

Д. О. Степаненко<sup>1</sup>, к.т.н., зав. відділом, ORCID 0000-0001-5913-2284

О. М. Гришин<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0009-0000-0665-1179

А. І. Белькова<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-8519-9351

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## АНАЛІТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛАКІВ ТА ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ СУМІШЕЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Анотація.** Метою дослідження є аналіз та узагальнення властивостей шлаків в межах системи  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  у різному співвідношенні компонентів та їх концентрацій, яка є основою рафінувальних шлаків у сучасному сталеплавильному виробництві. Для забезпечення технологічних функцій шлаковий розплав повинен мати комплекс оптимальних значень фізико-хімічних властивостей, зокрема: в'язкість, поверхневий натяг, електропровідність, температури плавлення (початку і кінця), ентальпія, густина та інші, які в значній мірі впливають на кінетику тепло- і масобмінних процесів в системі «метал-шлак». Інформаційний ресурс досліджень забезпечений власними експериментальними даними та даними баз даних «Шлак» і «ШУС», що містять інформацію про технологічні властивості розплавів шлакових і оксидних систем. Виконано аналіз даних про залежність властивостей оксидних систем від їх хімічного складу та температури. Розглянуто оксидні системи в межах хімічного складу  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$ . Встановлено зв'язок хімічного складу шлакових систем з властивостями їх розплавів з позиції концепції спрямованого хімічного зв'язку за допомогою інтегральних параметрів:  $\rho$  - показник стехіометрії;  $\Delta e$  - середньостатистичне число електронів, що локалізується у напрямку зв'язку катіон-аніон (К-А);  $d$  - середньостатистична між'ядерна відстань К-А;  $\text{tga}$  - зміна щільності електронів у напрямку зв'язку К-А;  $Z_{\text{A(A-A)}}$ ,  $Z_{\text{K(K-A)}}$ ,  $Z_{\text{K(K-K)}}$  - середньозважені значення зарядів катіонів і аніонів в зв'язках А-А, К-А, К-К. За результатами експериментальних та аналітичних досліджень отримано прогностичні моделі властивостей розглянутих оксидних систем, а саме для розрахунку в'язкості, електропровідності, температури кристалізації та густини шлакових розплавів в діапазоні їх температур від 1200°C до 1800°C. Представлена методика прогнозування властивостей рафінувальних шлаків може бути використана для оцінки застосування шлаків різного складу в ковші, наприклад, на установках ковш-піч.

**Ключові слова:** шлак, властивості, хімічний склад, температура, залежність.

**Посилання для цитування:** Степаненко Д. О., Гришин О. М., Белькова А. І. Аналітичні та експериментальні дослідження властивостей шлаків та шлакоутворюючих сумішей сталеплавильного виробництва. *Фундаментальні*

та прикладні проблеми чорної металургії. 2023. Вип. 37. С. 260-270.  
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-260-270>

**Вступ.** Основна роль шлаків та шлокоутворюючих сумішей сталеплавильного переділу полягає у видаленні шкідливих домішок, зниженні кисню та неметалевих включень, регулюванні газопроникності, температурному захисті поверхні металевого розплаву у ковші, доведенні вмісту основних елементів у метали до заданого рівня та ін. Для забезпечення реалізації зазначених функцій шлаковий розплав повинен мати комплекс оптимальних значень фізико-хімічних та теплофізичних властивостей, зокрема: в'язкість ( $\eta$ ), поверхневий натяг ( $\sigma$ ), електропровідність ( $\chi$ ), температури плавлення (початку і кінця), ентальпія ( $H$ ), густина ( $P$ ) та інші, які в значній мірі впливають на кінетику тепло- і масобмінних процесів в системі «метал-шлак». Як відомо, властивості шлакових і оксидних розплавів в значній мірі залежать від їх хімічного складу і температури, проте різні за хімічним складом шлакові розплави при однакових значеннях температур можуть мати однакові значення властивостей (наприклад, в'язкості) і в той же час відрізнятися за іншими значеннями властивостей. Тому, основна проблема при виборі раціонального складу шлакової системи полягає у складності визначити і оптимізувати комплекс фізико-хімічних властивостей.

**Метою дослідження** є узагальнення та аналіз властивостей шлаків в межах системи  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  у різному співвідношенні компонентів та їх концентрацій, яка є основою рафінувальних шлаків у сучасному сталеплавильному виробництві.

