

УДК 669.76.534

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-15>

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Письмарьов Костянтин Євгенович,

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної хімії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук
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 інноваційних технологій
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

Показано, що шпінель у сталях утворює шкідливі включення, що погіршують якість готового продукту. При цьому на сьогоднішній день остаточно не з'ясовано механізм утворення шпінелі та її стійкість у розплавах сталі, оскільки недостатньо вивчено термодинамічні параметри цих процесів, а саме вільні енергії утворення та активності компонентів у діапазоні твердих розчинів.

З'ясовано, що чисельні наукові дослідження вивчали термодинамічну рівновагу в системах де утворюється шпінель та довели стабільність шпінелі в залежності від вмісту кисню, алюмінію та магнію.

Показано, що метою наших досліджень було визначення вільної енергії утворення магнію та шпінелі за температур сталеплавильних процесів, їх коефіцієнтів активності та визначення до якого типу твердих розчинів можна віднести твердий розчин шпінель з точки зору закону Рауля.

Висвітлено, що на першому етапі наших досліджень було проведено термодинамічний аналіз вільної енергії утворення шпінелі та її складових частин з використанням рівняння ізотерми хімічної реакції, що пов'язує активності реагуючих речовин з константою рівноваги хімічного процесу. Це дозволило встановити основні рівняння, що описують зміну енергії Гіббса з температурою для кожної речовини.

Проведено експериментальні дослідження методом встановлення хімічної рівноваги для визначення коефіцієнтів шпінелі та її складових частин.

Показано, що в процесі визначення активності компонентів у фазі шпінелі, твердий розчин шпінелі з нестехіометричним складом знаходився у рівновазі з рідкою міддю у графітовому тиглі при сталому співвідношенні газів. Після встановлення хімічної рівноваги активність компонентів визначали за рівняннями, що було виведено при проведенні термодинамічного аналізу.

В роботі представлено, що утворення шпінелі у наших досліджах ми підтверджували методом рентгенівської дифракції, та хімічним аналізом. Рівноважний вміст алюмінію та магнію у міді визначали за допомогою індукційно-зв'язаної плазмової спектроскопії.

В процесі досліджень було визначено границі фаз твердого розчину шпінелі з використанням методу дифузійних пар.

В результаті проведеної роботи було визначено вільні енергії утворення оксиду магнію та шпінелі, а також активність цих компонентів з використанням методу хімічної рівноваги. З'ясовано, що твердий розчин шпінелі демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля.

Ключові слова: шпінель, вільна енергія Гіббса, активність, метод хімічної рівноваги, закон Рауля, рівноважний вміст компонента, коефіцієнт активності.

Pismarev Konstantin, Yefimova Veronika, Smirnov Yuriy, Malii Khrystyna. Assessment of the distribution of non-metallic inclusions in steel products using the stereological reconstruction method

It is known that spinel in steels forms harmful inclusions that degrade the quality of the finished product. At the same time, to date, the mechanism of spinel formation and its stability in steel melts have not been fully elucidated, since the thermodynamic parameters of these processes have not been sufficiently studied, namely the free energies of formation and the activity of components in the range of solid solutions.

It is shown that numerous scientific studies have studied the thermodynamic equilibrium in systems where spinel is formed and have proven the stability of spinel depending on the content of oxygen, aluminum and magnesium.

Therefore, the purpose of our research was to determine the free energy of formation of magnesium and spinel at the temperatures of steelmaking processes, their activity coefficients and determine to which type of solid solutions the spinel solid solution can be attributed from the point of view of Raoult's law.

At the first stage of our research, a thermodynamic analysis of the free energy of formation of spinel and its components was carried out using the equation of the chemical reaction isotherm, which relates the activities of reactants to the equilibrium constant of the chemical process. This allowed us to establish the main equations describing the change in Gibbs energy with temperature for each substance.

Next, we conducted experimental studies using the method of establishing chemical equilibrium to determine the coefficients of spinel and its components.

