

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.35.41

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-19>

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОСТЕЙ ТА ВІЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ КОМПОНЕНТІВ ПРИ УТВОРЕННІ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри природничо-наукових та

загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Смірнов Юрій Олексійович,

кандидат економічних наук, доцент

Фізико-технологічного інституту металів та сплавів

Національної академії наук України

ORCID ID: 0009-0009-0479-5828

Малій Христина Василівна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

Грудкіна Наталія Сергіївна,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри природничо-наукових

та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

У роботі показано, що шпінель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), яка утворюється в процесі виробництва сталей, має високу температуру плавлення та утворює недеформовані неметалеві включення С-типу. Доведено, що уникнення утворення шпінелі в процесі розкислення високоякісних сталей є актуальним завданням. Висвітлено, що механізм утворення шпінелі в рідкій сталі недостатньо досліджено через відсутність достовірної термодинамічної інформації про утворення шпінелі. Показано, що в попередніх дослідженнях було проведено розрахунки термодинамічної рівноваги в процесі розкислення деяких металів у рідкому залізі, де утворення включень шпінелі в рідкій сталі було функцією вмісту кисню, алюмінію та магнію. При цьому не було враховано температуру сталеплавильного виробництва та відсутність даних про активність компонентів у твердому розчині шпінелі. Метою роботи було проведення експериментальних досліджень з метою визначення вільної енергії утворення оксиду магнію твердого, а також вільної енергії утворення шпінелі. Наведено методику проведення експерименту, де вільна енергія системи визначалася шляхом врівноваження рідкої міді, що містить графіт, у тиглі MgO з атмосферою $\text{CO}-\text{Ar}$. Встановлено рівноважну реакцію утворення оксиду магнію у розплаві міді, що дозволило встановити рівняння для розрахунку константи рівноваги гетерогенного процесу. Показано, що під час вимірювання активності складових фаз шпінелі, твердий розчин шпінелі, який має нестехіометричний склад, перебував у рівновазі з рідкою міддю у графітовому тиглі за сталого співвідношення газів $\text{CO} : \text{Ar}$. Визначено рівняння, що дозволили розрахувати активність MgO та Al_2O_3 у твердому розчині шпінелі та активність стехіометричної шпінелі у твердому розчині. Показано, що для проведення експерименту в роботі було використано вертикальну електричну піч із нагрівальними елементами LaCrO_4 . Детально описано методику проведення експерименту. Показано, що для вимірювання вільної енергії утворення шпінелі та активності складових частин твердого розчину шпінелі 5 г лігатури $\text{Cu}-(0,005-0,03 \text{ мас. \%})\text{Mg}-(0,1-1,1 \text{ мас. \%})\text{Al}$ було завантажено в графітовий тигель зі стехіометричним співвідношенням шпінелі у формі таблетки. Утворення шпінелі було підтвер-

джено методом рентгенівської дифракції, електронно-зондового мікроаналізатора та мокрим хімічним аналізом. Проведено додаткові експерименти для точного визначення фазових меж фази шпінелі. Для цієї мети було використано метод дифузійної пари. Доведено, що товщина шару шпінелі, що утворився між MgO та Al_2O_3 , становила від 300 до 500 мкм залежно від температури. Для розрахунків вільної енергії реакції утворення твердого оксиду марганцю та шпінелі було виведено рівняння залежності зміни енергії Гіббса з температурою, а також визначено коефіцієнти активності.

Ключові слова: неметалеві включення, вільна енергія, шпінель, коефіцієнт активності, твердий розчин.

Yefimova Veronika, Smirnov Yuri, Malii Khrystyna, Hrudkina Nataliia. Study of the activities and free energy of components during the formation of a solid solution of $MgO \cdot Al_2O_3$

