

PACS numbers: 61.05.cp, 61.72.Ff, 64.30.Ef, 64.70.D-, 81.05.Bx, 81.30.Fb, 82.60.Lf

Вплив вмісту Карбону, Мангану та Силіцію на утворення структурних складових під час безперервного лиття криць

Н. Ю. Філоненко^{*,**}, О. І. Бабаченко^{**}, Г. А. Кононенко^{**}

^{*}Дніпровський державний медичний університет,
вул. Володимира Вернадського, 9,
49044 Дніпро, Україна

^{**}Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
пл. Стародубова, 1,
49050 Дніпро, Україна

В роботі проведено дослідження безперервно литих криць з різним вмістом Карбону, Мангану та Силіцію. Для визначення особливостей структурного стану криць використовували мікроструктурний, мікрорентгено-спектральний, рентгеноструктурний аналізи. Показано, що в залежності від вмісту Карбону, Мангану та Силіцію в структурі під час затвердіння можливе: утворення первинної фази δ -фериту, а потім утворення через перитектичну реакцію γ -заліза, співіснування фаз L , γ та δ й утворення γ -заліза з розтопу. Встановлено, що зі збільшенням вмісту Карбону $\geq 0,5\%$ (мас.), Мангану $\geq 0,75\%$ (мас.) і Силіцію $\geq 0,45\%$ (мас.) в криці не відбувається утворення первинної фази δ -фериту з розтопу в безперервно литій заготовці. За даного вмісту Карбону, Мангану та Силіцію в криці спостерігали утворення у розтопі γ -заліза та збільшення кількості включень — складних карбідів і силіцидів заліза. Теоретично показано, що зі збільшенням вмісту Мангану та Силіцію, площа ділянки перитектики на діаграмі зменшується. В міждендритному просторі фіксували сегрегацію

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

^{*}Dnipro State Medical University,
4 Soborna Str., UA-49005 Dnipro, Ukraine

^{**}Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute, N.A.S. of Ukraine,
1 Academician Starodubov Sqr., UA-49050 Dnipro, Ukraine

Citation: N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, Influence of the Carbon, Manganese, and Silicon Content on Formation of Structural Components During Continuous Casting of Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 7: 873–882 (2023) (in Ukrainian). DOI:10.15407/mfint.45.07.0873

Мангану та Силіцію: в кірковій зоні та на $1/2$ радіуса злитку сегрегацію Мангану до 0,7% (мас.) і Силіцію до 0,5% (мас.), а в центральній частині злитку вміст буде майже таким, як їхній вміст у стопі.

Ключові слова: безперервно литі криці, дендрити заліза, сегрегація Мангану та Силіцію.

The study of continuously cast steels with different contents of carbon, manganese and silicon is carried out in the work. To determine the features of the structural state of steels, we use microstructural analysis, x-ray microanalysis, and x-ray diffraction method. As shown, depending on the carbon, manganese, and silicon contents in the structure during solidification, the next development is possible as follows: formation of the primary phase of δ -ferrite and, then, formation of γ -iron according the peritectic reaction; coexistence of L -, γ - and δ -phases, and formation of γ -iron from the melt. As found, with an increase in the carbon content ≥ 0.5 wt.%, manganese content ≥ 0.75 wt.% and silicon content ≥ 0.45 wt.% in steel, formation of the δ -ferrite primary phase from the melt in the continuous cast steel billet does not occur. At given content of carbon, manganese and silicon in the steel, formation of γ -iron in the melt and increase in the quantity of inclusions, namely, complex carbides and iron silicides, are observed. Calculations show that, with an increase in the manganese and silicon contents, the peritectic area in the diagram decreases. In the interdendritic space, the segregation of manganese and silicon is detected: in the crust zone and at the $1/2$ radius of ingot, the segregation of manganese is up to 0.7 wt.% and the silicon one is up to 0.5 wt.%; in the central part of ingot, the content will be almost the same as in the alloy.

Key words: continuously cast steels, iron dendrites, segregation of Mn and Si.

(Отримано 31 березня 2023 р.; остаточн. варіант — 13 квітня 2023 р.)

