Metallophysics and Advanced Technologies
Металофіз. новітні технол.
Metallofiz. Noveishie Tekhnol.
2024, vol. 46, No. 11, pp. 1085–1093
https://doi.org/10.15407/mfint.46.11.1085
Reprints available directly from the publisher

© 2024 G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Published by license under
the G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics–
N.A.S. of Ukraine Publishers imprint.
Printed in Ukraine.

PACS numbers: 61.05.cp, 61.72.Ff, 61.72.Hh, 64.75.Op, 81.05.Bx, 81.40.Cd, 81.40.Lm

Вплив мікролеґування Титаном на структуроутворення та механічні властивості криць

Н. Ю. Філоненко[*,**], О. І. Бабаченко[*], Г. А. Кононенко[*], О. М. Галдіна[**]

[*]*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,*
пл. Академіка Стародубова, 1,
49107 Дніпро, Україна
[**]*Дніпровський державний медичний університет,*
вул. Володимира Вернадського, 9,
49044 Дніпро, Україна

Наразі у зв'язку з розвитком промисловости є потреба в одержанні виробів із криці, які використовують за великого навантаження. Як відомо, для одержання криць з підвищеним комплексом механічних, службових та експлуатаційних властивостей використовують найбільш поширені підходи: реґулюють вміст Карбону, визначають оптимальний вміст базових елементів, режими термічного оброблення та мікролеґування. Метою роботи є дослідження особливостей мікроструктури, структурних складових, мікросеґреґації під час мікролеґування Титаном криць з підвищеним вмістом Карбону у 0,70–0,76% мас. Досліджувалися зразки після лиття та після гарячої деформації з наступним термічним обробленням. Застосовували металографічну аналізу, визначення механічних властивостей, хемічну і рентґеноструктурну аналізи. Дослідження, що були проведені в даній роботі, показали, що мікролеґування криці Титаном сприяє зменшенню розмірів зерна та дефектности структури, приводить до зменшення розмірів дендритів твердого розчину γ-заліза, міждендритної віддалі у порівнянні з крицею без мікролеґування. Крім цього, пока-

Corresponding author: Nataliya Yuriyivna Filonenko
E-mail: natph2016@gmail.com

[*]*Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute, NAS of Ukraine,*
1 Academician Starodubov Sqr., UA-49050 Dnipro, Ukraine
[**]*Dnipro State Medical University,*
9 Volodymyr Vernadsky Str., UA-49044 Dnipro, Ukraine

Citation: N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, H. A. Kononenko, and O. M. Haldina, The Effect of Titanium Microalloying on the Structure Formation and Mechanical Properties of Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 11: 1085–1093 (2024) (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.46.11.1085

зано, що використання такого мікролеґування приводить до збільшення кількости видів утворених фаз. За результатами рентґеноструктурної аналізи було виявлено додатково фази MnSi, $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$, FeSiC та TiC у порівнянні з крицею без мікролеґування Титаном. Одержаний результат уможливлює зробити висновок про те, що Титан зменшує розчинність Карбону, Манґану та Силіцію в структурних складових. Після повного циклу оброблення криці, мікролеґовані Титаном, мали підвищений комплекс механічних властивостей (підвищення границі міцности та границі плинности на $\cong 10\%$ у порівнянні з крицею без мікролеґування Титаном).

Ключові слова: мікролеґування Титаном, криця, мікроструктура, деформаційне та термічне оброблення, механічні властивості.

Currently, in the view of industrial development, there is a need to obtain steel products designed for heavy loads. As known, the most common approaches are used to obtain steels with an advanced set of mechanical, service, and operational properties: regulating the carbon content, determining the rational content of basic elements, heat-treatment and microalloying regimes. The purpose of the paper is to study the features of the microstructure, structural components, and microsegregation during titanium microalloying of steels with an increased carbon content of 0.70–0.76% wt. Samples are studied after casting and hot deformation with subsequent heat treatment. Metallographic analysis, mechanical test, chemical analysis, x-ray diffraction method are used. The studies carried out in this work show that the microalloying of steel with titanium contributes to the reduction of grain sizes and structure imperfection, leads to a decrease in the size of dendrites of γ-iron solid solution and the interdendritic distance, compared to steel without microalloying. In addition, it is shown that the use of such microalloying leads to an increase in the number of types of the phases formed. According to the results of x-ray diffraction analysis, the following phases are additionally detected: MnSi, $Fe_{0.4}Mn_{3.6}C$, FeSiC and TiC, in comparison with steel without titanium microalloying. The obtained result enables to conclude that titanium reduces the solubility of carbon, manganese, and silicon in structural components. After a full circle processing, steels microalloyed with titanium have an improved set of mechanical properties (increase in strength limit and yield stress by $\cong 10\%$, compared to steel without titanium microalloying).

