

УДК 669.1.017

Р. В. Подольський, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-0288-0641*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України
Український державний університет науки і технологій***О. А. Сафронова**, м.н.с., аспірантка, ORCID 0000-0002-4032-4275**О. Є. Меркулов**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659**Г. А. Кононенко**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105**О. І. Бабаченко**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4710-0343**О. Л. Сафронов**, м.н.с., ORCID 0000-0002-4711-02X3*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

АНАЛІЗ ВІДПОВІДНОСТІ ДОСЛІДНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК СУЧАСНИМ СТАНДАРТАМ УКРАЇНИ ТА ЄС

Анотація. Процес експлуатації транспортних засобів визначає взаємодія колеса і рейки. Від параметрів цього багато в чому залежать безпека руху та основні техніко-економічні показники господарств колії та рухомого складу. Результатом цієї взаємодії є зміни в металі, що виникають від тертя кочення і особливо від тертя ковзання колеса по рейці при гальмуванні, у зв'язку з цими змінами відбувається зношування коліс рухомого складу. Мета роботи: дослідження мікроструктури та механічних властивостей сталей перспективних хімічних складів на відповідність сучасним вимогам до залізничних рейок. Під час виконання роботи застосовані методи металографічного аналізу, визначення механічних властивостей, хімічний аналіз. Матеріалом для детальних досліджень мікроструктури слугували зразки, виготовлені з лабораторних плавок сталей перспективного хімічного складу. При порівнянні перспективних хімічних складів встановлено, що сталь 1 відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018 по основним хімічним елементам та має відмінності по ДСТУ 4344:2004, а саме: підвищений вміст вуглецю. При порівнянні дослідного хімічного складу сталі 2 встановлено, що дана сталь не відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018 та ДСТУ 4344:2004, а саме: зниженою кількістю вуглецю та підвищеним вмістом кремнію, хрому та молібдену. За результатами аналізу значень механічних властивостей встановлено, що сталь 1 та 2 відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018. Сталь 1 не відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 за рівнем значень границі плинності та відносного звуження, а сталь 2 не відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 для вищої категорії рейок за рівнем значень тимчасового опору. За результатами досліджень мікроструктури встановлено, що дослідна сталь 1 після термічної обробки має структуру високодисперсного перліту з невеликою кількістю грубопластинчастого перліту. При аналізі мікроструктури сталі перспективного хімічного складу 2 встановлено, що структура складається з безкарбідного бейніту.

Ключові слова: хімічний склад, залізничні рейки, мікроструктура, механічні випробування, перліт, бейніт.

Посилання для цитування: Аналіз відповідності дослідних сталей для залізничних рейок сучасним стандартам України та ЄС / Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, О. Є. Меркулов, Г. А. Кононенко, О. І. Бабаченко, О. Л. Сафронов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 362-369. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-362-369.

Стан питання. Процес експлуатації залізничних транспортних засобів визначає взаємодія колеса і рейки. Від параметрів цього багатовимірного процесу залежать безпека руху та основні техніко-економічні показники господарств колії та рухомого складу. Результатом є вплив на метал, що виникає від тертя кочення і особливо від тертя ковзання колеса по рейці при гальмуванні, відповідно до цих змін відбувається зношування коліс рухомого складу [1], яке, в свою чергу може призвести до катастрофічних результатів для локомотивного господарства.

З аналізу робіт різних авторів [2-3] слідує, що для збільшення часу експлуатації залізничної рейки потрібно досягнення в металі головки певного рівня твердості, зниження концентрації вуглецю і введення до складу сталей легуючих елементів з метою твердорозчинного зміцнення, зниження кількості карбідоутворюючих елементів. Доцільно також розглядати питання про формування певного структурного стану металу в області поверхні катання, тобто перехід до продуктів проміжного перетворення, зокрема, нижнього бейніту.

Виходячи з досліджень останніх років [4-7] відомо, що міцність перлітних рейкових сталей досягла межі [8]. Крім того, збільшення вмісту вуглецю вплине на ударну в'язкість та зварюваність матеріалів рейок [9]. Наприклад, у порівнянні з металом доевтектоїдної рейки R200 подовження металу зразків з заевтектоїдної рейки R400HT знижується на 6%. Отже, існує гостра потреба в інших альтернативних матеріалах. Бейнітна сталь, що забезпечує як високу міцність, так і відмінну пластичність, вважається одним з найбільш перспективних напрямків.