1. ВСТУП

Як відомо, під час безперервного лиття, а особливо, високошвидкісного лиття, можливе утворення поверхневих поздовжніх тріщин у низьковуглецевих крицях [1, 2]. Появу тріщин пов'язують з перитектичною реакцією в результаті фазових перетворень: розтоп (L) \rightarrow ферит (δ) \rightarrow аустеніт (γ). Схильність криць до розтріскування сильно залежить від складу стопу та параметрів процесу виготовлення злитку, таких як швидкість охолодження. В результаті перитектичного перетворення виникає некогерентність меж фаз (до 6%) між δ -феритом та аустенітом; крім того, ці фази мають різну теплопровідність, що сприяє утворенню тріщин під час безперервного лиття [3]. Окрім наведених вище причин, є ще різні пояснення утворення тріщин під час затвердіння криці за безперервного лиття: максимальна термічна усадка зміщується вліво зі збільшенням

переохолодження [4]; коли виникає напруження або деформація стиснення затверділої оболонки, що перевищує критичне значення міцності на розрив та інші [1–3]. Під час утворення первинної фази δ -фериту встановлюються сильні поля дифузії розчиненої речовини, що призводить до пригнічення її зародження, а отже, встановлюється температура нижче за рівноважну перитектичну температуру, перш ніж почнеться перитектична реакція [1].

Одним із підходів до забезпечення зменшення розтріскування криці є вибір раціонального вмісту легувальних елементів і вмісту Карбону в криці. Слід зазначити, що за високого вмісту Mn, Al або Si в криці зона співіснування фаз $L + \delta + \gamma$ збільшується [4]. Як відомо, для підвищення механічних властивостей криці використовують легування Манганом і Силіцієм. Дослідження комбінованих ефектів Si і Mn може бути ще більш актуальним через спільну сегрегацію їх не тільки в перліті, але також на межах зерен фериту [5]. Взаємодія між атомами Si і Mn приводить до додаткового підвищення температури початку рекристалізації, тобто до ефекту гальмування цього процесу [5]. Відомо, що Манган стабілізує аустеніт [6], зменшує дифузійну рухливість Карбону в аустеніті та схильний до макросегрегації [7]. Результати досліджень впливу швидкості охолодження під час затвердіння безперервно литої заготовки (БЛЗ) криці марки EA1N ($\cong 0,4\%$ ваг. С) на особливості дендритної структури вуглецевої криці представлено в роботі [8]. Показано вплив швидкості охолодження за затвердіння БЛЗ $\varnothing 470$ мм на параметри хемічної неоднорідності розподілу Силіцію і Мангану та формування дендритної структури.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню безперервно литих криць, залишається питання щодо впливу, окрім вмісту Карбону, ще Мангану та Силіцію, швидкості охолодження на формування структури.

Метою даної роботи було дослідити вплив таких чинників, як вміст Карбону, Мангану та Силіцію, сегрегація елементів на формування структурних складових та умови пригнічення утворення первинної фази.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі проводили дослідження вуглецевих криць, які можуть бути використані для виготовлення металопрокату залізничного призначення (табл. 1).

Зразки криці були одержані в результаті безперервного лиття. Швидкість охолодження зразків складала від $104^\circ\text{C}/\text{с}$ у охолоджувальному водою кристалізаторі в зоні первинного охолодження. Швидкість охолодження металу безперервно литої заготовки $\varnothing 470$ мм змінюється від 29 до $1^\circ\text{C}/\text{с}$ в зоні вторинного охолоджен-

ТАБЛИЦЯ 1. Вміст хемічних елементів в дослідних крицях.

TABLE 1. Content of chemical elements in experimental steels.

Умовне позначення	Базові елементи			Додаткові елементи							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V
1	0,36	0,21	0,54	0,014	0,004	0,12	0,10	0,011	–	0,15	≤0,005
2	0,46	0,32	0,65	0,007	0,002	0,19	0,10	0,009	0,011	0,15	0,032
3	0,50	0,45	0,75	0,014	0,004	0,05	0,085	0,0098	0,051	0,14	0,0028

ня. Шліфи зразків виконано за стандартною методикою; щавлення поверхні зразків здійснили гарячим пікротом Натрію та ніталом.