Key words: microalloying with titanium, steel, microstructure, deformation and heat treatment, mechanical properties.

(Отримано 28 травня 2024 р.; остаточн. варіянт — 9 липня 2024 р.)

1. ВСТУП

Сучасні потреби використання металевих виробів у промисловості в умовах підвищеного навантаження потребують одержання криць з поліпшеним комплексом механічних, експлуатаційних і службових властивостей. Одним із підходів до вирішення цього питання є вибір оптимального вмісту базових хемічних елементів, мікролеґу-

вання та термічне оброблення.

Відомо, що мікролеґуванням можна впливати на розмір зерна, сприяти збільшенню кількости нанорозмірних виділень, що може значно підвищити показники міцности та вплинути на пластичність і в'язкість криці [1]. Як відомо, мікролеґування Титаном сприяє утворенню включень TiC, TiN і TiC(N) за високих температур. Завдяки високій температурі топлення, високій твердості частинки TiC(N) широко використовуються для поліпшення механічних властивостей матеріялів за рахунок дисперсійного зміцнення; але можливе неконтрольоване утворення вторинних фаз [2, 3]. Термічним обробленням криць можна контролювати морфологію, розміри та розподіл включень на різних стадіях виробництва [4]. Було виявлено, що мікролеґування криці Ті приводить до подрібнення зерна та збільшення кількости перліту. На думку авторів [5], подрібнення зерен фериту середньовуглецевої криці відбувається за рахунок утворення нітридів і карбідів Титану через зменшення розчинности Титану в аустеніті з пониженням температури [2, 5]. Титан має значний позитивний вплив на твердість, міцність та ударну в'язкість і приводить до пониження температури ліквідусу та збільшення температури утворення аустеніту [2, 5, 6]. Таким чином, одним із важливих питань за мікролеґування Титаном криці є контроль утворення кількости, форми, розміру та розподілу фаз, що впливає на механічні властивості криць.

Відомо, що леґування криць Силіцієм може значно збільшити міцність, покращити ударну в'язкість, а при леґуванні Манґаном збільшується міцність криць [7].

Таким чином, мікролеґування Ті може бути широко застосоване для виробництва високоміцної криці з підвищеним комплексом механічних властивостей для різних металевих виробів.

Метою роботи є дослідження особливостей мікроструктури, утворення структурних складових, механічних властивостей за мікролеґування Титаном криць з підвищеним вмістом Карбону (0,70–0,76% мас.).

2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі проводили дослідження криць (табл. 1).

Дослідні криці були витоплені з застосуванням топильного аґреґату ІТПЕ-0,01 з високочастотним джерелом струму ВТГ-20-22. Гаряче пластичне деформування (ГПД) проб криць проводили після нагрівання до температури $1260 \pm 10^{\circ}$C і витримки протягом 2 годин зі ступенем деформації у $\cong 50\%$ та охолодженням на спокійному повітрі до кімнатної температури. З деформованих виливків вирізали заготовки зразків розміром у $10\times10\times20$ см^3 та виконували термічне оброблення (ТО): нагрів до температури у $900 \pm 10^{\circ}$C й охо-

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад дослідних криць, % мас.

TABLE 1. Chemical composition of experimental steels, % wt.

Маркування	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Al	Ti	V
Криця № 1	0,71	0,36	0,82	0,013	0,009	0,014	0,21	0,012	< 0,060	0,055
Криця № 2	0,72	0,33	0,85	0,010	0,005	0,010	0,15	0,016	0,013	0,09

лодження зі швидкістю у 2,5°C/с. Після охолодження проводили відпуск за температури у 300 ± 10°C тривалістю в 1 годину.

Металографічні шліфи криць виготовляли за стандартними методиками, щавлення поверхні зразків здійснювали гарячим розчином пікрату Натрію (для визначення ділянок із сеґреґацією Силіцію та Манґану, які формуються під час кристалізації та розташовані у міждендритних просторах) і ніталом. Для визначення хемічного складу криць використовували фотоелектричну спектральну аналізу. Дослідження міжпластинної віддалі виконували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 та за допомогою оптичних мікроскопів виробництва компанії «Carl Zeiss» «Neophot-32» і «Axiovert 200 M MAT». Механічні випробування зразків криць проводили із застосуванням машини на розрив типу TTDL «Instron». Рентґеноструктурну аналізу здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому FeK_α-випроміненні.