Низьковуглецеві бейнітні сталі відрізняються від звичайних перлітних сталей тим, що в них мало карбідів, якщо вони взагалі є. Бейнітні низьковуглецеві сталі, міцність яких більше 1200 МПа при цьому володіють високим рівнем ударної в'язкості, трибологічними властивостями, сприятливою реакцією на великі швидкості деформації, стійкістю до втоми і дешеві у виробництві [10-14]. Такий комплекс властивостей досягається за рахунок дуже дрібної і сильно зміцненої рейкової мікроструктури.

Мета роботи: порівняльні дослідження мікроструктури та механічних властивостей сталей перспективних хімічних складів з сучасними вимогами до залізничних рейок.

Матеріали та методики: металографічний аналіз, визначення механічних властивостей, хімічний аналіз.

Матеріалом для детальних досліджень мікроструктури слугували зразки, вирізані з лабораторних плавок перспективного хімічного складу сталі. Металографічні дослідження дослідних сталей виконувались на світловому мікроскопі виробництва компаній «Carl Zeiss» моделей «Neophot 32» і «Axiovert 200 M MAT». Металографічні шліфи виготовляли механічним способом. Виявлення мікроструктури проводили з застосуванням 2-3 % спиртового розчину азотної кислоти (HNO_3).

Випробування на розтягування зразків дослідних сталей проводили при температурі навколишнього середовища на трьох пропорційних циліндричних зразках з кожної плавки з діаметром робочої частини 5 мм типу IV за методикою згідно ГОСТ 1497.

Твердість дослідних сталей вимірювали за ГОСТ 9012 «Метали. Метод вимірювання твердості за Брінеллем» кулькою діаметром 10 мм при зусиллі 29430 Н (3000 кгс). Як результат контролю твердості брали середнє значення твердості по трьом вимірам.

Випробування на ударний вигин зразків дослідних сталей проводили при температурі навколишнього середовища. Зразок з U -подібним надрізом з кожної плавки, з надрізом глибиною 2 мм за методикою згідно ГОСТ 9454 «Метод випробування на ударний вигин при знижених, кімнатній та підвищених температурах».

В дослідженнях застосовувались спеціалізовані програмні забезпечення: Qform, imageJ, AxioVision, WebPlotDigitizer, DAQMaster, Excel.

Результати. Хімічний склад досліджуваних лабораторних плавок наведено в таблиці 1. При порівнянні перспективних хімічних складів встановлено, що сталь 1 відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018 по основним хімічним елементам та має відмінності по ДСТУ 4344:2004, а саме: має підвищений вміст вуглецю. Слід зазначити, що в хімічному складі сталі 1 є бор, що є відмінністю від регламентованих вимог до хімічного складу, введення даного елемента в хімічних склад проводилось з метою підвищення прогартуваності дослідної сталі [7]. При порівнянні дослідного хімічного складу сталі 2 встановлено, що дана сталь не відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018 та ДСТУ 4344:2004, а саме: має знижену кількість вуглецю та підвищений вміст кремнію, хрому та молібдену.

Результати механічних випробувань зразків сталі перспективних хімічних складів після проходження розробленої термічної обробки (сталь 1 - нагрів до 900 °C з охолодженням зі швидкістю 5,1 °C/с та відпуском при 200 °C та сталь 2 - нагрів до 900 °C з охолодженням зі швидкістю 0,52 °C/с та відпуском при 350 °C) показали майже повну відповідність вимогам стандарту ДСТУ 4344:2004 та ДСТУ EN 13674:2018. Результати механічних випробувань зразків перспективних хімічних складів сталей наведено в таблиці 2.

Таблиця 1 – Хімічний склад перспективних дослідних сталей.

Умовне маркування дослідної сталі (Вимоги)	Вміст хімічних елементів, % мас.											
	Категорія рейок (клас сталі)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	B
1 [7]	(перлітний)	0,84	0,44	0,95	0,014	0,008	-	-	-	-	0,013	0,01
2	(бейнітний)	0,37	1,11	1,35	0,028	0,024	0,74	0,036	0,178	-	0,039	-
(ДСТУ 4344:2004)	Вища	0,71-0,82	0,25-0,45	0,8-1,3	Не більше 0,035	Не більше 0,04	-	-	-	0,03-0,07	Не більше 0,015	-
(ДСТУ EN 13674:2018)	R400HT	0,88-1,07	0,18-0,62	0,95-1,35	max. 0,025	max. 0,025	≤0,30	max. 0,1	max. 0,02	max. 0,03	max. 0,004	-

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань дослідних сталей випробувань.