Для визначення хемічного складу стопу використовували хемічну та мікроспектральну аналізи. Дослідження виконано за допомогою оптичного мікроскопа «Неофот-21». Основні результати мікрорентгеноспектральної аналізи одержано за допомогою електронного мікроскопа JSM-6490 зі сканувальною приставкою ASID-4D й енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізатора «Link Systems 860» із програмним забезпеченням. Рентгеноструктурну аналізу здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому FeK_{α} -випромінненні.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження зразків криці № 1 (із вмістом Карбону у 0,36% (мас.), Силіцію у 0,21% (мас.) та Мангану у 0,74% (мас.)) після щавлення поверхні зразків гарячим пікротом натрію дали змогу встановити, що в зоні швидкого охолодження відбувається утворення дендритів заліза, що мають більші розміри, сформовану вісь першого порядку та частково другого у порівнянні зі зразками криць № 2, 3. В структурі дендритів заліза спостерігали наявність дефектів — мікропор округлої форми, що можуть виникати за кристалізації БЛЗ, та «деформаційні полоси», які мають однаковий напрямок, що може бути доказом того, що в криці відбувалося перитектичне перетворення та первинною фазою був δ -ферит: $L \rightarrow \delta$, а потім — утворення γ -заліза через перитектичну реакцію (рис. 1, а). На наявність пор і «деформаційних полос» у структурі БЛЗ вказують автори робіт [3, 9], та зазначають, що їхнє утворення пов'язане зі значним стис-

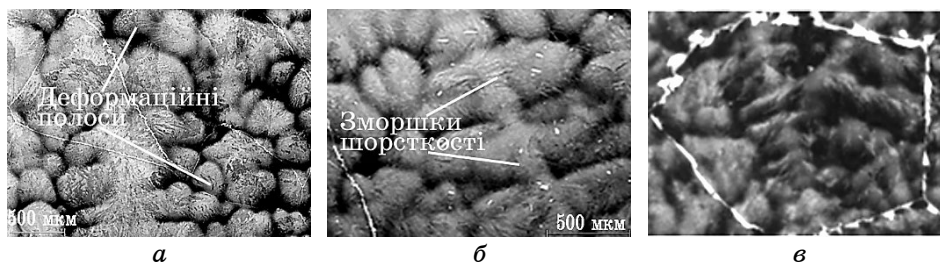


Рис. 1. Мікроструктура криці з вмістом: *a* — Карбону 0,36% (мас.), Силіцію до 0,21% (мас.) та Мангану до 0,54% (мас.); *б* — Карбону 0,46% (мас.), Силіцію 0,34% (мас.) та Мангану 0,65% (мас.); *в* — Карбону 0,50% (мас.), Силіцію 0,47% (мас.) та Мангану 0,77% (мас.); $\times 500$. Щавлено пікратом Натрію.

Fig. 1. Microstructure of steel with content of: *a*—carbon 0.36 wt.%, silicon up to 0.21 wt.% and manganese up to 0.54 wt.%; *б*—carbon 0.46 wt.%, silicon 0.34 wt.% and manganese 0.65 wt.%; *в*—carbon 0.50 wt.%, silicon 0.47 wt.%, and manganese 0.77 wt.%; $\times 500$. Etched with sodium picrate.

ненням під час початкової кристалізації криці.

Із збільшенням вмісту Карбону до 0,46% (мас.), Силіцію до 0,34% (мас.) та Мангану до 0,65% (мас.) (зразок № 2) в криці дендрити мали менші розміри, а в структурі дендритів були виявлені «зморшки шерсткості» у порівнянні зі зразком № 2 (рис. 1, б).

Одержаний результат можна пояснити тим, що за даного вмісту Карбону, Мангану та Силіцію в криці можливе співіснування фаз L , γ та δ ; але за метастабільною діаграмою співіснування $L + \gamma + \delta$ можливе в інтервалі 10–20°C та протягом 0,05 с, тобто майже миттєво [10], та цього часу достатньо, щоб встигли сформуватися «зморшки шерсткості».

Із збільшенням в криці вмісту Карбону $\geq 0,5\%$ (мас.), Мангану $\geq 0,75\%$ (мас.) та Силіцію $\geq 0,45\%$ (мас.) (зразок № 3) в поверхневій зоні спостерігали утворення більш однорідних і дисперсних дендритів, що мали меншу дефектність у порівнянні з дендритами зразків № 1 і № 2, а на їхній поверхні не спостерігали утворення деформаційних полос, що можна пояснити тим, що з розтопу відбувається утворення γ -кристалів заліза [9–11] (рис. 1, в). Крім цього, відомо, що збільшення Mn в криці зменшує перитектичний діяпазон [12].

В мікроструктурі криць № 1–3 по межах аустенітних зерен фіксували утворення надлишкового фериту (рис. 2, 3), що спостерігали автори робіт [5, 13].