The work shows that spinel ($MgO \cdot Al_2O_3$), which is formed in the process of steel production, has a high melting point and forms undeformed non-metallic C-type inclusions. It is proved that avoiding spinel formation in the process of deoxidation of high-quality steels is an urgent task. It is highlighted that the mechanism of spinel formation in liquid steel has not been sufficiently studied due to the lack of reliable thermodynamic information on spinel formation. It is shown that in previous studies, thermodynamic equilibrium calculations were carried out in the process of deoxidation of some metals in liquid iron, where the formation of spinel inclusions in liquid steel was a function of the oxygen, aluminum and magnesium content. In this case, the temperature of steelmaking and the lack of data on the activity of components in the spinel solid solution were not taken into account. It is shown that the purpose of the research was to conduct experimental studies to determine the free energy of formation of solid magnesium oxide, as well as the free energy of spinel formation. The method of conducting an experiment where the free energy of the system was determined by equilibrating liquid copper containing graphite in an MgO crucible with a CO – Ar atmosphere is presented. The equilibrium reaction of magnesium oxide formation in molten copper is established, which allowed establishing an equation for calculating the equilibrium constant of the heterogeneous process. It is shown that during the measurement of the activity of the spinel phase components, the spinel solid solution, which has a non-stoichiometric composition, was in equilibrium with liquid copper in a graphite crucible at a constant $CO:Ar$ gas ratio. Equations are determined that allow calculating the activity of MgO and Al_2O_3 in the spinel solid solution and the activity of stoichiometric spinel in the solid solution. It is shown that a vertical electric furnace with $LaCrO_4$ heating elements was used to conduct the experiment in the work. The method of conducting the experiment is described in detail. It is shown that to measure the free energy of spinel formation and the activity of the components of the spinel solid solution, 5 g of $Cu-(0.005-0.03 \text{ wt.}\%)Mg-(0.1-1.1 \text{ wt.}\%)Al$ ligature was loaded into a graphite crucible with a stoichiometric spinel ratio in the form of a tablet. The formation of spinel was confirmed by X-ray diffraction, electron probe microanalyzer and wet chemical analysis. Additional experiments were carried out to accurately determine the phase boundaries of the spinel phase. For this purpose, the diffusion vapor method was used. It was proved that the thickness of the spinel layer formed between MgO and Al_2O_3 was from 300 to 500 μm depending on the temperature. To calculate the free energy of the reaction of the formation of solid manganese oxide and spinel, the equation of the dependence of the change in Gibbs energy on temperature was derived, and the activity coefficients were also determined.

Key words: non-metallic inclusions, free energy, spinel, activity coefficient, solid solution.

Вступ. Відомо, що шпінель ($MgO \cdot Al_2O_3$) має високу температуру плавлення та утворює недеформовані неметалеві включення С-типу у розплаві сталі при виробництві відповідальних марок сталі [1–5]. Тому актуальним завданням є уникнення утворення шпінелі в процесі розкислення високоякісних сталей. При цьому слід зауважити, що механізм та фазова стабільність утворення шпінелі в рідкій сталі недостатньо досліджена через відсутність достовірної термодинамічної інформації про утворення шпінелі.

Так, у роботах [6–9] було проведено розрахунки термодинамічної рівноваги в процесі розкислення магнію, кальцію та алюмінію в рідкому залізі, а також дослідження фазової стабільності включень шпінелі в розплавленій сталі. У цих дослідженнях передбачалось, що область стабільного утворення включень шпінелі в рідкій сталі є функцією вмісту кисню, алюмінію та магнію. При цьому з даних робіт випливає, що для

точного опису стабільності шпінелі необхідно вирішити дві проблеми. Перша – це визначення вільної енергії утворення шпінелі за температур виробництва сталі, а друга – відсутність даних про активність компонентів у твердому розчині шпінелі.

У деяких роботах наведені дані розрахунків вільної енергії [10; 11] утворення шпінелі. Однак отримані дані погано узгоджувалися з реальним процесом. У розвідці [12] було проведено експериментальні дослідження, що дозволили за даними експерименту визначити значення вільної енергії утворення $MgO \cdot Al_2O_3$, причому всі вони були проведені за температур, нижчих за 1673 К. У роботі [13] вільну енергію було визначено за температури 1873 К з використанням активності MgO та Al_2O_3 у шлаках $MgO-SiO_2-Al_2O_3$ та лінією ліквідусу шпінелі за діаграмою плавлення.

Вивчення фазових рівноваг у системах MgO -шпінель, Al_2O_3 -шпінель або системи $MgO-Al_2O_3$

поблизу температур виробництва сталі було здійснено у дослідженні [14]. Ці роботи свідчать про те, що шпінель має широкий діапазон твердих розчинів, від 50 до 65 мол.% Al_2O_3 , тому активність стехіометричної шпінелі, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, повинна змінюватися як функція складу в діапазоні однорідних твердих розчинів.

