey G. A. Wurtzite type binary compounds. I. Structures of aluminium nitride and beryllium oxide / G. A. Jeffrey, G. S. Parry, R. L. Mozzi // *Journal of Chemistry and Physics*. – 1956. – Vol. 25. – P. 1024.
3. Wever F. Das auftreten eines kubischen nitrids in aluminiumlegierten stahlen / F. Wever, K. Koch, C. Ilschner-Gench, H. Rohde // *Forsh. Wirts. – Nordrhein-Westfalen*, 1957. – № 409. – Pp. 1–26.
4. Zajac S. Thermodynamics of the Fe–Nb–C–N system and the solubility of niobium carbonitrides in austenite / S. Zajac, B. Jansson // *Metallurgical and Material Transactions*. – B. – 1998. – Vol. 29B, № 2. – P. 163.
5. Бабаченко А. И. Исследование стойкости к образованию выщербин на поверхности катания железнодорожных колес различных уровней прочности / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш, Ж. А. Дементьева, А. Н. Хулин, А. Н. Савченков, Е. А. Шпак // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2010. – С. 194–202.
6. Бабаченко А. И. Совершенствование химического состава стали для, железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания / А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш, Ж. А. Дементьева, А. Н. Хулин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2011. – С. 226–233.

REFERENCES

1. Inoue A., Yamaguchi T., Kim B.G., Nosaki K. and Masumoto T. Mechanical strength of ultra-fine Al–AlN composites produced by a combined 65 method of plasma-alloy reaction, spray deposition and hot pressing. *Journal of Applied Physics*. 1992, vol. 71, pp. 3278.
2. Jeffrey G.A., Parry G.S. and Mozzi R.L. Wurtzite type binary compounds. I. Structures of aluminium nitride and beryllium oxide. *Journal of Chemistry and Physics*. 1956, vol. 25, p. 1024.
3. Wever F., Koch K., Ilschner-Gench C. and Rohde H. Das auftreten eines kubischen nitrids in aluminiumlegierten stahlen. *Forsh. Wirts. Nordrhein-Westfalen*, 1957, no. 409, pp. 1–26.
4. Zajac S. and Jansson B. Thermodynamics of the Fe–Nb–C–N system and the solubility of niobium carbonitrides in austenite. *Metallurgical and Material Transactions*, B, 1998, vol. 29B, no. 2, p. 163.
5. Babachenko O.I., Kononenko G.A., Litvinenko P.L., Knysh A.V., Dementieva J.A., Khulin A.N., Savchenkov A.N. and Shpak E.A. *Issledovanie stoikosti k obrasovaniyu visherbin na poverhnosti katania zhelezodorozhnykh kolos raslichnykh urovney prochnosti* [Investigation of the resistance to the formation of chizholes on the tread surface of railway wheels of various strength levels]. *Fundamentalnye i prikladnye problem chernoy metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2010, pp. 194–202. (in Russian).
6. Babachenko O.I., Litvinenko P.L., Knysh A.V., Dementieva J.A. and Khulin A.N. *Sovershenstvovanie himicheskoho soctava stali dlya zhelezodorozhnykh kolos obespechivauscheho povushenie ih stoykosti k obrasovaniyu defektov na poverhnosri katania* [Improvement of the chemical composition of steel for railway wheels, which increases their resistance to the formation of defects on the rolling surface]. *Fundamentalnye I prikladnye problem chernoy metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2011, pp. 226–233. (in Russian).

Надійшла до редакції: 28.02.2019 р.