In the process of determining the activity of components in the spinel phase, a solid solution of spinel with a non-stoichiometric composition was in equilibrium with liquid copper in a graphite crucible at a constant gas ratio. After establishing chemical equilibrium, the activity of the components was determined using the equations that were derived during the thermodynamic analysis.

We confirmed the formation of spinel in our experiments by X-ray diffraction and chemical analysis. The equilibrium content of aluminum and magnesium in copper was determined using inductively coupled plasma spectroscopy.

In the course of the research, the phase boundaries of the spinel solid solution were determined using the diffusion vapor method.

As a result of the work, the free energies of formation of magnesium oxide and spinel, as well as the activity of these components were determined using the chemical equilibrium method. It was found that the spinel solid solution demonstrates a negative deviation from Raoult's law.

Key words: spinel, Gibbs free energy, activity, chemical equilibrium method, Raoult's law, equilibrium content of the component, activity coefficient.

Вступ. Шпінель ($MgO \cdot Al_2O_3$) має високу температуру плавлення і утворюється як деформоване включення типу С у сталях, що містять наднизький вміст кисню. Тому дуже важливо уникнути утворення шпінелі в процесі розкислення високоякісного дроту та підшипникових сталей. При цьому механізм та фазова стійкість утворення шпінелі в рідкій сталі ще недостатньо вивчена через нестачу надійної термодинамічної інформації про її утворення.

У роботах [1-5] було досліджено термодинамічну рівновагу в системі магнію кальцію та алюмінію в рідкому залізі з точки зору стійкості фази шпінелі у розплаві сталі. Результати цих досліджень показують, що стабільність шпінелі залежить від вмісту кисню, алюмінію та магнію. Однак в цих роботах відсутні дані вільної енергії утворення шпінелі за температур сталеваріння та активностей компонентів у діапазоні твердого розчину шпінелі.

Деякі дані про вільну енергію цих систем наведено у літературі [6-10]. Однак дані цих досліджень не знаходять узгодження, оскільки більшість з них була проведена за температур нижчих ніж температури сталеплавильного виробництва. Лише у дослідженнях [5] було проведено визначення вільної енергії утворення $MgO \cdot Al_2O_3$ за температури 1873 К з урахуванням активності MgO та Al_2O_3 у шлаках $MgO-SiO_2-Al_2O_3$ за лінією ліквідусу утворення шпінелі. Фазові рівноваги в системах MgO -шпінелі, Al_2O_3 -шпінелі та системи $MgO-Al_2O_3$ поблизу температур виробництва сталі були вивчено у роботах [10]. У дослідженнях [9] було проведено термодинамічну оцінку системи

$MgO-Al_2O_3$. Показано, що шпінель має широкий діапазон вмісту твердих розчинів, від 50 до 65 мол.% Al_2O_3 , тому активність стехіометричної шпінелі, $MgO \cdot Al_2O_3$, повинна змінюватися як функція складу в діапазоні однорідних твердих розчинів.

Слід зауважити, що немає жодних даних про активність – склад діаграми шпінелі у діапазоні твердих розчинів. В роботах [4; 5] було зроблено припущення, що твердий розчин шпінелі є ідеальним розчином та визначено термодинамічні умови фазової стабільності шпінелі в процесі розкислення рідкої сталі, але термодинамічних характеристик шпінелі у цьому дослідженні не розглядали.

Методи та методики дослідження. З використанням методу хімічної рівноваги визначення значення вільної енергії Гіббса утворення шпінелі з простих оксидів, $\Delta G_f^{\circ} \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та зміну активностей компонентів в області гомогенного твердого розчину фази шпінелі.

Метою роботи було:

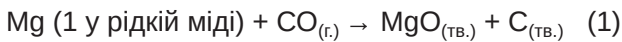
1) визначення вільної енергії утворення Mg та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а також активності складових частин твердого розчину шпінелі та самої шпінелі за температур сталеплавильних процесів;

2) визначення границі фаз твердого розчину шпінелі з використанням методу дифузійних пар;

Методикою досліджень був термодинамічний аналіз, метод хімічної рівноваги, а також метод дифузійних пар.

