

УДК 662.326:624.98

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.08.1069

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ НА РІВНОМІРНІСТЬ КІНЦЕВОЇ МІКРОСТРУКТУРИ

БАБАЧЕНКО О. І.¹, докт. техн. наук, с. н. с.,
КОНОНЕНКО Г. А.², докт. техн. наук, ст. досл.,
БАЛАХАНОВА Т. В.³, канд. техн. наук, с. н. с.,
САФРОНОВА О. А.^{4*}, с. н. с.,
ДЕМЕТЬЄВА Ж. А.⁵, н. с.

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

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

³ Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{4*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁵ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-02X8-06X1

Анотація. *Актуальність роботи.* Для сучасного залізничного транспорту актуальним завданням стало збільшення міцності та службової надійності деталей рухомого складу, зокрема, залізничних осей. Відомо, що неоднорідність розподілу хімічних елементів у структурі вуглецевих сталей конструкційного класу утворюється переважно під час їх кристалізації та в подальшому може впливати на кінцевий структурний стан та комплекс властивостей. **Мета** – дослідження впливу хімічного складу сталей для залізничних осей на рівномірність структури. **Методика.** В лабораторних умовах виготовлено дослідні зливки різного хімічного складу з різною кількістю та відношенням основних хімічних елементів у межах марки ОС та EA1N. Зеренну структуру досліджували на мікрошліфах після травлення ніталем. Хімічну неоднорідність («сліди» дендритної структури) – розподіл хімічних елементів у мікроструктурі зразків литої заготовки виявляли травленням у гарячому розчині пікрату натрію. Металографічний аналіз виконано на світловому (оптичному) мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss». **Наукові результати.** Визначено вплив зміни хімічного складу вуглецевої сталі, яка призначена для виготовлення залізничних осей, на особливості формування феритно-перлітної неоднорідності та різнозернистості. Показано, що в зразках сталей, які відповідають марці EA1N з меншим вмістом вуглецю, розподіл фаз нерівномірний. Наведено пояснення механізму формування такої структури з погляду двох теорій. У зразках сталей із середнім вмістом вуглецю, що відповідають сталі марки ОС, розподіл перлітної та феритної фази більш рівномірний, встановлено зв'язок розміру та ступінь затемнення перлітних ділянок із порядком колишніх дендритних гілок. За результатами кількісного аналізу кінцевої зеренної структури встановлено, що сталь ОС із середнім вмістом вуглецю за різного відношення Mn/Si має більш рівномірну зеренну структуру. Сталь EA1N із меншим вмістом вуглецю має виражену різнозернистість, у разі збільшення відношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна. **Практичні результати.** Підвищення однорідності кінцевої мікроструктури сприяє підвищенню показників пластичності та в'язкості сталі, що безпосередньо впливає на надійність та довговічність залізничних осей.

Ключові слова: вуглецева сталь; хімічний склад; неметалеві включення; розмір зерна; перліт; ферит; ліквіація

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF RAILWAY AXLE STEEL ON THE UNIFORMITY OF THE FINAL MICROSTRUCTURE

BABACHENKO O.I.¹, *Dr Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
KONONENKO G.A.², *Dr Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
BALAKHANOVA T.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
SAFRONOVA O.A.^{4*}, *Sen. Res.*,
DEMETIEVA Zh.A.⁵, *Res.*

¹ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

² Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Department of Heat Treatment of Metal for Mechanical Engineering, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{4*} Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁵ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-02X8-06X1