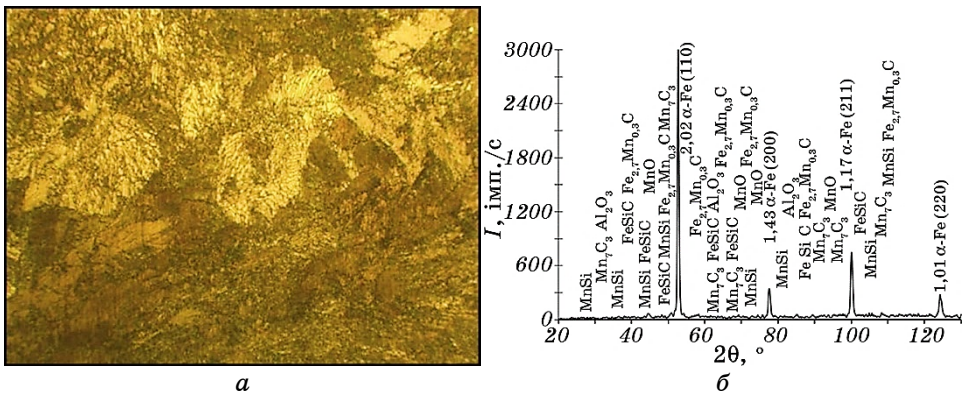
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроструктура криці № 1 в литому стані мала перлітну структуру (рис. 1, *а*). За результатами рентґеноструктурної аналізи було виявлено фази α-Fe, $Fe_{2,7}Mn_{0,3}C$, FeSiC, MnSi, Mn_7C_3 й оксиди MnO, Al_2O_3 в невеликій кількості (рис. 1, *б*).

Мікроструктура криці № 2 має менший розмір перлітних колоній і більшу кількість видів фаз α-Fe, MnSi, карбідів $Fe_{2,7}Mn_{0,3}C$, $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$, FeSiC, Mn_7C_3, TiC й оксидів MnO, Al_2O_3 у порівнянні з крицею № 1 (рис. 2).

Таким чином, за порівняння результатів рентґеноструктурної аналізи криць № 1 і № 2 видно, що мікролеґування криць Титаном приводить до збільшення кількости включень карбідів, що узгоджується з результатами, наведеними в роботі [8]. Одержаний результат можна пояснити тим, що мікролеґування криці № 2 Титаном і Нітроґеном викликає зменшення розчинности Силіцію, Манґану та Карбону в структурних складових [4, 9].

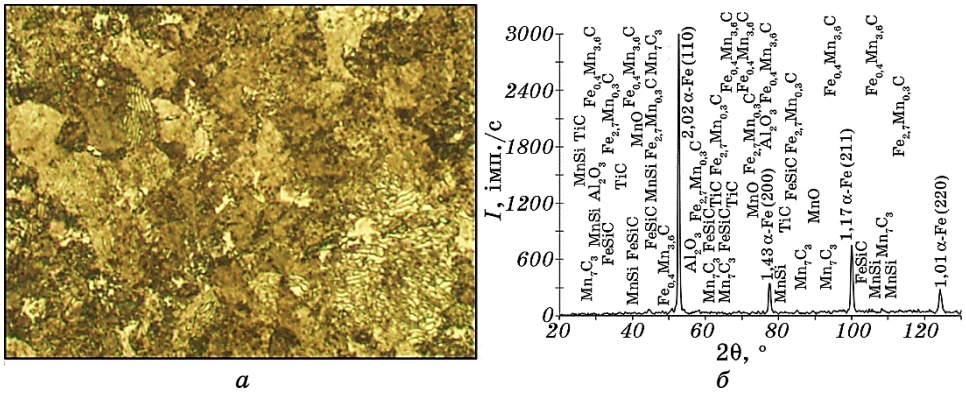
Окрім цього, розчинність Карбону, Манґану та Силіцію буде меншою у порівнянні з розчинністю в бінарних і тернарних системах цих елементів [10].



а *б*

Рис. 1. Мікроструктура зливка, ×1000 (*а*); дифрактограма (*б*) криці № 1.

Fig. 1. Microstructure of the ingot, ×1000 (*а*); diffractogram (*б*) of steel No. 1.