При цьому слід зауважити, що немає жодних звітів про діаграму активності складу шпінелі в діапазоні твердих розчинів, що свідчить про відсутність достовірних термодинамічних даних про шпінель.

У нашій роботі було проведено експеримент, який дозволив визначити вільну енергію Гіббса кожного оксиду шпінелі $\Delta G_f^\circ \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та її зміну в області однорідного твердого розчину фази шпінелі з використанням методів розрахунку хімічних рівноваг.

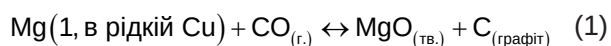
Методи та методики дослідження.

Метою наших досліджень було:

1) проведення експериментальних досліджень;

2) визначення вільної енергії Гіббса кожного оксиду шпінелі $\Delta G_f^\circ \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та їх зміни в області однорідного твердого розчину фази шпінелі з використанням методів розрахунку хімічних рівноваг.

Для визначення $\Delta G_f^\circ \text{MgO}$ було проведено експерименти шляхом врівноваження рідкої міді, що містить графіт, у тиглі MgO з атмосферою $\text{CO}-\text{Ar}$. У результаті було встановлено таку рівноважну реакцію:



Зміна вільної енергії рівняння (1), ΔG_1° , пов'язана з константою рівноваги, K_1 рівнянням:

$$\Delta G_1^\circ = -RT \ln K_1 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{C}}}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}}; \quad (2)$$

де R – універсальна газова стала, Дж/моль · К;
 T – температура, К;

a_{MgO} , a_{C} , a_{Mg} – активності чистих речовин;

P_{CO} – парціальний тиск CO в атм.

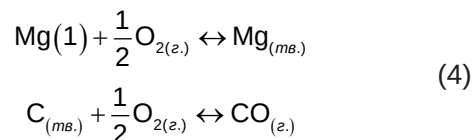
Оскільки процес, що описується рівнянням (1) є гетерогенним, то відповідно до закономірностей хімічної рівноваги процесів, де учасники перебувають у різних агрегатних станах, а саме активності $\text{MgO}_{(тв.)}$ та вуглецю дорівнюють одиниці, то рівняння (2) набуває вигляду:

$$K_1 = \frac{1}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}} = \frac{1}{\gamma_{\text{Mg}} \cdot X_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}}; \quad (3)$$

де γ_{Mg} – коефіцієнт активності магнію;

X_{Mg} – мольна частка магнію у розплаві алюмінію.

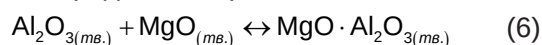
З рівняння (3) випливає, що значення K_1 можна визначити з рівноважної концентрації Mg у рідкій міді, P_{CO} залежно від температури, а саме:



Нарешті, зміна вільної енергії утворення MgO , $\Delta G_f^\circ \text{MgO}$ визначається з рівняння:

$$\Delta G_2^\circ = -116560 - 84,8T, \text{ Дж/моль}. \quad (5)$$

Стехіометрично реакцію формування оксидів можна представити рівнянням:



відповідно

$$\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^\circ = -RTK_2 = -RT \frac{a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}, \quad (7)$$

де K_2 – константа рівноваги процесу;

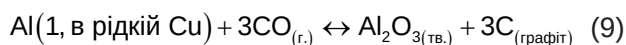
$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$, $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – активності учасників реакції.

Якщо за стандартний стан активності шпінелі прийняти стехіометричний склад шпінелі, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, рівняння (7) можна переписати як:

$$\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^\circ = -RTK_2 = -RT \frac{1}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}, \quad (8)$$

Отже, для визначення K_2 та $\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^\circ$ необхідно знати активності чистих MgO та Al_2O_3 . Для визначення $\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^\circ$ оксиди MgO та Al_2O_3 у стехіометричному відношенні знаходилися у рівновазі у графітовому тиглі за фіксованого співвідношення газової суміші $\text{CO} : \text{Ar}$.

Для реакції (6), що перебуває у рівновазі, необхідно встановити умови рівноваги з рівнянням (1):



відповідно

$$\Delta G_3 = -RT \ln K_3 = -RT \ln \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot a_{\text{C}}^3}{a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3}. \quad (10)$$

Оскільки активність вуглецю дорівнює одиниці через використання графітового тигля, активність Al_2O_3 можна виразити як:

$$a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = K_3 \cdot a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3 = K_3 \cdot \gamma_{\text{Al}}^2 \cdot X_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3, \quad (11)$$

де γ_{Al} та X_{Al} – коефіцієнт активності та мольна частка алюмінію у рідкій міді відповідно. Значення ΔG_3 було знайдено з використанням термодинамічних величин, а γ_{Al} – з роботою [15]. Отже, активність Al_2O_3 у стехіометричний

сполуці $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ можна визначити з рівноважного вмісту Al у рідкій міді.