За результатами рентгеноструктурної аналізи в зразку № 1 із вмістом С у 0,36% (мас.), Si — 0,21% (мас.), Mn — 0,74% (мас.) було виявлено наступні структурні складові: α -Fe, складні карбіди — $\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}$, фази — FeMn_4 , Fe_2Si (рис. 2, б). В структурі криці фік-

сформувалися наступні структурні складові у вигляді мікротвілень: складні карбіди — $\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}$, $\text{Fe}_{2,7}\text{Mn}_3\text{C}$, FeSiC , фази — Fe_2MnSi , Fe_5Si_3 та $\text{Fe}_{0,68}\text{Mn}_{6,4}\text{Si}_2$ (рис. 3, б). Таким чином, збільшення вмісту Карбону до 0,50% (мас.) та Силіцію до 0,45% (мас.) (в зразку криці № 3 у порівнянні зі зразком криці № 1) приводить до збільшення кількості включень — складних карбідів і силіцидів Феруму. Одержаний результат можна пояснити тим, що є межа розчинності елементів у фазах, а їхній надлишок приводить до утворення окремих включень [14–16].

Утворення різних структурних складових можна пояснити нерівномірним розподілом Мангану та Силіцію, який зумовлений міждендритною сегрегацією під час кристалізації криці. Чим ближче до центру заготовки, тим менша швидкість охолодження та тим більші за розміром так звані «сліди» дендритної структури.

На відстані 1/2 радіуса спостерігали, окрім фериту та перліту, утворення як окремих ділянок мартенситу, так і бейніту в міждендритних ділянках, а в центральній частині злитку спостерігали перліт, з величиною міжпластинкової відстані менше 0,2 мкм.

Крім цього, в криці № 3 фіксували більш рівномірний розподіл сегрегаційних ділянок, а об'ємна частка їх складала 7–10%.

З літературних джерел відомо, що Манган стабілізує аустеніт [14] і зменшує дифузійну рухливість Карбону в аустеніті та схильний, так само, як і Силіцій, до макросегрегації [7, 17]. Дендрити зразків з кіркової зони криці № 3 мали вміст Мангану у 0,2% (мас.), а Силіцію — у 0,38% (мас.). В міждендритному просторі вміст Мангану зростає до 0,7% (мас.), а Силіцію до 0,5% (мас.). На відстані 1/2 радіуса заготовки, яку було охолоджено зі швидкістю у $10^\circ\text{C}/\text{с}$ в міждендритному просторі, вміст Мангану складав 0,72% (мас.), а Силіцію — 0,56% (мас.), що ймовірно пов'язане з рухом фронту кристалізації та відтисненням надлишкової концентрації Мангану та Силіцію.

В центральній частині, охолоджену зі швидкістю у $1\text{--}3^\circ\text{C}/\text{с}$, спостерігали зменшення міждендритного простору, а вміст Силіцію та Мангану був майже таким, як вміст цих елементів у криці.

Для визначення впливу вмісту Мангану та Силіцію на температуру ліквідусу в даній роботі було запропоновано наступний термодинамічний модель. За умов рівноважного стану було використано вираз

$$G_L = G_\delta + G_{L1} G_i^0 L_{i,j} G_i^0, \quad (1)$$

де G_L — Гіббсова енергія розтопу, G_δ — Гіббсова енергія δ -заліза, а G_{L1} — Гіббсова енергія надлишкового розтопу після утворення δ -фериту. Для одержання виразів для Гіббсової енергії розтопу був використаний термодинамічний підхід, запропонований у [18].

Гіббсова енергія розтопу —

$$\begin{aligned}
 G_L = & G_C^0 x_C + G_{Fe}^0 x_{Fe} + G_{Mn}^0 x_{Mn} + G_{Si}^0 x_{Si} + x_C x_{Fe} L_{Fe:C} + x_C x_{Mn} L_{Mn:C} + \\
 & + x_C x_{Si} L_{Si:C} + x_{Mn} x_{Fe} L_{Fe:Mn} + x_{Si} x_{Fe} L_{Fe:Si} + x_{Si} x_{Mn} L_{Si:Mn} + x_{Mn} x_C x_{Fe} L_{Fe:CMn} + \\
 & + x_{Si} x_C x_{Mn} L_{Mn:CSi} + x_{Fe} x_C x_{Si} L_{Si:CFe} + x_{Mn} x_{Fe} x_{Si} L_{Mn:FeSi} + x_{Si} x_{Mn} x_C x_{Fe} L_{Fe:CSiMn} - \\
 & - \frac{1}{TRZ} \left((x_C x_{Fe} L_{Fe:C})^2 + (x_C x_{Mn} L_{Mn:C})^2 + (x_C x_{Si} L_{Si:C})^2 + (x_{Mn} x_{Fe} L_{Fe:Mn})^2 + \right. \\
 & \left. + (x_{Si} x_{Fe} L_{Fe:Si})^2 + (x_{Si} x_{Mn} L_{Si:Mn})^2 \right) = \sum_{i=1}^4 G_i^0 x_i + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 x_i x_j L_{ij} + \\
 & + \frac{1}{6} \sum_{\substack{i,j,z \\ i \neq j \neq z}}^4 x_i x_j x_z L_{ijz} + \frac{1}{24} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j \neq z \neq k}}^4 x_i x_j x_z x_k L_{ijzk} - \frac{1}{4TRZ} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 (x_i x_j L_{ij})^2 \right),
 \end{aligned} \tag{2}$$