Abstract. The relevance of the work. For modern railway transport, increasing the strength and operational reliability of rolling stock parts, in particular railway axles, is an urgent task. It is known that the inhomogeneity of the distribution of chemical elements in the structure of structural grade carbon steels is formed mainly during their crystallization and may subsequently affect the final structural state and set of properties. **Purpose.** Study of the influence of the chemical composition of steels for railway axles on the uniformity of the structure. **Methodology.** Experimental ingots of different chemical compositions with different amounts and ratios of the main chemical elements within the range of OS and EA1N were produced in laboratory conditions. The grain structure was studied on microsections after etching with nital. Chemical inhomogeneity ("traces" of the dendritic structure) – the distribution of chemical elements in the microstructure of cast samples was detected by etching in a hot solution of sodium picrate. Metallographic analysis was performed on a light (optical) microscope "Axiovert 200 M MAT" manufactured by "Carl Zeiss". **The results.** The effect of changing the chemical composition of carbon steel, which is intended for the manufacture of railway axles, on the peculiarities of the formation of ferrite-pearlite heterogeneity and grain size is determined. It is shown that in samples of steels corresponding to the EA1N brand with a lower carbon content, the distribution of phases is uneven. The mechanism of formation of such a structure is explained from the point of view of two theories. In samples of steels with an average carbon content, which correspond to steel of the OS grade, the distribution of the pearlite and ferrite phases is more uniform, the relationship between the size and the degree of darkening of the pearlite areas with the order of the former dendritic branches has been established. Based on the results of the quantitative analysis of the final grain structure, it was established that OS steel with an average carbon content at different Mn/Si ratios has a more uniform grain structure. EA1N steel with a lower carbon content has a pronounced grain size, with an increase in the Mn/Si ratio, the largest maximum of the dependence of the distribution shifts to a larger grain size (smaller number). **Practical results.** Increasing the homogeneity of the final microstructure contributes to increasing the plasticity and viscosity of steel, which directly affects the reliability and durability of railway axles.

Keywords: carbon steel; chemical composition; non-metallic inclusions; grain size; pearlite; ferrite; liquation

Вступ. Для сучасного залізничного транспорту властиве поступове зростання швидкостей руху, перехід на довгі тягові плечі та безупинні пробіги, збільшення ваги потягів і поліпшення використання вагонів. Швидкість руху пасажирських поїздів на магістральних напрямках досягає

120–140 км/год., а на деяких лініях – до 160 км/год., вантажних поїздів – до 80–100 км/год. За рахунок підвищення вантажності вагонів підвищується фактичне навантаження на вісь, а збільшення швидкості спричинює зростання динамічного впливу колії та рухомого

складу, а також числа зміни циклів напружень в одиницю часу, що викликає підвищення напружень у деталях вагонів і локомотивів, а також рейкового шляху. Все це визначає необхідність збільшення міцності та службової надійності вузлів і деталей рухомого складу.

Найважливішими завданнями вчених-металургів сьогодні, в умовах ринкової економіки і жорсткої конкуренції, стали підвищення якості та забезпечення споживачів надійною і довговічною металопродукцією, а також підтримка вітчизняних металургійних підприємств. У рамках цієї науково-дослідницької роботи ці завдання можуть бути вирішені стосовно такої металопродукції відповідального призначення, як осі для рухомого складу залізниць.

Як уже відомо, неоднорідність розподілу хімічних елементів у структурі вуглецевих сталей конструкційного класу утворюється переважно за їх кристалізації, під час твердіння злитка або безперервною заготовки.

Мета роботи – дослідження впливу хімічного складу сталей на рівномірність структури осевих заготовок

Методика. У роботі використовували лабораторну індукційну плавильну піч, як найбільш підходящий для цієї мети агрегат, до складу якої входять плавильний модуль ІПЕ-0.01 і генератор ВТГ-20-22. Її елементи розміщені в умовах лабораторної бази ІЧМ (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки в умовах лабораторної бази ІЧМ

Мікроскопічний аналіз виконано на спеціально підготовленій шліфованій та полірованій до дзеркального блиску поверхні (шліфі) досліджуваних зразків методом хімічного травлення. Шліфування виконували на спеціальній шліфувальній машині, на п'яти номерах шліфувального паперу.

Хімічну неоднорідність («сліди» дендритної структури) – розподіл хімічних елементів у мікроструктурі зразків литої заготовки виявляли травленням у гарячому розчині пікрату натрію. Цей реактив виявляє хімічну мікронеоднорідність кремнію (дендритну ліквіацію, твердофазну сегрегацію), приводячи до потемніння ділянок з підвищеним його вмістом [1–2].

Металографічний аналіз виконано на світловому (оптичному) мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss».

Основні результати досліджень. Існує залежність між відмінностями у швидкостях зароджування фериту/перліту в смугах різного мікрохімічного складу [3]. За різниці швидкості зароджування (перетворення) нижче ніж 6 % утворення феритно-перлітних смуг може бути попередженим [4].

У випадку, коли температура відпалу перевищує мінімальну температуру переходу A_1 , вуглець повинен дифундувати на критичній відстані, більшій, ніж половина ширини зони з високою температурою A_3 .