Активність MgO також можна визначити з наступного рівняння та значення ΔG_1 у відповідності рівняння (2):

$$a_{\text{MgO}} = K_1 \cdot a_{\text{MgO}} \cdot P_{\text{CO}} \quad (12)$$

Зрештою, вільну енергію рівняння (6) можна визначити з рівняння (8), підставляючи кожну активність.

Під час вимірювання активності складових фаз шпінелі твердий розчин шпінелі, який має нестехіометричний склад, знаходився в рівновазі з рідкою міддю у графітовому тиглі за сталого співвідношення газів $\text{CO} : \text{Ar}$. Активність MgO та Al_2O_3 у твердому розчині шпінелі можна визначити за рівняннями (11) та (12), а активність стехіометричної шпінелі у твердому розчині можна отримати з використанням такого рівняння:

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = K_2 \cdot a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (13)$$

Для проведення експерименту нами використана вертикальна електрична піч з нагрівальними елементами LaCrO_4 . Для визначення вільної енергії утворення MgO 5 г лігатури $\text{Cu}-0,1$ мас. % Mg було завантажено в тигель MgO з циліндричним графітовим блоком, де було просвердлено 7 або 8 отворів для забезпечення прямого контакту газової суміші $\text{CO}-\text{Ar}$ з поверхнею розплавленої міді. Для вимірювання вільної енергії утворення шпінелі та активності складових частин твердого розчину шпінелі 5 г лігатури $\text{Cu}-(0,005-0,03$ мас. %) $\text{Mg}-(0,1-1,1$ мас. %) Al було завантажено в графітовий тигель зі стехіометричним співвідношенням шпінелі у формі таблетки. Зразок шпінелі був виготовлений шляхом спікання еквімолярної порошкової суміші MgO та Al_2O_3

протягом 24 годин на повітрі при температурі 1873 К. Утворення шпінелі було підтверджено методом рентгенівської дифракції, електронно-зондового мікроаналізатора та мокрим хімічним аналізом.

Рівноважний вміст Al та Mg у міді визначали за допомогою індукційно-зв'язаної плазмової спектроскопії.

Також було проведено деякі додаткові експерименти для точного визначення фазових меж фази шпінелі. Для цієї мети було використано метод дифузійної пари. Зразок Al_2O_3 циліндричної форми був щільно з'єднаний з пластиною MgO . Кожна контактна поверхня була попередньо

відполірована. Цю дифузійну пару витримували протягом 24 годин при 1700, 1800, 1873 та 1900 К під очищеним потоком Ar , а потім витягували з печі. Цей загартований зразок встановлювали у форму та розрізали в поздовжньому напрямку. Профіль концентрації Mg та Al у зразку визначали за допомогою дисперсійного спектроскопічного аналізу. Товщина шару шпінелі, що утворився між MgO та Al_2O_3 , становила від 300 до 500 мкм залежно від температури.

Для розрахунків вільної енергії реакції (1), (4) та (7) було виведено рівняння залежності зміни енергії Гіббса з температурою.

$$\Delta G_1^0 = 552\,790 - 220,0T \quad (14)$$

$$\Delta G_{f,\text{MgO}}^0 = 669\,350 - 135,0T \quad (15)$$

$$\Delta G_{f,\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^0 = -20\,790 - 15,7T \quad (16)$$

Експериментальні результати щодо вільної енергії та коефіцієнтів активності реагуючих речовин наведено у Таблиці 1.