де G_i^0 — Гіббсова енергія чистих компонентів (Дж/моль), $L_{i,j}$ — енергія взаємодії компонентів (Дж/моль), Z — координаційне число (для рідини $Z = 10$). Суму знаходимо по всіх i та j за умови, що $i \neq j$.

Для розрахунку числових значень термодинамічних функцій розтопу використали дані для чистих компонентів G_i^0 [19] та енергії взаємодії між компонентами в фазі за даними роботи [20].

Вираз для Гіббсової енергії δ -фериту —

$$\begin{aligned}
 G_\delta = & \sum_{i=1}^4 G_i^0 x_i^{(1)} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 x_i^{(1)} x_j^{(1)} L_{ij}^1 + \frac{1}{6} \sum_{\substack{i,j,z \\ i \neq j \neq z}}^4 x_i^{(1)} x_j^{(1)} x_z^{(1)} L_{ijz}^1 + \\
 & + \frac{1}{24} \sum_{\substack{i,j,z,k \\ i \neq j \neq z \neq k}}^4 x_i^{(1)} x_j^{(1)} x_z^{(1)} x_k^{(1)} L_{ijzk}^1 - \frac{1}{4TRZ} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 (x_i^{(1)} x_j^{(1)} L_{ij}^1)^2 \right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

де x_{1C} , x_{1Fe} , x_{1Si} та x_{1Mn} — концентрації відповідних хемічних елементів у δ -фериті [14], а L_{ij}^1 — енергія парної взаємодії компонентів, L_{ijz}^1 — енергія взаємодії трьох компонентів, L_{ijzk}^1 — енергія взаємодії чотирьох компонентів (Дж/моль).

Гіббсові енергії надлишкового розтопу —

$$\begin{aligned}
 G_{L1} = & \sum_{i=1}^4 G_i^0 x_i^{(2)} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 x_i^{(2)} x_j^{(2)} L_{ij}^2 + \frac{1}{6} \sum_{\substack{i,j,z \\ i \neq j \neq z}}^4 x_i^{(2)} x_j^{(2)} x_z^{(2)} L_{ijz}^2 + \\
 & + \frac{1}{24} \sum_{\substack{i,j,z,k \\ i \neq j \neq z \neq k}}^4 x_i^{(2)} x_j^{(2)} x_z^{(2)} x_k^{(2)} L_{ijzk}^2 - \frac{1}{4TRZ} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^4 (x_i^{(2)} x_j^{(2)} L_{ij}^2)^2 \right).
 \end{aligned} \tag{4}$$

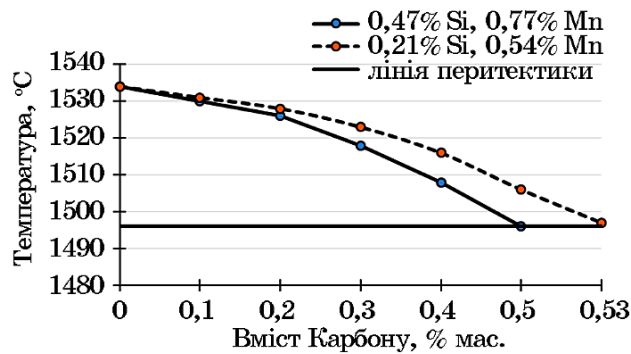


Рис. 4. Лінія ліквідусу псевдобінарної системи Fe–C.

Fig. 4. The liquidus line of the pseudobinary Fe–C system.

Розв'язання рівнянь, відповідних (1), одержали в чисельному вигляді.

На рисунку 4 представлено розрахункову температурну залежність лінії ліквідусу від вмісту Мангану та Силіцію в стопах.

