

**О.І. Бабаченко**, д.т.н., с.н.с., директор Інституту, ORCID 0000-0003-4710-0343

**Р.В. Подольський**, інженер 1 категорії, ORCID 0000-0002-0288-0641

**Г.А. Кононенко**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7446-4105

**О.А. Сафронова**, інженер 1 категорії, ORCID 0000-0002-4032-4275

*Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДОСЛІДНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

**Анотація.** Безпека руху залізничного транспорту залежить від якості металу, ефективності технології виготовлення рейок і колісних пар, умов експлуатації залізничної колії. Експлуатаційна стійкість рейок багато в чому визначається структурним станом і механічними властивостями металу елементів рейок. На підставі порівняльного аналізу різних способів і режимів обробок залізничних рейок, встановлено, що одним з напрямків підвищення експлуатаційної надійності рейок може бути оптимізація способів нагріву і охолодження металу при реалізації режимів їх термічної обробки. Проведено дослідження мікроструктури сталі лабораторних плавок до 10 кг, виплавлених в умовах ІЧМ НАНУ (умовне позначення яких РСТ), після пічного нагріву з охолодженням заготовок під зразки на розтяг (55x12x12 мм) в різних охолоджувальних середовищах: на спокійному повітрі, під вентилятором, обдув компресорним повітрям, у воді з температурою 80°C. Встановлено, що при охолодженні зі швидкістю 5,1°C/с (охолодження компресорним повітрям) отримано рівномірну структуру високодисперсного перліту з твердістю металу на рівні вимог зарубіжних стандартів. На підставі лабораторних досліджень встановлено, що об'ємний пічний нагрів з наступним охолодженням досліджуваних зразків зі сталі з 0,84%С, 0,44% Si та 0,95% Mn в середовищі, яке забезпечує металу контрольовану швидкість охолодження  $\approx 5,1^\circ\text{C}/\text{с}$ , сприяє отриманню структури пластинчастого перліту з твердістю 415 НВ. Встановлено, що використання пічного нагріву призводить при нагріванні до отримання гомогенного аустеніту в обсязі досліджуваних зразків.

**Ключові слова:** залізнична рейка, рейкова сталь, термічна обробка, механічні властивості.

**Посилання для цитування:** Бабаченко О.І., Подольський Р.В., Кононенко Г.А., Сафронова О.А. Дослідження впливу режимів термічної обробки дослідних сталей для залізничних рейок нового покоління на механічні властивості. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34. – С. 247-255. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-247-255

*Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* – 2020. – Випуск 34 «Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

**Стан питання.** Проблема підвищення працездатності рейок сьогодні стає ще більш актуальною. У зв'язку з інтенсифікацією руху на залізницях країни, збільшенням жорсткості шляху, числа і вантажонапруженості перевезень постійно зростають показники, що визначають термін служби рейок: швидкість руху і навантаження на вісь. Будівництво в перспективі швидкісних і високошвидкісних залізничних магістралей, постійне збільшення ваги вантажів, що перевозяться, використання залізобетонних шпал та ін., призводять до збільшення динамічного впливу і посилення вимог, що пред'являються до експлуатаційних властивостей і якості залізничних рейок [1]. Один з напрямків підвищення показників якості - це розробка хімічного складу та термічної обробки сталі для залізничних рейок нового покоління.

**Мета роботи:** визначення режимів термічної обробки залізничних рейок нового покоління, що забезпечують механічні властивості з відсутністю структур гарту на рівні кращих світових аналогів.

**Матеріали та методи.** В умовах ІЧМ НАН України були виконані лабораторні експерименти з відпрацювання параметрів термічної обробки після гарячої пластичної деформації (далі - ГПД) зразків дослідних сталей з різним вмістом легуючих елементів (табл. 1) з метою встановлення оптимальних режимів для кожного хімічного складу.