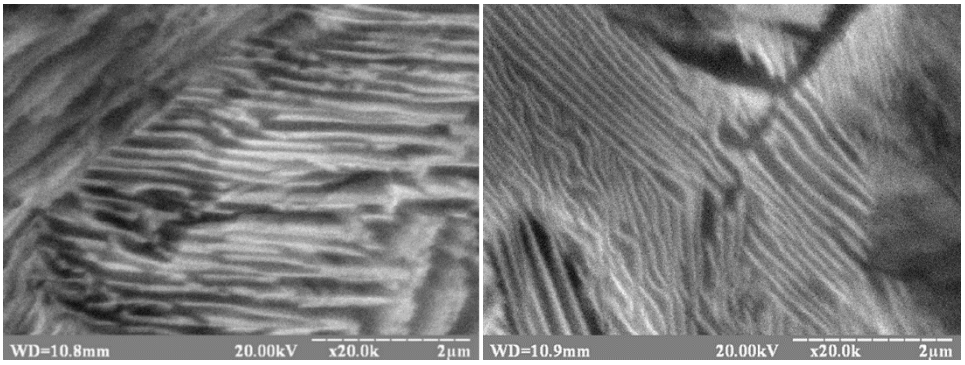
а *б*

Рис. 2. Мікроструктура зливка, ×1000 (*а*); дифрактограма (*б*) криці № 2.

Fig. 2. Microstructure of the ingot, ×1000 (*а*); diffractogram (*б*) of steel No. 2.

Дослідження впливу мікролеґування Титаном на мікроструктуру показали, що відбувається утворення перліту з меншою середньою віддаллю між пластинами у порівнянні з крицею № 1 (рис. 3). Для криці № 1 середня віддаль між пластинами була у 0,23 мкм, а криці № 2 — 0,201 мкм, що узгоджується з результатами, наведеними в роботі [11].

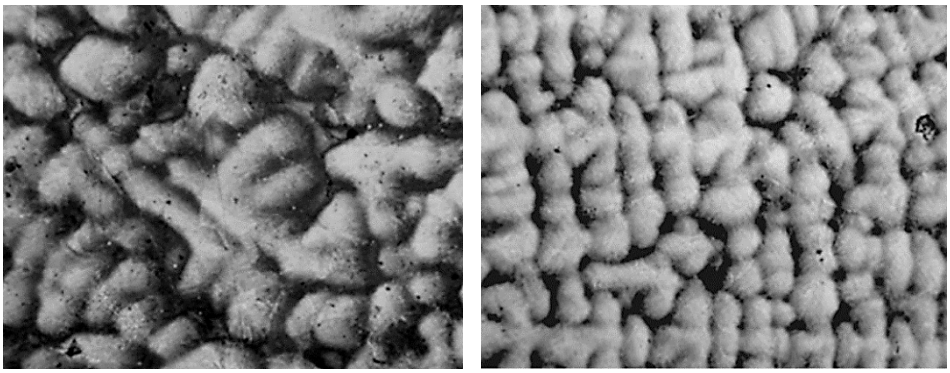
Дослідження дендритів твердого розчину γ-заліза за місцями сеґреґації елементів, що формуються під час кристалізації, після щавлення поверхні зразків гарячим розчином пікрату Натрію показали, що криця № 1 містить дендрити більшого розміру (середній розмір дендритів — 8–20 мкм), у порівнянні з крицею № 2 (середній



а *б*

Рис. 3. Мікроструктура криць: № 1 (*а*), № 2 (*б*).

Fig. 3. Microstructure of steels: No. 1 (*а*), No. 2 (*б*).



а *б*

Рис. 4. Ділянки з сеґреґацією Силіцію та Манґану, які формуються під час кристалізації та розташовані у міждендритних просторах; щавлення пікратом Натрію: криця № 1 (*а*), криця № 2 (*б*), ×100.

Fig. 4. Areas with segregation of silicon and manganese, which are formed during crystallization and located in the interdendritic spaces; etching with sodium picrate: steel No. 1 (*а*), steel No. 2 (*б*), ×100.

розмір дендритів — 8–14 мкм) (рис. 4).

Дендрити криці № 1 мали осі першого та розвинені осі другого порядку, а дендрити криці № 2 — в більшій кількості осі першого порядку та слабко розвинені осі другого порядку. Дослідження міждендритної відстані дослідних зразків показали, що міждендритна відстань у криці № 1 буде більшою, ніж у криці № 2 (рис. 4).