**Методика досліджень.** Інформаційний ресурс досліджень забезпечений власними експериментальними даними та даними баз даних «Шлак» і «ШУС» [1], що містять інформацію про технологічні властивості розплавів шлакових і оксидних систем.

З метою встановлення зв'язку хімічного складу шлакових (оксидних) систем з властивостями їх розплавів були використані інтегральні параметри концепції спрямованого хімічного зв'язку [2]:  $\rho$  - показник стехіометрії, рівний відношенню числа катіонів ( $K$ ) до числа аніонів ( $A$ ) в розплаві;  $\Delta e$  - середньостатистичне число електронів, що локалізується у напрямку зв'язку  $K-A$ ;  $d$  - середньостатистична між'ядерна відстань  $K-A$ ;  $tg\alpha$  - зміна щільності електронів у напрямку зв'язку  $K-A$ ;  $d$ ;  $Z_{A(A-A)}$ ,  $Z_{K(K-A)}$ ,  $Z_{K(K-K)}$  - середньозважені за мольними часткам значення зарядів катіонів і аніонів в зв'язках  $A-A$ ,  $K-A$ ,  $K-K$ .

**В'язкість шлаків.** Найбільш повно відомості про в'язкість шлаків, що містять фтор, представлені в роботах [3-5].

З метою встановлення зв'язку хімічного складу з в'язкістю і її прогнозування розглянуто експериментальні дані [3] в'язкості фторвмісної оксидної системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$  в діапазоні зміни її компонентів (% мас.):  $\text{CaO} - 2,1 \div 61,4$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 29,6 \div 56,6$ ;  $\text{CaF}_2 - 0 \div 59,9$ . На основі аналізу вибірки експериментальних даних ( $N = 36$ ) встановлено зв'язок в'язкості розплавів фторвмісних шлаків з їх хімічним складом, представленим модельним параметрами ( $\rho$  і  $Z_{\text{K(K-K)}}$ ) і температурою їх розплавів (рис. 1).

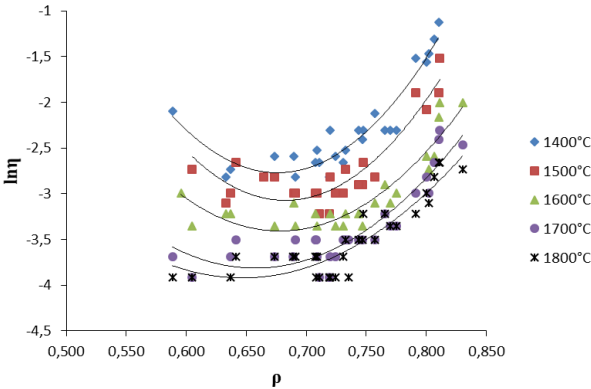


Рисунок 1 – Залежність логарифму в'язкості ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ) від показника  $\rho$  при різних температурах.

Як слідує з залежності в'язкості від показника стехіометрії ( $\rho$ ) розглянутої оксидної системи (рис. 1) крива залежності на всьому температурному інтервалі має оптимум в інтервалі значень  $\rho$   $0,65 \div 0,7$ . Зазначений інтервал показника стехіометрії ( $\rho$ ) обумовлений вмістом (% мас.) в системі  $\text{CaO}$  в діапазоні  $14,5 \div 34,8$ . Мінімальне значення в'язкості розплавів, на всьому температурному інтервалі, для системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$  в зазначеному діапазоні вмісту  $\text{CaO}$ , з точки зору структури розплавів, може бути обумовлено зменшенням кількості гетерополярних зв'язків іонів  $\text{Ca}^{2+}$  з аніонами або їх комплексами (насамперед  $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ ), які є центрами зародження кристалічної фази у розплаві.

За результатами аналізу отримано прогнозу модель розрахунку логарифму в'язкості ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ) з урахуванням їх хімічного складу в діапазоні температур  $1400 \div 1800$  °C:

$$\ln \eta = 49,11 \cdot (\rho - 0,662)^2 - 2,97 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right) + 1,42, \quad R=0,9. \quad (1)$$

Оскільки реальні шлаки сталеплавильного виробництва представляють собою багатокомпонентні оксидні системи, які, окрім

компонентів CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, що додаються під час технологічного процесу виплавки сталі, ще обов'язково містять продукти розкислення сталі, зокрема SiO<sub>2</sub> і компонентів, які потрапляють з футерівки ковшів – MgO. З метою оцінки впливу компонентів SiO<sub>2</sub> і MgO на зміну в'язкості системи CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub> виконані власні дослідження розплавів штучних оксидних систем, які представлені у таблиці 1 в діапазоні температур 1100÷1500 °С.