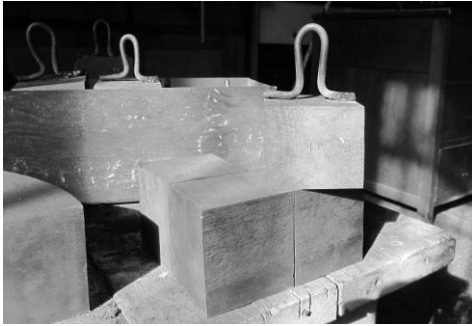
Таблиця 1 – Фактичний хімічний склад дослідних плавок рейкових сталей, % мас.

Умовне маркування сталі	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V	B	Ca	N
РСТ 1	0,75	0,33	0,89	0,010	0,005	0,016	0,013	≤0,005			
РСТ 2	0,70	0,44	0,76	0,013	0,009	0,019	0,017	0,006	0,0004	0,0011	
РСТ 3	0,80	0,47	0,97	0,013	0,009	0,022	<0,06	0,0010	0,0001	0,0015	
РСТ 4	0,84	0,44	0,95	0,014	0,008	0,013	<0,06	0,0012	0,0103	0,0006	
РСТ 5	0,90	0,39	0,89	0,015	0,009	0,018	<0,06	0,0015	0,00035	0,0006	0,0123

У лабораторних умовах була проведена гаряча пластична деформація проб розміром 70\*70\*80 мм з дослідних злитків шляхом осаджування на величину 50% (рис. 1, а). Зразки, що пройшли гарячу пластичну деформацію охолоджували на спокійному повітрі (рис. 1,б).

З отриманих проб після ГПД, були підготовленні заготовки для проведення механічних випробувань. При виготовленні зразків вживалися заходи, що виключають можливість зміни властивостей металу при

нагріванні або наклепання, що виникають в результаті механічної обробки.



а



б

Рисунок 1 – проведення гарячої пластичної деформації: а- загальний вигляд проб з дослідних злитків до деформації, б-охолодження зразків на повітрі після ГПД.

Термічна обробка була виконана за наступною схемою (рис 2), зразки від кожного з дослідного злитку нагрівали до температури  $900 \pm 10^\circ\text{C}$ , витримували протягом  $\approx 30$  хвилин при даній температурі та охолоджували у різних середовищах.

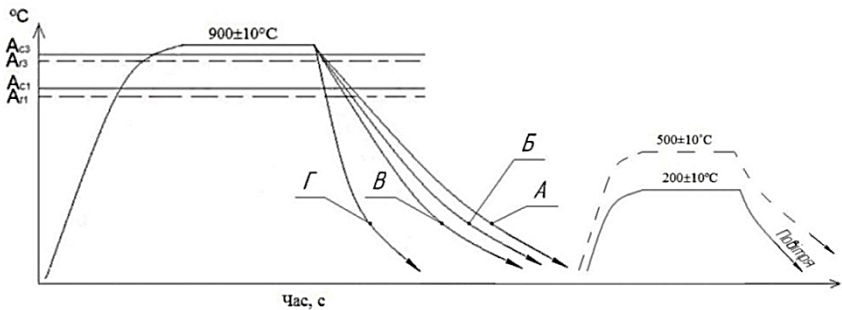


Рисунок 2 – Графік термічної обробки дослідних сталей РСТ з різними швидкостями охолодження, з послідовним відпуском при температурі  $500^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  відповідно.

На підставі лабораторного дослідження та літературного огляду [2, 3] були розглянуті різні методи охолодження рейкової сталі на етапі термічного зміцнення. В рамках даного етапу охолоджували в таких

середовищах як: на спокійному повітрі  $-0,52^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (рис. 2, а); за допомогою вентилятора  $-2,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (рис. 2, б); компресор  $-5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (рис. 2, в); вода, з попереднім нагрівом до температури  $80^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (рис.2, г).

В роботі досліджували вплив температури відпуску  $500^{\circ}\text{C}$  та  $200^{\circ}\text{C}$  на зміну твердості зразків дослідних сталей, що були попередньо охолоджені з різними швидкостями. З огляду на вимоги НТД серед яких є вимоги до твердості, її рівень має бути в межах 374-401 НВ згідно ДСТУ 4344:2004, 352-405 НВ згідно ГОСТ Р 51685-2013 та 370-410 НВ EN 13674-1:2011. Результати визначення твердості наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Твердість сталей дослідного складу після термічної обробки.