За інтенсивністю забарвлення видно, що мікролеґування Титаном зменшує мікросеґреґацію Манґану й Силіцію та їхній вміст у

міждендритному просторі, що надає пояснення стосовно утворення більшої кількости включень, які містять Манґан і Силіцій.

Параметри тонкої кристалічної будови дослідних зразків (ступінь тетрагональности кристалічної ґратниці, густина дислокацій, розмір областей когерентного розсіяння, величина викривлень кристалічної ґратниці другого роду) у стані після ГПД та ТО визначено з використанням методики рентґенівської структурної аналізи. Мікролеґування криці № 1 Титаном приводить до зменшення викривлень другого роду та густини дислокацій (табл. 2), що свідчить про зменшення дефектности структури [12].

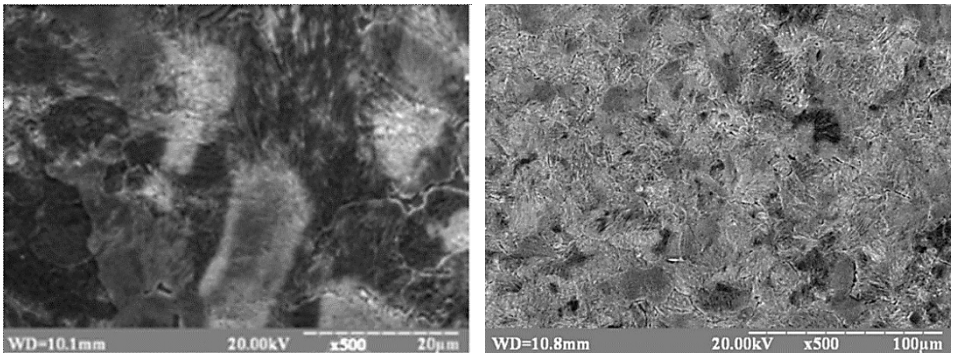
На рисунку 5 представлено мікроструктуру після повного циклу деформаційно-термічного оброблення. Мікроструктура криці № 2 мала більш дрібнодисперсну структуру, — менший розмір зерен, рівномірний розподіл включень і ділянок мікросеґреґації, — у порівнянні з крицею № 1.

Дослідження механічних властивостей криць показали, що для

ТАБЛИЦЯ 2. Параметри кристалічної будови досліджуваних зразків.

TABLE 2. Parameters of the crystal structure of the studied samples.

Маркування	Параметер ґратниці a, Å	Розмір блоків мозаїки L, Å	Викривлення другого роду M, %	Густина дислокацій (110) D, см$^{-1}$	Густина дислокацій (220) D, см$^{-1}$
Криця № 1	2,8642	1871	$1{,}25\cdot10^{-3}$	$4{,}93\cdot10^{10}$	$36{,}5\cdot10^{10}$
Криця № 2	2,8645	1875	$0{,}85\cdot10^{-3}$	$4{,}82\cdot10^{10}$	$22{,}9\cdot10^{10}$



а *б*

Рис. 5. Мікроструктура криць після повного циклу деформаційного й термічного оброблення: криця № 1 (*а*), криця № 2 (*б*).

Fig. 5. Microstructure of steels after a full cycle of deformation and heat treatment: steel No. 1 (*а*), steel No. 2 (*б*).

ТАБЛИЦЯ 3. Механічні властивості зливків криці дослідного складу після гарячої пластичної деформації та наступного термічного оброблення.

TABLE 3. Mechanical properties of steel ingots of experimental composition after hot plastic deformation and subsequent heat treatment.

Маркування	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_{0,2}$, Н/мм^2	Відносне видовження δ, %	Відносне звуження ψ, %
Криця № 1	1094,4	636,6	14,2	36,51
Криця № 2	1120,4	665,0	12,6	21,2

криці № 2 границі міцности та плинности мають вищі показники, а відносне видовження та звуження мають більші значення для криці № 1 (табл. 3), що пояснюється особливостями структури за мікролеґування Титаном.

Таким чином, мікролеґування Титаном приводить до збільшення дисперсности структурних складових, збільшення кількости видів дрібнодисперсних включень, більш рівномірного розподілу ділянок мікросеґреґації Карбону, Манґану та Силіцію.