За температур відпалу нижче мінімальної температури переходу A_1 слід нехтувати фактором зростання фериту при утворенні мікроструктурних смуг. Моделювання сегрегації розчинених речовин на границі зерен і границі розділу аустеніт–ферит у залізі на основі перших принципів підтверджує вплив основних легувальних елементів (наприклад, Nb, Mo і Mn) на зростання зерна, рекристалізацію і фазове перетворення в сталях [5]. У праці [6] вивчали схильність до ліквіації елементів за кристалізації сталі 45. Показано, що середні рівноважні

коефіцієнти розподілу C, Si, Mn, P і S складають 0,307, 0,737, 0,695, 0,18 і 0,021 відповідно. Тобто S має найбільшу тенденцію до сегрегації, за нею послідовно йдуть P і C.

Показано [7], що гетерогенний розподіл кремнію (Si), марганцю (Mn) і хрому (Cr), пов'язаний з мікросегрегацією в процесі лиття, має великий вплив на кінцеву мікроструктуру. Перетворення починається в дендритних зонах, де концентрація Mn нижча, а потім поширюється на міждендритні. Оскільки Mn знижує активність вуглецю, міждендритні області з більш високою концентрацією Mn збагачуються вуглецем (C), і, таким чином, ці зони містять більшу кількість залишкового аустеніту і мартенситу, що викликає неоднорідність мікроструктури.

У статті [8] наведено підхід до проектування сплаву (так званих сталей з «нейтралізованою сегрегацією») для усунення смугастості другої фази шляхом використання спільної сегрегації як аустенітних, так і феритних стабілізаторів для зменшення локальної мінливості стабільності другої фази. Для зменшення впливу локальної стабілізації складу від Mn на аустеніт, що спричинює утворення двофазної структури, рівні Mn були знижені в модифікованій сталевій композиції. Кремній був ідентифікований як відповідне легувальне доповнення для

компенсації більш низьких рівнів Mn для досягнення аналогічного рівня зміцнення твердого розчину.

Відносні рівні Si і Mn, необхідні в модифікованій сталі, були визначені врівноваженням стабілізації фериту із Si і стабілізації аустеніту з Mn. Нова композиція для отримання «нейтралізованих» сталей має нижчий вміст Mn і більш високий вміст Si, зберігаючи при цьому вміст C (для отримання такого ж рівня зміцнення сталей як з перлітною фазою (у разі отримання гарячекатаного матеріалу) і з мартенситом (у кінцевому термообробленому матеріалі).

До того експериментальна сталь містила додатково Cr (для поліпшення прогартовуваності) і Nb для додаткового модифікування композиції. В сталі спостерігали рівномірний розподіл другої фази як у гарячекатаному, так і загартовуваному стані без утворення структурної смугастості. Однак у цій роботі не розглядали ані зміну макроструктури, ані розподіл та тип наявних неметалевих включень.

У процесі лиття поступово виникають такі дефекти як неметалеві включення, усадна порожнина і пористість, макросегрегація. Макронеоднорідність має серйозний вплив на кінцеву якість продукту і стає більш впливовою зі збільшенням розміру зливка.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних плавів

№ п/п	Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % ваг.					
		C	Si	Mn	Mn/Si	P	S
1	EA1N	0,36	0,34	0,63	1,85	0,019	0,025
2	(EN 13261)	0,39	0,12	0,6	5	0,021	0,024
3	OC	0,52	0,42	0,69	1,64	0,012	0,006
4	(ДСТУ 31334)	0,49	0,22	0,95	4,32	0,021	0,032

Тому для з'ясування впливу зміни хімічного складу вуглецевої сталі, яка призначена для виготовлення залізничних осей, на особливості формування феритно-перлітної неоднорідності та різнозернистості, а також визначення основних механізмів, були виготовлені

дослідні зливки зі змінюваним хімічним складом у межах марочного з двох марок сталі, призначених для виготовлення залізничних осей. Хімічний склад дослідних зливок наведено в таблиці 1

Від донної частини дослідних зливок відібрали проби висотою 80 мм.

У лабораторних умовах проведено гарячу пластичну деформацію дослідних зливоків шляхом осаджування на величину 50 %. Температура нагрівання проб під гарячу деформацію дорівнювала 1 240 °С.