Визначення вільної енергії утворення MgO .

Для визначення вільної енергії $\Delta G_f^{\circ} \text{MgO}$ проводились експерименти шляхом встановлення рівноваги між рідкою міддю, що містить графіт у тиглі з MgO у атмосфері $\text{Ar} - \text{CO}$. В результаті було встановлено наступну рівноважну реакцію:



Зміна вільної енергії рівняння (1) пов'язана з константою рівноваги цього процесу K_1 :

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

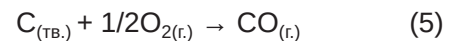
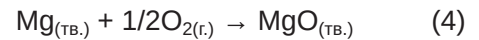
де a_{MgO} , a_{C} та a_{Mg} – активність компонентів, що приймають участь у рівноважній реакції; P_{CO} – парціальний тиск, атм; R – універсальна газова стала Дж/моль·К; T – температура, К. Оскільки активність MgO та вуглецю дорівнює одиниці, у зв'язку з використанням чистого тигля MgO та графіту, вираз для константи рівноваги може набути наступного 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} – масова частка магнію у рідкій міді, % відповідно.

Значення коефіцієнтів активності магнію у рідкій міді було досліджено у роботі [7]. Дані цих досліджень свідчать, що коефіцієнт активності магнію слабо залежить від температури. Звідси випливає, що при визначенні константи рівноваги процесу утворення MgO можна

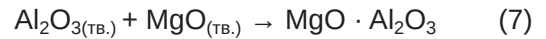
користуватися рівноважною концентрацією Mg у рідкій міді. Отже зміна вільної енергії утворення MgO можна представити наступним чином:



$$\Delta G_2^{\circ} = -116560 - 84,8T \text{ Дж/моль}, \quad (6)$$

Визначення вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Реакція стехіометрично утворення шпінелі з чистих оксидів має наступний вигляд:



$$\Delta G_f^{\circ} \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (8)$$

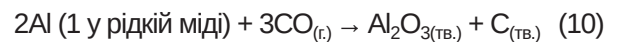
В наших дослідженнях ми приймаємо стандартну активність шпінелі як її стехіометричний склад $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, тоді вираз для визначення вільної енергії Гіббса набуде вигляду:

$$\Delta G_f^{\circ} \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln \frac{1}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (9)$$

В рівняння (9) впливає, що для визначення вільної енергії утворення шпінелі необхідно визначити активності MgO та Al_2O_3 у рівновазі з чистим $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Для визначення $\Delta G_f^{\circ} \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ нами було використано стехіометрично чистий $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, який знаходився у рівновазі з рідкою міддю та поміщений у графітовий тигель з фіксованим співвідношенням суміші газів $\text{Ar} - \text{CO}$.

Рівновага реакції



відбувається за умов реакції (1).

$$\Delta G_2^{\circ} = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot a_{\text{C}}^3}{a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3}, \quad (11)$$

де a_{Al} – активність алюмінію.

Оскільки активність вуглецю дорівнює 1, оскільки використовується графітовий тигель, активність Al_2O_3 може бути виражена рівнянням:

$$a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = K_2 \cdot a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3 = K_2 \cdot \gamma_{\text{Al}}^2 \cdot X_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3, \quad (12)$$

де γ_{Al} – коефіцієнт активності алюмінію в розплаві міді, X_{Al} – масова частка алюмінію у розплаві.

Значення K_2 можна знайти за значеннями стандартних енергій Гіббса ΔG_2° з використанням таблиць термодинамічних величин. Значення активності алюмінію a_{Al} було знайдено з використанням роботи [5]. Отже активність $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ в стехіометричній сполуці може бути знайдена за рівноважним вмістом алюмінію у рідкій міді.

Активність MgO також можна визначити зі значення K_1 за значенням ΔG_1^0 , що визначається у відповідності рівняння (6). Отже рівняння для визначення активності MgO має наступний вигляд:

$$a_{MgO} = K_1 \cdot a_{Mg} \cdot P_{CO} \quad (13)$$

Вільна енергія рівняння (7) може бути визначена з рівняння (9) шляхом підстановки активності кожного учасника процесу.