Активність MgO та Al_2O_3 , виміряна у всьому діапазоні складів твердого розчину шпінелі

Таблиця 1

Експериментальні результати вільної енергії та коефіцієнтів активності

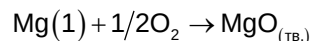
№	T, K	У рідкій фазі міді		У фазі шпінелі				ΔG_1 , кДж/моль
		$X_{\text{Al}} \cdot 10^{-3}$	$X_{\text{Mg}} \cdot 10^{-5}$	$X_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	a_{MgO}	$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$	
1	1800	4,5	1,01	47,3	0,032	0,917	0,781	41,68
2	1820	4,8	1,7	48,1	0,257	0,100	0,745	-43,93
3	1840	5,1	2,03	49,4	0,293	0,076	0,592	-55,35
4	1850	7,6	3,55	50,0	0,416	0,091	1,00	-47,52
5	1860	8,4	4,02	54,8	0,682	0,052	0,942	-46,34
6	1865	9,7	5,43	57,3	0,786	0,040	0,832	-44,86
7	1873	9,8	6,67	61,1	0,884	0,023	0,541	-50,86

в інтервалі температур 1800–1873 К, наведена у Таблиці 1. Активність шпінелі відносно стехіометричного співвідношення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у твердому розчині була розрахована на основі активностей MgO та Al_2O_3 та $\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^0$.

Висновки. У результаті проведених досліджень визначено вільні енергії утворення MgO та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а також активності складі твердого розчину методом розрахунку хімічних рівноваг у температурному інтервалі 1800–1873 К.

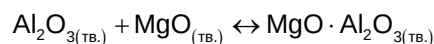
Встановлено, що:

1) Вільна енергія утворення $\text{MgO}_{(\text{ТВ.})}$ відповідає таким рівнянням



$$\Delta G_{f, \text{MgO}}^0 = 669\,350 - 135,07T;$$

Вільна енергія утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ з Al_2O_3 та MgO визначається з рівнянь:



$$\Delta G_{f, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}^0 = -20\,790 - 15,77T.$$

ЛІТЕРАТУРА:

1. Formation pathways for $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions in iron melt / Xiao Y., Wang G., Lei H., Sridhar S. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 813. P. 67–75.
2. Formation and modification of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -based inclusions in alloy steels / Yang S., Wang Q., Zhang L., Li J., Peaslee K. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2012. Vol. 43. P. 731–750.
3. Formation of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions in high strength alloyed structural steel refined by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slag / Jiang M., Wang X., Chen B., Wang W. *ISIJ International*. 2008. Vol. 48. P. 885–890.
4. Effect of modification treatment on inclusions in 430 Stainless steel by Mg-Al alloys / Jiang Z., Zhuang Y., Li Y., Li S. *Journal Iron Steel Research International*. 2013. Vol. 13. P. 6–10.
5. Control of stringer shaped nonmetallic inclusions of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ system in API X80 linepipe steel plates / Wang X., Li X., Li Q., Huang F., Li H., Yang J. *Steel Research International*. 2014. Vol. 85. P. 155–163.
6. Kinetics of transformation of Al_2O_3 to $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ spinel inclusions in Mg-containing steel / Liu C., Yagi M., Gao X., Kim S., Huang F., Ueda S., Kitamura S. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2018. Vol. 49. P. 113–122.
7. Dissolution behavior of Mg from MgO into molten Steel deoxidized by Al / Harada A., Miyano G., Maruoka N., Shibata H., Kitamura S. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. P. 2230–2238.
8. Liu C., Huang F., Wang X. The effect of refining slag and refractory on inclusion transformation in extra low oxygen steels. *Metallurgical and Materials and Transaction B*. 2016. Vol. 47. P. 999–1009.
9. Effect of magnesia-carbon refractory on the kinetics of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ spinel inclusion generation in extra-low oxygen steels / Liu C., Huang F., Suo J., Wang X. *Metallurgical and Materials and Transaction B*. 2016. Vol. 47. P. 989–998.
10. Stability diagram of Mg-Al-O system inclusions in molten steel / Zhang L., Ren Y., Duan H., Yang W., Sun L. *Metallurgical and Materials and Transaction B*. 2015. Vol. 46. P. 1809–1825.
11. Ren Y., Zhang L., Fang W. Effect of addition of Al-based slag deoxidizer on $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions in 3Si-Fe steels. *Metallurgical Research and Technology*. 2017. Vol. 114. P. 108–116.
12. Deoxidation equilibria among Mg, Al and O in liquid iron in the presence of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ spinel / Seo W. G., Han W. H., Kim J. S., Pak J. J. *ISIJ International*. 2007. Vol. 43. P. 201–208.
13. Thermodynamic modelling on nanoscale growth of magnesia inclusion in Fe-O-Mg melt / Xiao Y., Lei H., Yang B., Wang G., Wang Q., Jin W. *Metals*. 2009. Vol. 9. P. 174–183.
14. Thermodynamic insight into the growth of calcia inclusions at the nanoscale: the case of Fe-O-Ca melt / Xiao Y., Lei H., Yang B., Zhao Y., Wang G., Wang Q. *RSC Advances*. 2019. Vol. 9. P. 11135–11141.
15. Effect of Mg addition on the refinement and homogenized distribution of inclusions in steel with different Al contents / Wang L., Yang S., Li J., Zhang S., Ju J. *Metallurgical and Materials and Transaction B*. 2017. Vol. 48. P. 805–818.