Оксидна суміш готувалася з хімічно чистих сполук Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, MgO, SiO<sub>2</sub> та прожарювалася при температурі 800 °С. Підготовлені однорідні суміші розплавляли в печі Таммана в атмосфері аргону. Розплав доводили до температури 1600 °С і витримували протягом 30 хв.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних оксидних систем.

№ п/п	Масова частка компонентів, %					
	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> :MgO
1	32	32	32	3	1	0,33
2	31.5	31	32	3	2,5	0,83
3	31	31	31	3	4	1,33
4	31	31	31	6	1	0,17
5	29	29	29	12	1	0,08

На рисунку 2 наведено результати досліджень температурної залежності в'язкості експериментальних шлаків, що відрізняються співвідношенням в них компонентів SiO<sub>2</sub>:MgO (табл. 1).

Дослідження показали, що при введенні додаткової кількості MgO (6 % мас та 12% мас.) шлак кристалізується при температурах вище 1300 °С (композиції із співвідношенням SiO<sub>2</sub>:MgO 0,17 та 0,08).

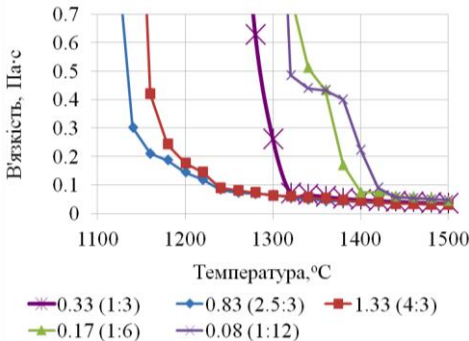


Рисунок 2 – Температурна залежність в'язкості досліджуваних шлаків з різним співвідношенням SiO<sub>2</sub>:MgO.

Підвищення вмісту SiO<sub>2</sub> з 1% до 4% призводить до поступового зниження в'язкості в межах температур 1150 – 1250 °С та робить їх

більш «довгими» порівняно із вихідним складом (співвідношення  $\text{SiO}_2:\text{MgO}$  складає 0,33). Навпаки для шлаків з 6% та 12%  $\text{MgO}$  на політермі в'язкості є сходинки, наявність яких можна пояснити утворенням в розплаві твердої фази  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , що потребує додаткових досліджень.

За даними [4, 5] з позиції концепції спрямованого хімічного зв'язку [2] з урахуванням температурного фактору були отримані моделі для прогнозування в'язкості шлаків, що належать до кожного з масивів.

Фторвмісні шлаки в діапазоні вмісту компонентів (% мас.):  $\text{CaO} - 17\div 53$ ;  $\text{SiO}_2 - 0\div 47$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1\div 55$ ;  $\text{MgO} - 0\div 21$ ;  $\text{CaF}_2 - 10\div 50$ :

$$\ln \eta = 1,25 - 5,08 \cdot d - 1,61 \cdot \Delta e + 36,3 \cdot \text{tg} \alpha - 0,412 \cdot \rho + 6,37 \cdot \left( \frac{1000}{T} \right), \quad R=0,87. \quad (2)$$

Враховуючи сучасні тенденції по зниженню використання  $\text{CaF}_2$  у складі шлакових сумішей при виробництві сталі у зв'язку з його високою вартістю порівняно до інших компонентів, не екологічністю та негативним впливом на стійкість футерівки сталь-ковшів в зоні шлакового поясу, нижче представлені результати досліджень зв'язку хімічного складу шлаків, що не містять  $\text{CaF}_2$ , з в'язкістю їх розплавів.