Далі активність стехіометричної шпінелі у твердому розчині може бути отримана за наступним рівнянням:

$$a_{MgO \cdot Al_2O_3} = K_1 \cdot a_{MgO} \cdot a_{Al_2O_3} \quad (14)$$

Для виміру вільної енергії утворення MgO 5 г розплаву Cu – 0,1 мас% Mg завантажували у тигель з MgO, що містив циліндричний графітовий блок, в якому було просвердлено 7 чи 8 отворів для забезпечення прямого контакту газової суміші CO – Ar з поверхнею розплавленої міді. При вимірюванні вільної енергії утворення шпінелі та активностей компонентів у твердому розчині шпінелі 5 г сплаву Cu – (0,005-0,03 мас.%) Mg – (0,1 – 1,1 мас.%) Al завантажували у графітовий тигель з таблеткою стехіометричної шпінелі. Утворення шпінелі було підтверджено методом рентгенівської дифракції, електронно-зондовим мікроаналізатором з дисперсією довжин хвиль (EPMA) та мокрим хімічним аналізом.

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO наведено у Таблиці 1.

Дані таблиці свідчать, що було досягнуто умови рівноваги у нашому експерименті між CO, MgO та рідкою міддю.

Тому вільна енергія, що ілюструється рівнянням хімічної реакції (4) ΔG_f^0 може бути визначена з ΔG_1^0 та ΔG_2^0 як функція температури у Дж/моль:

$$\Delta G_1^0 = 552790 - 220,0T, \quad (15)$$

$$\Delta G_{MgO}^0 = -669350 + 135,0T, \quad (16)$$

Далі нами було визначено вільну енергію утворення MgO·Al₂O₃. Дані наведено у Таблиці 2. Вільну енергію утворення MgO·Al₂O₃ з окремих оксидів, $\Delta G_f^0 MgO \cdot Al_2O_3$, визначали з рівняння температурної залежності як у Дж/моль:

$$\Delta G_f^0 MgO \cdot Al_2O_3 = -20790 - 15,7T, \quad (17)$$

Відомо, що MgO·Al₂O₃ має відносно широкий діапазон твердих розчинів за високої температури. Границі фаз твердого розчину ми визначали з використанням методу дифузійних пар. Встановлено діапазон існування твердих розчинів шпінелі від 48,4 до 57,5 моль% Al₂O₃ за 1700 K та від 46, до 64,2 моль% Al₂O₃ за 1900 K відповідно.

Далі нами було визначено активність MgO та Al₂O₃ у всьому діапазоні складу твердого розчину шпінелі за 1800 та 1873 K. Дані досліджень наведено у Таблиці 3.

Таблиця 1

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO

N	T, K	P _{CO} , атм	X _{MgO} × 10 ⁴ , долі 1	a _{MgO} × 10 ⁶	ΔG ₁ ⁰ , кДж/моль
1	1700	0,516	1,22	8,411	- 174,52
2	1700	0,367	1,41	9,710	- 177,31
3	1700	0,247	2,05	1,407	- 177,68
4	1700	0,296	1,28	8,813	- 181,74
5	1800	0,984	2,74	2,184	- 160,85
6	1600	0,098	3,95	2,293	- 203,59
7	1700	0,975	7,23	4,996	- 172,97
8	1750	0,990	1,09	8,032	- 170,84

Таблиця 2

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO·Al₂O₃

N	T, K	P _{CO} , атм	X _{Al} у міді × 10 ³ , долі 1	X _{Mg} у міді × 10 ³ , долі 1	a _{Al₂O₃}	a _{MgO}	ΔG _f ⁰ MgO · Al ₂ O ₃ , кДж/моль
1	1700	0,250	3,4	2,34	0,422	0,124	- 41,68
2	1651	0,100	4,5	1,31	0,519	0,079	- 43,91
3	1850	0,970	9,5	1,03	0,248	0,111	- 55,35
4	1850	0,990	9,8	1,38	0,296	0,154	- 47,52
5	1749	0,200	14,2	6,05	0,448	0,092	- 46,34
6	1798	0,700	7,1	5,1	0,472	0,105	- 44,86
7	1798	0,500	1,13	4,76	0,474	0,070	- 50,86