Умовне маркування дослідної сталі (Вимоги)	Категорія рейок (клас сталі)	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість пов., НВ	Твердість на глибині (11), 20 мм
1 [7]	(перлітний)	1301	816	11	14	16,59	415	360
2	(бейнітний)	1281	1050	16	30	48,21	415	401
(ДСТУ 4344:2004)	Вища	≥1290	≥850	≥10	≥30	≥15	374...401	≥(321)
(ДСТУ EN 13674:2018)	R400HT	≥1280	-	≥9	-	-	400-440	≥370

За результатами аналізу механічних властивостей встановлено, що сталь 1 та 2 відповідає вимогам ДСТУ EN 13674:2018. Сталь 1 не відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 за рівнем значень границі плинності та відносного звуження, а сталь 2 не відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 для вищої категорії рейок за рівнем значень тимчасового опору. Слід зазначити, що дослідна сталь 2 має значення ударної в'язкості на рівні 48 Дж/см², що перевищує вимоги стандарту ДСТУ 4344:2004 на 30 %, з досягненням твердості на рівні 20 мм на рівні 401 НВ.

Результати досліджень мікроструктури дослідних зразків представлено на рис. 1.

За результатами мікроструктурних досліджень встановлено, що дослідна сталь 1 після термічної обробки має структуру високодисперсного перліту з невеликою кількістю грубопластинчастого перліту. При аналізі мікроструктури перспективного хімічного складу 2 встановлено, що структура складається з безкарбідного бейніту.

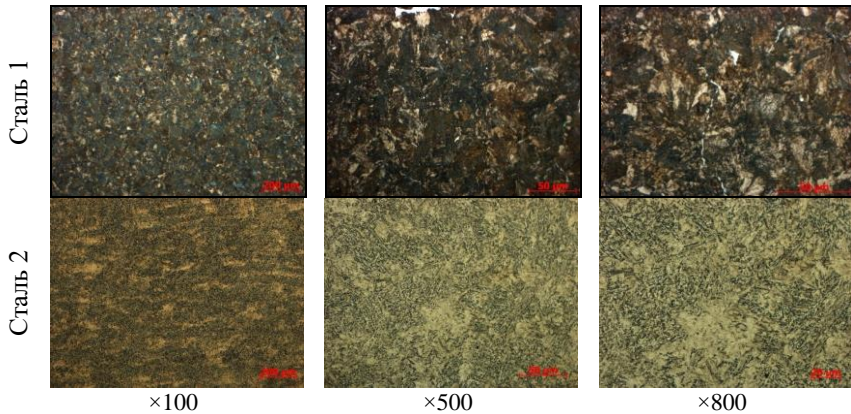


Рисунок 1 – Мікроструктура сталей перспективних хімічних складів.

Таким чином, проведені в роботі комплексні дослідження механічних властивостей зразків перспективного хімічного складу показали повну відповідність усіх характеристик вимогам ДСТУ EN 13674:2018.

Висновки

1. Розроблено хімічний склад дослідних сталей для залізничних рейок і проведена виплавка в лабораторних умовах злитків масою до 10 кг.
2. Металографічний аналіз зразків досліджуваної сталі показав, що основна мікроструктура сталі 1 складається з тонкодіфенційованого (сорбітоподібного) перліту. Мікроструктура сталі 2 складається переважно з безкарбідного бейніту та аустеніту залишкового.
3. За результатами аналізу механічних властивостей та порівнянням з вимогами нормативно-технічної документації встановлено, що дослідні сталі 1 та 2 відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13674:2018.