Швидкість	PCT1		PCT2			PCT3			PCT4			PCT5			
	Охолодження	Відпуск, $^{\circ}\text{C}$		Охолодження	Відпуск, $^{\circ}\text{C}$		Охолодження	Відпуск, $^{\circ}\text{C}$		Охолодження	Відпуск, $^{\circ}\text{C}$		Охолодження	Відпуск, $^{\circ}\text{C}$	
		500	200		500	200		500	200		500	200		500	200
$0,52^{\circ}\text{C}/\text{с}$	302	269	255	302	266	275	317	285	298	121	121	149	363	302	313
$2,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$	309	282	306	329	272	309	350	317	341	131	121	255	<b>398</b>	317	<b>363</b>
$5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$	398	292	333	373	302	354	<b>415</b>	292	<b>355</b>	<b>415</b>	333	<b>360</b>	<b>415</b>	337	<b>368</b>
$75^{\circ}\text{C}/\text{с}$	650	325	<b>48*</b>	590	321	<b>55*</b>	665	313	<b>58*</b>	660	350	<b>52*</b>	650	350	<b>56*</b>

\*Примітка. Твердість по методу Роквелла за шкалою С.

На підставі отриманих даних по визначенню твердості встановлено, що термічна обробка за схемою, що представлена на рис.2,в, дозволяє отримати твердість рейкової сталі, яка відповідає вимогам світових стандартів. Дослідження мікроструктури після кожного етапу термічної обробки (охолодження зі швидкістю  $5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , відпуск при  $500^{\circ}\text{C}$  та  $200^{\circ}\text{C}$  протягом 2 год.) наведено на рис. 3.

Після охолодження зі швидкістю  $5,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  отримуємо структуру високодисперсного перліту. Твердість після даної операції складає  $\approx 415\text{НВ}$ . Дані результати відповідають вимогам нормативно-технічної документації [4. 5]. Відпуск при  $500^{\circ}\text{C}$  з витримкою  $\approx 120$  хв показав, що проходить незначне зменшення металу (табл. 2), через зняття внутрішніх напружень, рекристалізацію, зменшення щільності дислокацій та проходження дифузійних процесів.

На підставі аналізу мікроструктури після відпуску при  $200^{\circ}\text{C}$  з витримкою  $\approx 120$  хв встановлено, що суттєвих змін у фазовому та структурному стані не відбувається. В основному мікроструктура являє собою високодисперсний перліт.

Термічній обробці за вказаними режимами підлягали заготовки під зразки для випробувань на розтяг  $55*12*12$  мм, з яких було виготовлено

зразки для випробувань при кімнатній температурі за стандартною методикою.