Експериментальні результати активностей компонентів у твердому розчині шпінелі

N	T, K	P _{со} , атм	Фаза рідкої міді		Фаза шпінелі			
			X _{Al₂O₃} , долі 1	X _{Mg} × 10 ⁴ , долі 1	X _{Al₂O₃}	a _{Al₂O₃}	a _{MgO}	a _{MgO·Al₂O₃}
1	1800	0,811	0,0016	3,99	47,3	0,032	0,917	0,781
2	1801	0,383	0,0131	1,03	48,0	0,257	0,109	0,745
3	1801	0,398	0,0132	6,90	48,1	0,293	0,076	0,592
4	1802	0,516	0,0111	6,50	50,0	0,416	0,091	1,006
5	1798	0,499	0,0134	3,55	52,5	0,682	0,052	0,942
6	1799	0,503	0,0144	2,75	54,8	0,786	0,040	0,832
7	1801	0,340	0,0258	2,45	57,3	0,884	0,023	0,541
8	1800	0,287	0,0327	2,34	61,1	1,020	0,019	0,513
9	1873	0,993	0,0056	12,9	47,0	0,034	0,954	0,810
10	1874	0,986	0,0136	2,52	47,9	0,218	0,181	0,989
11	1871	0,988	0,0220	6,34	53,8	0,754	0,048	0,910
12	1874	0,986	0,0244	4,77	57,3	0,852	0,034	0,731
13	1875	0,992	0,0256	4,10	58,5	0,937	0,029	0,682
14	1873	0,990	0,0254	2,57	63,4	0,991	0,019	0,468

Активності MgO та Al₂O₃ для кожної границі насиченням дорівнювали одиниці. Активність стехіометричної шпінелі MgO·Al₂O₃ у твердому розчині було визначено за активностями MgO та Al₂O₃ та $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Активність MgO·Al₂O₃ було розраховано з використанням рівнянь (18) та (19) де псевдо-бінарні суміші MgO – MgO·Al₂O₃ та MgO·Al₂O₃ – Al₂O₃ вважалися ідеальними розчинами.

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3), \quad (18)$$

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3), \quad (19)$$

Розрахунками показано, що розчин стехіометричної шпінелі MgO·Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля.

Висновки і пропозиції. В результаті проведених досліджень визначено вільні енергії утворення MgO та MgO·Al₂O₃, а також активності компонентів у твердому розчині шпінелі методом хімічної рівноваги.

Встановлено:

1) рівняння для визначення вільної енергії утворення MgO та MgO·Al₂O₃;

2) показано, що твердий розчин MgO·Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля;

3) визначено коефіцієнт активності MgO·Al₂O₃ при насичених MgO та Al₂O₃.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Park J., Zhang L. Kinetic Modeling of Nonmetallic Inclusions Behavior in Molten Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021. Vol. 51 (6). pp. 2453-2482. DOI: 10.1007/s11663-020-01954-1
2. Sajjad M., Dekang R., Hongyu Z., Xin T. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. 2025. Vol. 3(3). pp. 197-204. DOI: 10.47852/bonviewAAES52024058
3. Wang Q., Zhang Y., Zheng Y., Wang J., Guo Z., Wu X, Zhang Q., Zhu L. Formation and high-temperature stability Mg-doped titanium nitrides in Mg – Ti treated steel: Experiment and first-principles calculation. *Materials Characterization*. 2026. Vol. 232. pp. 234-241. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115954
4. Liu Y., Cheng S., Liu T. Study of inclusions-removal and slag-metal dispersion phenomenon in gas-stirred ladle. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2024. Vol. 22(7). pp. 843–853. DOI: 10.1515/ijcre-2024-0090
5. Nishibata H., Miyatake T., Matsuda Y., Uddin M. A., Kato Y., Harada A. Effect of wettability, number of liquid phases, and agitation procedure on agglomeration/breakup/transfer of fine particles in liquid. *Steel Research International*. 2024. Vol. 95(1). 2300331. DOI: 10.1002/srin.202300331
6. Zhu Y. L., Cui H. N., Li T., Tan M., Tang G. Z., Xin Z. Y., Xiao, T. T. Study on the motion behavior of inclusion clusters at the steel–slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54. pp. 101–114.
7. Zhu Y. L., Li T., Tang G. Z., Gu Y. J., Cui H. N. Water model study on the flotation behaviors of inclusion clusters in molten steel. *ISIJ International*. 2022. Vol.62(7). pp. 1408–1417. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2021-551