Перелік посилань

1. Harder R. Creep Force – Creepage and Frictional Work Behaviour in Non-Hertzian Counter formal Rail/Wheel Contacts. *Proceedings of INHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface*. Moscow. 1999. Vol. 1. P. 207 – 214.
2. Sawley Devis. K. *Railway Track Structures*. 1998. 11. P. 14-17.
3. Davis D. *Railway Track Structures*. 1977. 12. P. 14-16.
4. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О. В., Майстренко К. М., Подольський Р. В. Розробка сталей для металопродукції залізничного призначення : монографія. Дніпро : Домінанта-принт, 2020. 298 с.
5. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Дослідження впливу режимів термічної обробки дослідних сталей для залізничних рейок нового покоління на механічні властивості. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії*. 2020. Вип. 34. С. 247-255.
6. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А.

- Порівняльний аналіз способів термічної обробки залізничних рейок та визначенням подальших напрямків підвищення їх експлуатаційної надійності. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії*. 2019. Вип. 33. С. 224-237.
7. Babachenko O. I., Kononenko H. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Mater. Sci.* 2021. Vol. 56, No. 6. P. 814–819. DOI: 10.1007/s11003-021-00499-1
 8. Sharma S., Sangal S., Mondal K. Wear behaviour of bainitic rail and wheel steels. *Mater. Sci. Technol.*, 2016. Vol. 32. No. 4. P. 266–274.
 9. Pointner P. High strength rail steels-The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*. 2008. Vol. 265. Issues 9-10. P. 1373–1379.
 10. Bhadeshia H. K. D. H. Hyperbolic Tangents and Alloys of Iron. *Materials World*. 1996. Vol. 7. P. 643-645.
 11. Bristowe P. D. Hansip P. J. Introduction to Materials Modelling. Introduction to Materials Modelling / Editor Z. H. Barber. Maney. 2005. P. 1-14.
 12. Bhadeshia. H. K. D. H., Sourmail. T. Success and Failure of Models. *Japan Society for the Promotion of Science*. 2003. Vol. 44. P. 299-314.
 13. Парусов Е. В., Губенко С. І., Клименко А. П., Чуйко І. М., Сагура Л. В. Особливості кінетики розпаду аустеніту та закономірності формування структури сталі С82ДС1V при безперервному охолодженні. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. Вип. 1 (237-238). С. 42-51.
 14. Парусов Э. В., Сычков А. Б., Чуйко И. Н., Сагура Л. В., Сивак А. И., Голубенко Т. Н. Влияние химического состава стали на образование бейнитомартенситных участков в структуре бунтового проката сварочного назначения. *Вісник Українського матеріалознавчого товариства*. 2017. № 1(10). С. 60-66.

References

1. Harder R. Creep Force – Creepage and Frictional Work Behaviour in Non-Hertzian Counter formal Rail/Wheel Contacts. *Proceedings of IHHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface*. Moscow. 1999. Vol. 1. P. 207 – 214.
2. Sawley Devis. K. Railway Track Structures. 1998. 11. P. 14-17.
3. Davis D. Railway Track Structures. 1977. 12. P. 14-16.
4. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Roslik O. V., Majstrenko K. M., Podolskyi R. V. Rozrobka stalej dlja metaloprodukcii zaliznichnogo priznachennja [Development of steels for railway metal products]: monografija. Dnipro : Dominanta-print, 2020. 298 p. (in Ukrainian).
5. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Doslidzhennja vplivu rezhimiv termichnoї obrobki doslidnih stalej dlja zaliznichnih rejok novogo pokolinnja na mehanichni vlastivosti [Study of the influence of heat treatment regimes of test steels for new generation railway rails on mechanical properties]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2020. Collection 34. P. 247-255. (in Ukrainian).
6. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Porivnjal'nij analiz sposobiv termichnoї obrobki zaliznichnih rejok ta viznachennjam podal'shij naprjamkiv pidvishennja ih ekspluatacijnōi nadijnosti [Comparative analysis of methods of thermal treatment of railway rails and determination of further directions for increasing their operational reliability]. *Fundamental and applied problems of*