Наступним етапом проведення експериментальної частини дослідження була реалізація певних режимів металообробки, які б із великою достовірністю моделювали проведення нормалізації чорнових осей з даних марок сталі. Для проведення нормалізації дослідних зливоків важливо було забезпечити їх рівномірний нагрів і рівномірне подальше охолодження на теплому спокійному повітрі. Температуру нагрівання підібрано відповідно до марки сталі і хімічного складу дослідних зливоків (у діапазоні 820–850 °С).

Мікроструктурним аналізом встановлено, що дослідні зразки 1 та 2 (рис. 2) після проведення нормалізації, що відповідають хімічному складу EA1N, розподіл фаз нерівномірний. Такий розподіл фаз можна пояснити з погляду двох теорій. Неметалеві включення у вуглецевих сталях представлені основними двома групами – кисневі та сульфідні. Розташовані вони у міждендритному просторі.

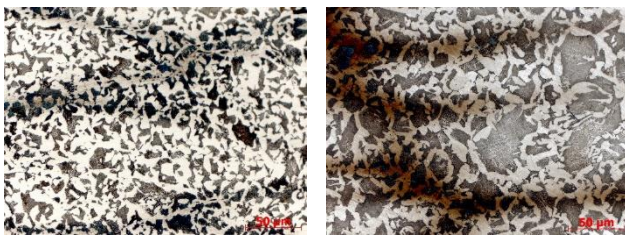


Рис. 2. Структура експериментальних зразків 1 (а) та 2 (б) зі сталі EA1N після гарячого деформування та нормалізації, $\times 200$

Найрозповсюдженішою є теорія про істотне зниження концентрації марганцю навколо сульфідних включень, що викликає зародження фериту навколо них. Вуглець при цьому відтискається далі у колишні дендритні ділянки і там під час подальшого переохолодження формуються колонії перліту. В просторі осі дендриту досить стала концентрація

елементів, і тому зростанню перлітних колоній нічого не перешкоджає і з'являються великі перлітні ділянки.

В експериментальній сталі 3 марки ОС залежності нерівномірності розподілу фаз від вмісту сульфідних включень не виявлено (рис. 3).

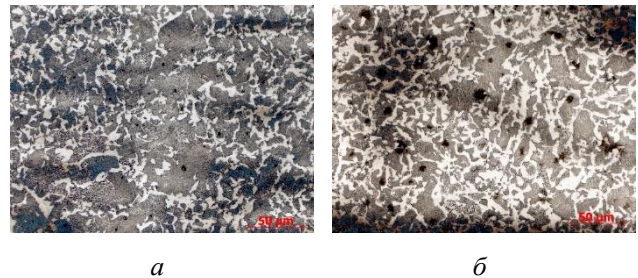


Рис. 3. Структура експериментальних зразків 3 (а) та 4 (б) зі сталі ОС після гарячого деформування та нормалізації, $\times 200$

Навколо них не виявлено жодної зміни структури, розподіл феритно-перлітної фази рівномірний. Сульфідні включення знаходяться у феритній фазі, але характерного феритного облямування навколо них не виявлено. Згущення перлітної фази у міждендритних ділянках також не спостерігаються. У міждендритних ділянках існує тільки темніший колір перліту, що пояснюється більш низькою температурою перетворення аустеніту на ферит та перліт.

У ліквацийних ділянках формуються більш дрібні колонії перліту, при чому спостерігається залежність від порядку колишніх дендритних гілок. У ділянках, що відповідають основним гілкам, формуються найбільші ділянки перліту. Скоріше за все це пов'язано саме з нерівномірним зростанням зерна аустеніту в результаті впливу хімічної неоднорідності, нерівномірного деформування кристалітів аустеніту у дендритних і міждендритних ділянках у зв'язку з різними їх реологічними властивостями.

Оскільки попередньо [9] було встановлено вплив співвідношення вмісту Si/Mn на дендритну структуру сталей для залізничних осей, необхідно було дослідити також зв'язок вмісту вуглецю та

співвідношення інших основних елементів у вуглецевій сталі на зеренну структуру (рис. 4).