Зокрема, розглянуто низькокремнеземні шлаки у діапазоні вмісту компонентів (% мас.):  $\text{CaO} - 20\div 63$ ;  $\text{SiO}_2 - 0\div 53$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0\div 65$ ;  $\text{MgO} - 0\div 28$ , та висококремнеземні шлаки у діапазоні вмісту компонентів (% мас.):  $\text{CaO} - 20\div 40$ ;  $\text{SiO}_2 - 40\div 70$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5\div 34$ ;  $\text{MgO} - 0\div 19$  в діапазоні температур 1200– 1550 °С за даними [4]. Отримано відповідні прогнозні рівня:

– для низькокремнеземних шлаків:

$$\ln \eta = 3,97 - 11,08 \cdot d - 3,68 \cdot \Delta e + 54,85 \cdot \text{tg} \alpha - 6,26 \cdot \rho + 9,94 \cdot \left( \frac{1000}{T} \right), \quad R=0,9; \quad (3)$$

– для високо кремнеземних шлаків:

$$\ln \eta = -3,1 + 15,84 \cdot d + 5,05 \cdot \Delta e - 9,87 \cdot \text{tg} \alpha - 51,6 \cdot \rho + 10,33 \cdot \left( \frac{1000}{T} \right), \quad R=0,93. \quad (4)$$

**Електропровідність шлаків.** На підставі даних [3] про електропровідність фторвмісних шлаків оксидної системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$ , що була розглянута вище, виконано дослідження зв'язку хімічного складу шлаків з показниками електропровідності їх розплавів в діапазоні 1400–1800 °С. Найвищий ступінь кореляції зв'язку в'язкості з хімічним складом системи був отриманий при згорті складу за допомогою параметру  $Z(k-k)$ , що характеризує середньозважені за мольними часткам значення зарядів катіонів в

напрямку зв'язку К-К (рис. 3). Встановлений зв'язок може бути пояснений з позиції структури алюмосилікатних розплавів.

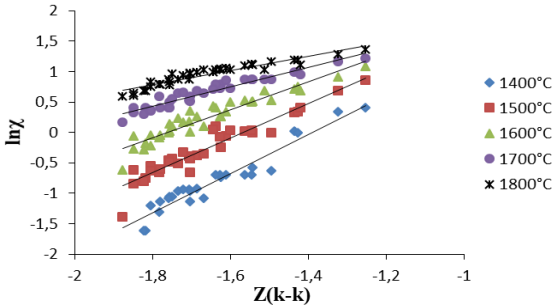


Рисунок 3 –  
Залежність  
логарифму  
електропровідності  
( $\text{Om}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ) від  
показника  $Z(k-k)$   
при різних  
температурах.

Як відомо, з мінералогічної точки зору, алюмосилікатні розплави складаються зі складних іонів, зокрема аніонів  $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ , які мають різну структуру від найпростішої  $\text{SiO}_4^{4-}$  до полімерної і простих іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{F}^{2-}$  та ін. Згідно з власними експериментальними дослідженнями [6] алюмосилікатні розплави в області температур  $1450 \div 1550$  °C складаються, щонайменше, з двох рідких фаз, одна з яких представлена полімерними аніонами  $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$  з заміщенням кремнію на залізо і алюміній, а інша розупорядкованою системою простих іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{F}^{2-}$  та ін. Саме завдяки кількісному та якісному іонному складу розупорядкованої системи визначається величина електропровідності. Тому, як слідує з встановленої залежності, представленої на рисунку 3 і визначення параметру  $Z(k-k)$ , величина електропровідності визначається саме вільними катіонами.

За результатами аналізу отримано прогностичну модель розрахунку логарифму питомої електропровідності ( $\text{Om}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ) для фторвмісних шлаків системи  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$  в діапазоні вмісту компонентів (мас. %):  $\text{CaF}_2$  – 0-60,  $\text{CaO}$  – 2-61,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 29-56, з урахуванням їх хімічного складу в діапазоні температур  $1400 \div 1800$  °C:

$$\ln \chi = -3,4 + 2,14 \cdot Z(k-k) - 4,44 \cdot \left( \frac{T}{1000} \right), \quad R=0,95. \quad (5)$$

**Температура кристалізації шлаків.** За експериментальними даними щодо залежності в'язкості шлаків від температури [4, 5] визначено температуру кристалізації шлаків у момент різкого збільшення в'язкості ( $>5$  Па·с). Встановлено, що температура кристалізації фторвмісних шлаків та безфтористих із вмістом  $\text{SiO}_2$  до 50% у діапазоні (мас. %):  $\text{CaO}$  - 17÷63;  $\text{SiO}_2$  - 0÷53;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 0÷65;  $\text{MgO}$  - 0÷28;  $\text{CaF}_2$  - 0÷50 може бути описана із задовільною точністю рівнянням:

$$T_k = 1597 - 801 \cdot d - 225 \cdot \Delta e + 4357 \cdot \text{tg}\alpha + 1246 \cdot \rho, ^\circ\text{C}, \quad R=0,8. \quad (6)$$