REFERENCES:

1. Xiao, Y., Wang, G., Lei, H., & Sridhar, S. (2020). Formation pathways for $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions in iron melt. *Journal of Alloys and Compounds*, 813, 67–75.
2. Yang, S., Wang, Q., Zhang, L., Li, J., & Peaslee, K. (2012). Formation and modification of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -based inclusions in alloy steels. *Metallurgical and Materials Transaction B*, 43, 731–750.
3. Jiang, M., Wang, X., Chen, B., & Wang, W. (2008). Formation of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ inclusions in high strength alloyed structural steel refined by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slag. *ISIJ International*, 48, 885–890.

4. Jiang, Z., Zhuang, Y., Li, Y., & Li, S. (2013). Effect of modification treatment on inclusions in 430 Stainless steel by Mg-Al alloys. *Journal Iron Steel Research International*, 13, 6–10.
5. Wang, X., Li, X., Li, Q., Huang, F., Li, H., & Yang, J. (2014). Control of stringer shaped nonmetallic inclusions of CaO-Al₂O₃ system in API X80 linepipe steel plates. *Steel Research International*, 85, 155–163.
6. Liu, C., Yagi, M., Gao, X., Kim, S., Huang, F., Ueda, S., & Kitamura, S. (2018). Kinetics of transformation of Al₂O₃ to MgO · Al₂O₃ spinel inclusions in Mg-containing steel, *Metallurgical and Materials Transaction B*, 49, 113–122.
7. Harada, A., Miyano, G., Maruoka, N., Shibata, H., & Kitamura, S. (2014). Dissolution behavior of Mg from MgO into molten Steel deoxidized by Al. *ISIJ International*, 54, 2230–2238.
8. Liu, C., Huang, F., & Wang, X. (2016). The effect of refining slag and refractory on inclusion transformation in extra low oxygen steels. *Metallurgical and Materials and Transaction B*, 47, 999–1009.
9. Liu, C., Huang, F., Suo, J., & Wang, X. (2016). Effect of magnesia-carbon refractory on the kinetics of MgO · Al₂O₃ spinel inclusion generation in extra-low oxygen steels. *Metallurgical and Materials and Transaction B*, 47, 989–998.
10. Zhang, L., Ren, Y., Duan, H., Yang, W., & Sun, L. (2015). Stability diagram of Mg-Al-O system inclusions in molten steel. *Metallurgical and Materials and Transaction B*, 46, 1809–1825.
11. Ren, Y., Zhang, L., & Fang, W. (2017). Effect of addition of Al-based slag deoxidizer on MgO · Al₂O₃ inclusions in 3Si-Fe steels. *Metallurgical Research and Technology*, 114, 108–116.
12. Seo, W.G., Han, W.H., Kim, J.S., & Pak, J.J. (2007). Deoxidation equilibria among Mg, Al and O in liquid iron in the presence of MgO · Al₂O₃ spinel. *ISIJ International*, 43, 201–208.
13. Xiao, Y., Lei, H., Yang, B., Wang, G., Wang, Q., & Jin, W. (2009). Thermodynamic modelling on nanoscale growth of magnesia inclusion in Fe-O-Mg melt. *Metals*, 9, 174–183.
14. Xiao, Y., Lei, H., Yang, B., Zhao, Y., Wang, G., & Wang, Q. (2019). Thermodynamic insight into the growth of calcia inclusions at the nanoscale: the case of Fe-O-Ca melt. *RSC Advances*, 9, 11135–11141.
15. Wang, L., Yang, S., Li, J., Zhang, S., & Ju, J. (2017). Effect of Mg addition on the refinement and homogenized distribution of inclusions in steel with different Al contents. *Metallurgical and Materials and Transaction B*, 48, 805–818.

Стаття надійшла: 26.08.2025

Стаття прийнята: 28.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