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що мікролеґування криці Титаном приводить до: збільшення кількости видів включень, — $Fe_{2,7}Mn_{0,3}C$, $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$, FeSiC, Mn_7C_3, TiC, — та їхньої дисперсности за рахунок зменшення розчинности Манґану та Силіцію в структурних складових; утворення більш однорідних за розміром дендритів твердого розчину γ-заліза та зменшення ділянок мікросеґреґації Карбону, Манґану та Силіцію; зменшення викривлень другого роду та густини дислокацій у порівнянні з показниками криці, яку не мікролеґовано Титаном.
2. Встановлено, що мікролеґування криці Титаном сприяє: зменшенню розмірів зерен, більш рівномірному розподілу включень, збільшенню границь міцности та плинности на $\cong 10\%$ після деформаційно-термічного оброблення, — гарячого пластичного деформування після нагрівання до температури у 1260 ± 10°C зі ступенем деформації у $\cong 50\%$ та подальшого нагрівання до температури у 900 ± 10°C й охолодження зі швидкістю у 2,5°C/с, відпуску за температури у 300 ± 10°C тривалістю в 1 годину, — у порівнянні з крицею без мікролеґування Титаном.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. J. Chen, L. J. Li, Z. W. Peng, X. D. Huo, and H. B. Sun, *J. Mater. Res. Tech-*

nol., **10**: 580 (2021).
2. S. Wang, Z. Gao, G. Wu, and X. Mao, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **29**: 645 (2022).
3. S. Li, H. Yu, Y. Lu, J. Lu, W. Wang, and S. Yang, *Wear*, **474–475**: 203647 (2021).
4. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, H. A. Kononenko, and O. A. Safronova, *Mater. Sci.*, **58**: 190 (2022).
5. H. S. El-Faramawy, S. N. Ghali, and M. M. Eissa, *J. Miner. Mater. Char. Eng.*, **11**: 1108 (2012).
6. Q. Ren, T. Liu, S. Baik, Z. Mao, B. W. Krakauer, and D. N. Seidman, *J. Mater. Sci.*, **56**: 6448 (2021).
7. Z. Zhu, Y. Liang, and J. Zou, *Materials*, **13**, Iss. 23: 5316 (2020).
8. Н. Ю. Філоненко, О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, *Метал і лиття України*, **30**, № 3: 81 (2022).
9. N. Yu. Filonenko, O. I.Babachenko, H. A. Kononenko, and A. S. Baskevich, *East Eur. J. Phys*, No. 4: 120 (2021).
10. О. А. Банных, М. Е. Дрица, *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа* (Москва: Металлургия: 1986).
11. О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, А. О. Тараненко, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 12: 1661 (2022).
12. О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, О. А. Сафронова, О. С. Баскевіч, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 1: 137 (2023).

REFERENCES

1. S. J. Chen, L. J. Li, Z. W. Peng, X. D. Huo, and H. B. Sun, *J. Mater. Res. Technol.*, **10**: 580 (2021).
2. S. Wang, Z. Gao, G. Wu, and X. Mao, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **29**: 645 (2022).
3. S. Li, H. Yu, Y. Lu, J. Lu, W. Wang, and S. Yang, *Wear*, **474–475**: 203647 (2021).
4. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, H. A. Kononenko, and O. A. Safronova, *Mater. Sci.*, **58**: 190 (2022).
5. H. S. El-Faramawy, S. N. Ghali, and M. M. Eissa, *J. Miner. Mater. Char. Eng.*, **11**: 1108 (2012).
6. Q. Ren, T. Liu, S. Baik, Z. Mao, B. W. Krakauer, and D. N. Seidman, *J. Mater. Sci.*, **56**: 6448 (2021).
7. Z. Zhu, Y. Liang, and J. Zou, *Materials*, **13**, Iss. 23: 5316 (2020).
8. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, and H. A. Kononenko, *Metal i Lyttya Ukrayiny*, **30**, No. 3: 81 (2022) (in Ukrainian).
9. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, H. A. Kononenko, and A. S. Baskevich, *East Eur. J. Phys*, No. 4: 120 (2021).
10. O. A. Bannykh and M. E. Dritsa, *Diagrammy Sostoyaniya Dvoinykh i Mnogokomponentnykh Sistem na Osnove Zheleza* [State Diagrams of Binary and Multicomponent Iron-Based Systems] (Moskva: Metallurgiya: 1986) (in Russian).
11. O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi, O. A. Safronova, and A. O. Taranenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1661 (2022) (in Ukrainian).
12. O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi, O. A. Safronova, and O. S. Baskevich, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 1: 137 (2023) (in Ukrainian).