- ferrous metallurgy*. 2019. Collection 33. P. 224-237. (in Ukrainian).
7. Babachenko O. I., Kononenko H. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Mater. Sci.* 2021. Vol. 56, No. 6. P. 814–819. DOI: 10.1007/s11003-021-00499-1.
 8. Sharma S., Sangal S., Mondal K. Wear behaviour of bainitic rail and wheel steels. *Mater. Sci. Technol.*, 2016. Vol. 32. Issue 4. P. 266-274.
 9. Pointner P. High strength rail steels-The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*. 2008. Vol. 265. Issues 9-10. P. 1373-1379.
 10. Bhadeshia H. K. D. H. Hyperbolic Tangents and Alloys of Iron. *Materials World*. 1996. Vol. 7. P. 643-645.
 11. Bristowe P. D. Hansip P. J. Introduction to Materials Modelling. Introduction to Materials Modelling. Editor Z. H. Barber. Maney. 2005. P. 1-14.
 12. Bhadeshia H. K. D. H., Sourmail T. Success and Failure of Models. Japan Society for the Promotion of Science. 2003. Vol. 44. P. 299-314.
 13. Parusov E. V., Gubenko S. I., Klimenko A. P., Chujko I. M., Sagura L. V. Osoblivosti kinetiki rozpadu austenitu ta zakonmirmosti formuvannya strukturi stali C82DCrV pri bezperervnomu oholodzhenni [Peculiarities of the kinetics of austenite decomposition and patterns of formation of the structure of C82DCrV steel during continuous cooling]. Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Life and Architecture. 2018. Issue 1 (237-238). P. 42-51. (in Ukrainian)
 14. Parusov Je. V., Sychkov A. B., Chujko I. N., Sagura L. V., Sivak A. I., Golubenko T. N. Vliyanie himicheskogo sostava stali na obrazovanie bejnitomartensitnyh uchastkov v strukture buntovogo prokata svarochnogo naznachenija [The influence of the chemical composition of steel on the formation of bainitic-martensitic sections in the structure of the welded rolled steel]. Bulletin of the Ukrainian Materials Science Society. 2017. No. 1 (10). P. 60-66. (in Russian)

R. V. Podolskyi, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-0288-0641

*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies*

E. A. Safronova, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4032-4275

O. Ye. Merkulov, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

G. A. Kononenko, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

O. I. Babachenko, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4710-0343

O. L. Safronov, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4711-02X3

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ANALYSIS OF COMPLIANCE OF EXPERIMENTAL STEELS FOR RAILWAY RAILS WITH MODERN STANDARDS OF UKRAINE AND THE EU

Summary. The process of operating vehicles determines the interaction of the wheel and rail. Traffic safety and the main technical and economic indicators of track management and rolling stock largely depend on these parameters. The result of this interaction are changes in the metal, which arise from rolling friction and especially from the friction of the wheel sliding on the rail during braking, due to these changes,

the wheels of the rolling stock wear out. The purpose of the work is to research of the microstructure and mechanical properties of steels of promising chemical compositions to meet modern requirements for railway rails. Methods of metallographic analysis, determination of mechanical properties, and chemical analysis were used. Samples made from laboratory melts of steels with a promising chemical composition served as material for detailed microstructure studies. When comparing prospective chemical compositions, it was established that steel 1 meets the requirements of DSTU EN 13674:2018 for basic chemical elements and has differences according to DSTU 4344:2004, namely: increased carbon content. When comparing the experimental chemical composition of steel 2, it was found that this steel does not meet the requirements of DSTU EN 13674:2018 and DSTU 4344:2004, namely: a reduced amount of carbon and an increased content of silicon, chromium and molybdenum. According to the results of the analysis of the values of mechanical properties, it was established that steel 1 and 2 meets the requirements of DSTU EN 13674:2018. Steel 1 does not meet the requirements of DSTU 4344:2004 in terms of yield strength and relative narrowing, and steel 2 does not meet the requirements of DSTU 4344:2004 for the highest category of rails in terms of temporary resistance values. Based on the results of the microstructure studies, it was established that the test steel 1 after heat treatment has a structure of highly dispersed pearlite with a small amount of coarse-plate pearlite. When analyzing the microstructure of steel with a promising chemical composition 2, it was established that the structure consists of carbide-free bainite.

Key words: chemical composition, railway rails, microstructure, mechanical tests, pearlite, bainite.

For citation: Analiz vidpovidnosti doslidnykh stalei dlia zaliznychnykh reioik suchasnym standartam Ukrainy ta YeS [Analysis of compliance of experimental steels for railway rails with modern standards of Ukraine and the EU] / R. V. Podolskyi, E. A. Safronova, O. Ye. Merkulov, G. A. Kononenko, O. I. Babachenko, O. L. Safronov. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 362-369. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-362-369.

*Стаття надійшла до редакції збірника 12.10.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*