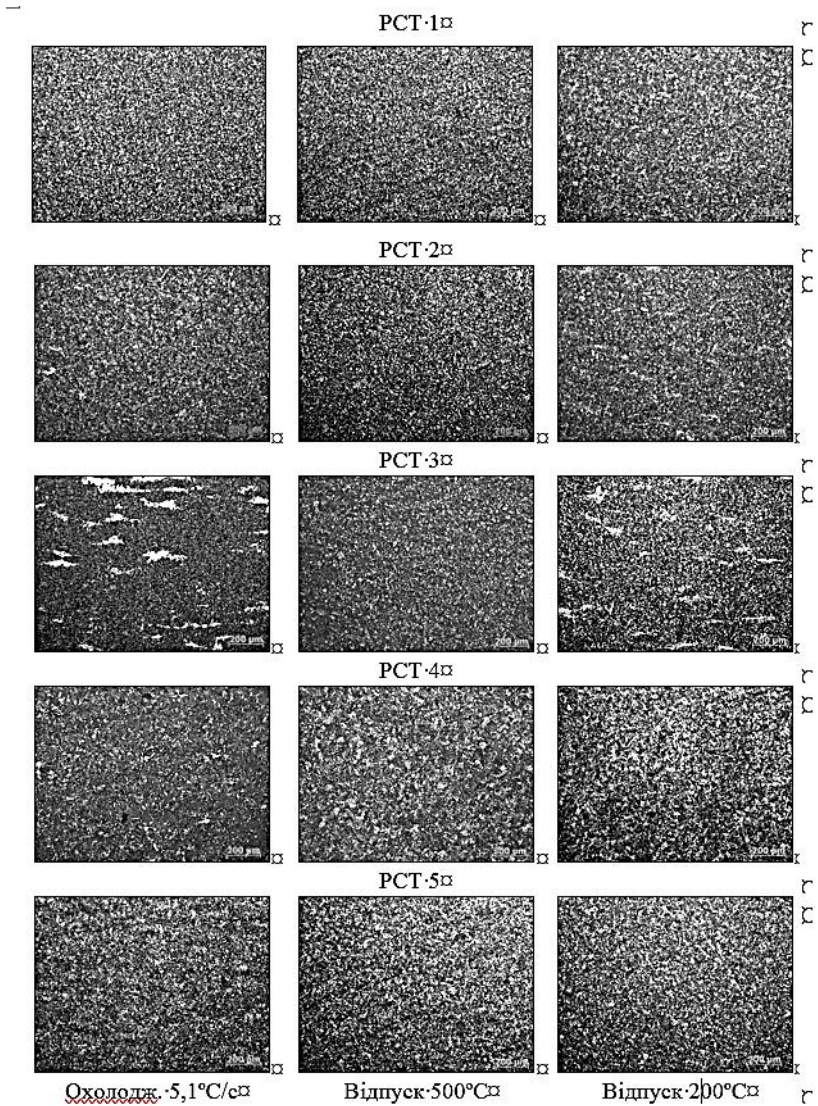


Рисунок 3– Мікроструктура дослідної сталі РСТ після охолодження та наступного відпуску при 500 °С та відпуску при 200 °С відповідно.

Результати випробувань наведені в таблиці 3, та представлені на графіках 4 а-г.

Таблиця 3 – Результати випробувань на розтяг дослідних плавок після ГПД та ТО (охолодження зі швидкістю 5,1 °С/с від 900°С + відпуск 200°С).

№ п\п	Плавка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %
1	PCT 1	1100,4	655,0	10,6
2	PCT 2	1092,2	672,4	11,0
3	PCT 3	1244	784,0	12,5
4	PCT 4	1300	816,1	10,7
5	PCT 5	1295,5	816,4	9,8

За результатами випробувань встановлено, що механічні властивості сталі PCT 3, відповідають вимогам ДСТУ 4344:2004 (вища категорія), ГОСТ Р 51685-2013 (ОТ350, ДТ350), EN 13674:1-2011 (R350LHT) відповідно.

При випробуванні на розтяг заевтектоїдної сталі PCT 4 та 5 встановлено, що дана сталь повністю відповідає вимогам ДСТУ 4344:2004 та світовим аналогам.

За результатами лабораторних досліджень для дослідно-промислового опробування виробництва залізничних рейок рекомендовано наступний хімічний склад, % мас:

$C=0,84-0,92$ ;  $Si=0,35-0,45$ ;  $Mn=0,80-0,95$ ;  $V \leq 0,0015$ ;  $B=0,003-0,005\%$ ,  $[N]=0,012-0,015\%$ , який дозволяє досягти комплексу механічних властивостей, що перевищує можливий для сталі, яка передбачена ДСТУ 4344:2004 та відповідають EN 13674:1-2011.

Для дослідно-промислового опробування рекомендовано наступні параметри термічної обробки: температура нагріву під термічну обробку 900 °С; швидкість охолодження 5,1 °С/с, температура відпуску 200 °С, тривалість відпуску 2год+15хв.

### Висновки

1. Розроблено хімічний склад дослідних сталей (PCT) для залізничних рейок і проведена виплавка в лабораторних умовах злитків масою до 10 кг. Встановлено позитивний вплив гарячої пластичної деформації і подальшої термічної обробки на твердість. Після гарячої пластичної деформації в порівнянні з литим станом приріст твердості склав ~14,1%; після гарячої пластичної деформації з подальшою термічною обробкою (без відпуску) приріст твердості склав ~39,4%.