8. Zhou Y. L., Deng Z. Y., & Zhu, M. Y. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel–slag interface using water modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2017. Vol.24. pp. 627–637. DOI: 10.1007/s12613-017-1445-y
9. Xuan C. J., Mu, W. Z. Dissolution kinetics of arbitrarily-shaped alumina in oxide melt: An integration of phase-field modelling and real-time observation study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol.834. 155168. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.155168
10. Xuan C. J., Mu W. Z. A mechanism theory of dissolution profile of oxide particles in oxide melt. *Journal of the American Ceramic Society*. 2021. Vol. 104(1). pp. 57–75. DOI: 10.1111/jace.17435

REFERENCES:

1. Park J., Zhang L. (2020). Kinetic Modeling of Nonmetallic Inclusions Behavior in Molten Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 51 (6). pp. 2453-2482. DOI: 10.1007/s11663-020-01954-1
2. Sajjad M., Dekang R., Hongyu Z., Xin T. (2025). Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. Vol. 3(3). pp. 197-204. DOI: 10.47852/bonviewAAES52024058
3. Wang Q., Zhang Y., Zheng Y., Wang J., Guo Z., Wu X, Zhang Q., Zhu L. (2026) Formation and high-temperature stability Mg-doped titanium nitrides in Mg – Ti treated steel: Experiment and first-principles calculation. *Materials Characterization*. Vol. 232. pp. 234-241. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115954
4. Liu Y., Cheng S., & Liu T. (2024). Study of inclusions-removal and slag-metal dispersion phenomenon in gas-stirred ladle. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. Vol. 22(7). pp. 843–853. DOI: 10.1515/ijcre-2024-0090
5. Nishibata H., Miyatake T., Matsuda Y., Uddin M. A., Kato Y., Harada A. (2024). Effect of wettability, number of liquid phases, and agitation procedure on agglomeration/breakup/transfer of fine particles in liquid. *Steel Research International*. Vol. 95(1). 2300331. DOI: 10.1002/srin.202300331
6. Zhu Y. L., Cui H. N., Li T., Tan M., Tang G. Z., Xin Z. Y., Xiao, T. T. (2023). Study on the motion behavior of inclusion clusters at the steel–slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 54. pp. 101–114.
7. Zhu Y. L., Li T., Tang G. Z., Gu Y. J., Cui H. N. (2022). Water model study on the flotation behaviors of inclusion clusters in molten steel. *ISIJ International*. Vol.62(7). pp. 1408–1417. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2021-551
8. Zhou Y. L., Deng Z. Y., & Zhu, M. Y. (2017). Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel–slag interface using water modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. Vol.24. pp. 627–637. DOI: 10.1007/s12613-017-1445-y
9. Xuan C. J., Mu, W. Z. (2020). Dissolution kinetics of arbitrarily-shaped alumina in oxide melt: An integration of phase-field modelling and real-time observation study. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol.834. 155168. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155168
10. Xuan C. J., Mu W. Z. (2021). A mechanism theory of dissolution profile of oxide particles in oxide melt. *Journal of the American Ceramic Society*. Vol. 104(1). pp. 57–75. DOI: 10.1111/jace.17435

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0