Як видно з рис. 4, для криці з вмістом Силіцію у 0,47% (мас.) та Мангану у 0,77% (мас.) ділянка перитектики зменшується у порівнянні із крицею з вмістом Силіцію у 0,21% (мас.) та Мангану у 0,54% (мас.), що добре узгоджується з експериментальними результатами, одержаними в даній роботі й іншими авторами [9, 11, 12].

4. ВИСНОВКИ

1. Показано, що за безперервного лиття криць в залежності від вмісту Карбону, Мангану та Силіцію в структурі під час затвердіння можливе: утворення первинної фази δ -фериту, а потім утворення через перитектичну реакцію γ -заліза, співіснування фаз L , γ та δ й утворення γ -заліза з розтопу.
2. Встановлено, що вмісти Мангану та Силіцію впливають на площу ділянки перитектики на діаграмі. Із збільшенням їхнього вмісту площа ділянки перитектики зменшується.
3. Встановлено, що зі збільшенням вмісту Карбону $\geq 0,5\%$ (мас.), Мангану $\geq 0,75\%$ (мас.) та Силіцію $\geq 0,45\%$ (мас.) в криці не відбувається утворення первинної фази δ -фериту з розтопу та спостерігається збільшення кількості включень — складних карбідів і силіцидів Феруму.
4. В кірковій зоні та на $1/2$ радіуса БЛЗ $\varnothing 470$ мм у міждендритному просторі фіксували сегрегацію Мангану до 0,7% (мас.), Силіцію — до 0,5% (мас.), а в центральній частині злитку вміст буде майже таким, як вміст у стопі.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. S. Griesser, C. Bernhard, and R. Dippenaar, *Acta Mater.*, **81**: 111 (2014).
2. T. Qu, D. Wang, H. Wang, D. Hou, and J. Tian, *Metals*, **10**, No. 10: 1282 (2020).
3. J. Guo, G. Wen, and P. Tang, *Steel Res. Int.*, **91**: 376 (2019).
4. J. Guo, G. Wen, D. Pu, and P. Tang, *Materials*, **11**, No. 4: 571 (2018).
5. V. Shah, M. Krugl, S. E. Offerman, J. Sietsma, and D. N. Hanlon, *ISIJ International*, **60**, Iss. 6: 1 (2020).
6. A. Cias, *Science of Sintering*, **47**, No. 1: 61 (2015).
7. Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, and J. Jiang, *Mater. Sci. Technol.*, **34**, No. 7: 780 (2018).
8. O. I. Babachenko, K. H. Dyomina, H. A. Kononenko, O. L. Safronov, and O. P. Klynova, *Metalozn. Obrobka Met.*, **27**, No. 97: 9 (2021) (in Ukrainian).
9. Q. Ren, T. Liu, S. Baik, Z. Mao, B. W. Krakauer, and D. N. Seidman, *J. Mater. Sci.*, **56**, No. 10: 6448 (2021).
10. D. Pu, G. Wen, D. Fu, P. Tang, and J. Guo, *Metals*, **8**, Iss. 12: 982 (2018).
11. K. Liu, S. Cheng, and Y. Li, *Coatings*, **12**, Iss. 1: 15 (2022).
12. T. Liu, M. Long, D. Chen, Y. Huang, J. Yang, H. Duan, L. Gui, and P. Xu, *Metall. Mater. Trans. B*, **51**, No. 1: 338 (2019).
13. C. Qiu, H. S. Zurob, and C. R. Hutchinson, *Acta Mater.*, **100**: 333 (2015).
14. N. Filonenko, O. Babachenko, and G. Kononenko, *East Eur. J. Phys.*, **2**: 46 (2019).
15. N. Yu. Filonenko, O. I. Babachenko, H. A. Kononenko, and A. S. Baskevich, *East Eur. J. Phys.*, **4**: 90 (2020).
16. N. Filonenko, O. Babachenko, G. Kononenko, and K. Domina, *Physics And Chemistry of Solid State*, **21**, No. 3: 525 (2020).
17. Z. Zhu and Y. J. Liang, *Materials*, **13**, No. 23: 5316 (2020).
18. N. Yu. Filonenko, *Int. J. Mod. Phys. B*, **34**, No. 8: 2050057 (2020).
19. R. A. Roble and D. R. Waldbaum, *Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K (25.0°C) and One Atmosphere (1.013 Bars) Pressure and at Higher Temperatures* (Orton Memorial Library the OHIO State University, 155 S. Oval Drive, 1970), p. 262.
20. A. T. Dinsdale, *SGTE Data for Pure Elements* (NPL Materials Centre, Division of Industry and Innovation, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK. 1991), p. 174.