2. Встановлено, що при прискореному охолодженні від температури 900°С з наступним відпуском 200°С протягом 120 хв. в лабораторних

дослідних сталях (РСТ) проходить зняття внутрішніх напружень. При цьому мікроструктура являє собою високодисперсний перліт, що відповідає вимогам закордонних стандартів. Дослідні рейкові сталі з підвищеним вмістом вуглецю мають механічні властивості, які відповідають вимогам ДСТУ 4344:2004 (вища категорія), ГОСТ Р 51685-2013 (ОТ350, ДТ350), EN 13674:1-2011 (R350LHT).

3. На підставі отриманих даних для дослідно-промислового опробування технології виробництва залізничних рейок рекомендовано наступний хімічний склад: С=0,84-0,92%, Si=0,35-0,45%, Mn= 0,80-0,95%, V=0,0010-0,0015%, В=0,003-0,005%, [N]=0,012-0,015%, який дозволяє досягти комплексу механічних властивостей, що перевищує можливий для сталі, яка передбачена ДСТУ 4344:2004.

### Перелік посилань

1. Розробка математичної моделі розрахунку теплового поля за перетином залізничної рейки при термічній обробці / О. І.Бабаченко, Г. А. Кононенко, Н. Ю. Філоненко, Н. Ю. Хулін // Строительство, материаловедение, машиностроение / О. І.Бабаченко, Г. А. Кононенко, Н. Ю. Філоненко, Н. Ю. Хулін. – м. Дніпро: ГВУЗ "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", 2018. – (Сборник научных трудов). – (Стародубовские чтения 2018; вып. 100). – С. 31–35.
2. Качество термически упрочнённых рельсов и подкладок. Исследования. Теория. Оборудование. Технология. Эксплуатация.: Монография. / Т.С. Скобло, В.Е. Сапожков, Н.М. Александрова, А.И. Сидашенко. Под ред. проф. Т.С. Скобло – Х.: ТОВ «Щедра садиба плюс» 2014. – 577с.
3. Петраш Л. В. Закалочные среды / Л. В. Петраш. – Москва: МАШГИЗ, 1959. – 114 с. – (Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы). – (УДК 621.785 П-30).
4. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови: ДСТУ 4344:2004. - [Чинний від 2005-10-01]. - К. : Держспоживстандарт України, 2005. - 31 с. - (Національний стандарт України).
5. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (EN 13674-1:2011, NEQ): ГОСТ Р 51685–2013. - [Дата введения 2014-07-01]. - М. : Стандартиформ, 2014. - 96 с. - (Национальный стандарт Российской Федерации).
6. Подольский Р. В. Определение путей повышения эксплуатационной стойкости железнодорожной колее / Р. В. Подольский, Л. Н. Дейнеко // Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «Молода академія-2019» / Р. В. Подольский, Л. Н. Дейнеко. – м. Дніпро: НМетАУ, 2019. – С. 82.