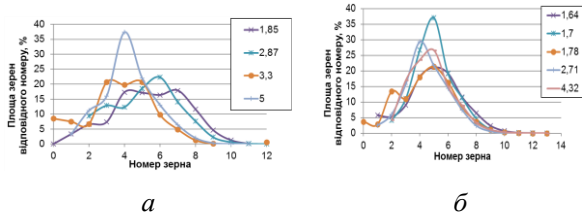


Рис. 4. Розподіл зерен за номерами залежно від відношення Mn/Si: а – в сталі марки EA1N; б – в сталі марки OC

Установлено, що сталь OC із середнім вмістом вуглецю має більш рівномірну кінцеву зеренну структуру: майже за всіх варіантів співвідношення Mn/Si розподіл розміру зерен має один максимум, який орієнтовно відповідає 4–5-му номеру. Для сталі EA1N з меншим умістом вуглецю залежності розподілу зерен за розмірами мають по два чіткі максимуми, що вказує на різнозернистість зі значною кількістю зерен великого розміру. При цьому можна

бачити, що зі збільшенням співвідношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна.

Висновки

1. Визначено, що в сталях із середнім вмістом вуглецю формується більш рівномірне розподілення структурних складових – фериту та перліту, ніж у сталях з меншим вмістом вуглецю.

2. За результатами кількісного аналізу кінцевої зеренної структури встановлено, що сталь OC з середнім вмістом вуглецю за різного відношення Mn/Si має більш рівномірну зеренну структуру.

Сталь EA1N з меншим вмістом вуглецю має виражену різнозернистість, за збільшення відношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штефан Е. В. Непрерывная разливка стали. Донецк : ДонНТУ, 2011. 482 с.
2. Babachenko O., Balakhanova T., Safronova O., Podolskyi R. Specific features of the formation of structural heterogeneity in carbon steel depending on manufacturing technique. *Science and Innovation*. 2023. № 19 (4). Pp. 47–56.
3. Zeng Q., Xiao C., Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021. № 11 (3). Pp. 1–10.
4. Tariq Islam, Hossain MMA Rashed. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In book : Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Pp. 1–14.
5. Hongchun Zhu, Huabing Li, Zhiyu He, Hao Feng, Zhouhua Jiang, Tong He. Effect of Pressure on Dendrite Structure and Characteristics of Carbides during Solidification Process of H13 Die Steel Ingot. *ISIJ International*. 2021. Vol. 61, № 6. Pp. 1889–1898.
6. Stead J. E. Some of the ternary alloys of iron, carbon and phosphorous. *J. Soc. Chem. Ind.* 1913. № 33. Pp. 173–184.
7. Murugan V. K., Mathews P. K. Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2, № 4. Pp. 945–954.
8. Calik A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. *International Journal of Physical Sciences*. 2009. Vol. 4, № 9. Pp. 514–518.
9. Бабаченко О. І., Балаханова Т. В., Сафронова О. А., Кононенко Г. А. Дослідження впливу співвідношення вмісту Si/Mn на дендритну структуру сталей для залізничних осей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022. № 1. С. 6–12.

REFERENCES

1. Smyrnov A.N., Kuberskyj S.V. and Shtefan E.V. *Neprerivnaya razlyvka staly`* [Continuous casting of steel]. Donetsk : DonNTU Publ., 2011, 482 p. (in Russian).
2. Babachenko O., Balakhanova T., Safronova O. and Podolskyi R. Specific features of the formation of structural heterogeneity in carbon steel depending on manufacturing technique. *Science and Innovation*. 2023, no. 19 (4), pp. 47–56.
3. Zeng Q., Xiao C. and Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021, no. 11 (3), pp. 1–10.

4. Tariq Islam and Hossain MMA Rashed. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In book : Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Pp. 1–14.

5. Hongchun Zhu, Huabing Li, Zhiyu He, Hao Feng, Zhouhua Jiang and Tong He. Effect of Pressure on Dendrite Structure and Characteristics of Carbides during Solidification Process of H13 Die Steel Ingot. ISIJ International. 2021, vol. 61, no. 6, pp. 1889–1898.

6. Stead J.E. Some of the ternary alloys of iron, carbon and phosphorous. J. Soc. Chem. Ind. 1913, no. 33, pp. 173–184.

7. Murugan V.K. and Mathews P.K. Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 945–954.

8. Calik A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. International Journal of Physical Sciences. 2009, vol. 4, no. 9, pp. 514–518.

9. Babachenko O.I., Balahanova T.V., Safronova O.A. and Kononenko G.A. *Doslidzhennya vplivu spivvidnoshennya vmistu Si/Mn na dendritnu strukturu stalej dlya zaliznichnih osey* [Investigation of the infusion of alloying instead of Si/Mn on the dendritic structure of steels for sliding axles]. *Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]. 2022, no. 1, pp. 6–12. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.04.2024.