## Reference

1. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Filonenko N.YU. & Khulín A. M. (2018). Rozrobka matematichnoi modeli rozrakhunku teplovogo polya za peretinom zaliznichnoi reyki pri termichniy obrobtsti [Development of the mathematical model for calculating the thermal field at the intersection of a railroad rails during heat treatment]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye: Sbornik nauchnykh trudov. Starodubovskiy chteniya [Construction, materials science, mechanical engineering. Collection of scientific papers. Proceedings in memory of Starodubov]*. Dnipro: DVUZ "Pridneprovskaya gosudarstvennaya akademiya stroitelstva i arkhitektury", 2018, Issue 100, 31-35. [In Ukrainian].
2. Skoblo T.S., Sapozhkov V.E., Aleksandrova N.M. & Sidashenko A.I. (2014). Kachestvo termicheski uprochnnykh relsov i podkladok. Issledovaniya. *Teoriya. Oborudovanie. Tehnologiya. Jekspluatatsiya: Monografiya [Quality of thermally hardened rails and linings Research. Theory. Equipment. Technology. Operation: Monograph]*. T.S. Skoblo (Ed.). Kharkiv: TOV «Shhedra sadiba pljus», 2014, 577. [In Russian].
3. Petrash L. V. (1959). *Zakalochnye sredy [Hardening environ]*. Moskva: MASHGIZ, 1959. 114. [In Russian].
4. Rejki zvizhajni dlja zaliznic shirokoi kolii. Zagalni tehnicni umovi [Normal rails for full-gauge railway. General specifications]. (2005). *DSTU 4344:2004*. – (Chinnij vid 2005-10-01). Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2005. 31p. (Nacionalnij standart Ukraïni). [In Ukrainian].
5. Relsy zheleznodorozhnye. Obshhie tehnicheskie uslovija [Railway rails. General specifications]. (2014). *GOST R 51685–2013. (EN 13674-1:2011, NEQ)*. (Data vvedeniya 2014-07-01). Moskva: Standartinform, 2014, 96 p. (Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii). [In Russian].
6. Podolskij R. V. & Dejneko L. N. (2019). Opreделение putej povysheniya jekspluatacionnoj stojkosti zheleznodorozhnoj kolei [Determination of ways to increase the operational resistance of the railway track]. *Vseukraïnska naukovotehnicna konferencija studentiv i molodih uchenih «Moloda akademiya-2019» [Proceedings from All-Ukrainian scientific and technical conference of students and young scientists "Young Academy-2019"]*. Dnipro: NMetAU, 2019, pp. 82. [In Russian].

**A.I. Babachenko**, Dr. Sci., Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

**R.V. Podolskyi**, engineer, ORSID 0000-0002-0288-0641

**G.A. Kononenko**, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7446-4105

**E.A. Safronova**, engineer, ORSID 0000-0002-4032-4275

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine*

### **Investigation of the influence of heat treatment modes of experimental steels for new generation railway rails on mechanical properties**

**Summary.** The safety of railway transport depends on the quality of the metal, the efficiency of the technology for manufacturing rails and wheelsets, and the operating conditions of the railway track. The operational durability of



rails is largely determined by the structural state and mechanical properties of the metal of the rail elements. On the basis of a comparative analysis of various methods and modes of treatment of railway rails, it was found that one of the ways to increase the operational reliability of rails can be the optimization of methods for heating and cooling the metal when implementing the modes of their heat treatment. A study of the microstructure of steel laboratory melts up to 10 kg, melted under the conditions of the IHM NASU (the symbol of which is PCT), after furnace heating with cooling the blanks for tensile specimens (55x12x12mm) in various cooling media: in calm air, under a ventilator, blowing with compressor air in water with a temperature of 80°C. It is found that at cooling rate 5,1°C / s (cooling air compressor) is obtained a homogeneous structure of fine pearlite with a hardness of the metal at the level of foreign standards. On the basis of technical sources, it has been established that volumetric furnace heating followed by immersion of the test specimens made of steel with 0,84%C, 0,44% Si, 0,95% Mn into an environment providing the metal with a controlled cooling rate of  $\approx 5.1^\circ\text{C} / \text{s}$  contributes to the formation of a lamellar pearlite structure with a hardness of 415 HB. It was found that the use of furnace heating leads to the production of homogeneous austenite in the volume of the samples under study.

**Key words:** railway rail, rail steel, heat treatment, mechanical properties

**For citation:** Babachenko O.I., Podol's'kyu R.V., Kononenko H.A., Safronova O.A. Doslidzhennya vplyvu rezhymiv termichnoyi obrobky doslidnykh staley dlya zaliznychnykh reyok novoho pokolinnya na mekhanichni vlastyivosti [Investigation of the influence of heat treatment modes of experimental steels for new generation railway rails on mechanical properties]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy ] 2020, 34. 247-255. [in Ukrainian] . DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-247-255

*Стаття надійшла до редакції збірника 5.11.20 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування  
(Протокол засідання редакційної колегії збірника №3 от 22 грудня 2020 року)*