Температура кристалізації безфтористих висококремнеземистих шлаків у діапазоні вмісту компонентів (мас. %): CaO – 20÷40; SiO<sub>2</sub> – 40÷70; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5÷31; MgO – 0÷19 описується рівнянням:

$$T_k = 5807 - 2252,35 \cdot d - 617,3 \cdot \Delta e + 11981,2 \cdot \text{tg}\alpha + 1968 \cdot \rho, ^\circ\text{C}, \quad R=0,9. \quad (7)$$

**Густина шлакових розплавів.** Для оцінки результатів взаємодії розплавів при високих температурах у системі метал-шлак на різних етапах сталеплавильного переділу та виконання теплотехнічних розрахунків необхідне знання маси шлакових розплавів для визначення якої необхідно знати їх щільність. У теорії та практиці розрахунків з хімії та технології звичайного технічного скла для оцінки його щільності у твердому стані використовують різні адитивні методи, які забезпечують задовільну точність у рамках конкретних складів [7], проте не придатні для визначення щільності металургійних шлакових розплавів при високих температурах, що досягають значень 1500÷1600 °C і вище.

В базі даних «Шлак» сконцентровані дані різних авторів щодо визначення щільності рідких шлаків різного складу в лабораторних умовах за температури ≈1600°C (табл. 2).

Таблиця 2 – Густина рідких шлаків при температурі 1600°C.

№	Вміст компонентів, мас. %						Кіл-ть даних	Діапазон величин густини, т/м <sup>3</sup>	Посилання	
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO				CaF <sub>2</sub> (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
1	0-60	0-60	0-55	0-24,3	0-94,7	0-55,9		60	2,65-4,9	[8]
2	0-62	0-100			0-100	0-100		40	2,06-4,8	[9]
3	20-50	5-50	10	10	0-40		(0-10)	12	2,9-4	[10]
4		45,5-65,6	14,8-32,9	15,4-21,6				6	2,38-2,72	[11]
5		35-55		5-25	20-40			15	2,84-3,31	[12]
6	32,2-51,2	9,3-41	12,2-47,6					11	2,66-2,74	[13]
7	0-40		0-40				20-100	18	2,45-2,68	[14]
8	40,8-52,9	3-20	34,2-44,1	0-10				11	2,69-2,78	[15]
9	16-58	14,3-70	5-15	0-37			0-40	105	2,44-3,0	[5]

З використанням параметрів  $\Delta e$  та  $\rho$ , що відображають повний хімічний склад оксидних систем та молекулярної ваги ( $M$ ), що обчислюється при поданні молекули шлаку у вигляді  $K\rho A$  [2], де  $K$  – катіон,  $A$  – аніон, отримано рівняння:

$$P = -1,2735 - 0,0854 \cdot \Delta e + 2,0694 \cdot \rho + 0,0497 \cdot M, \text{ т/м}^3, R=0,96. \quad (8)$$

Найменша густина характерна для шлаків із високим вмістом  $\text{SiO}_2$ , найбільша – для шлаків із високим вмістом оксидів заліза і марганцю. Щільність оксифторидних шлаків, що не містять оксидів заліза та марганцю, знаходиться в діапазоні 2,5-3 т/м<sup>3</sup>.

За даними [4] при перегріві від температури плавлення до 1700°C густина шлаків знижується з градієнтом -0,0014 т/м<sup>3</sup>·град, що слід враховувати при розрахунках.

В цілому отримане рівняння забезпечує високу точність у широкому діапазоні густини від 2,06 до 4,9 т/м<sup>3</sup> і рекомендується для прогнозних розрахунків густини рідких шлаків різного призначення.

### Висновки

З метою вибору раціонального складу шлакових системи для за комплексом фізико-хімічних властивостей їх розплавів, виконано аналіз літературних та власних даних про властивості фторвмісних шлаків системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$  та без фтористих шлаків системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$ , які є базовими системами рафінувальних шлаків у сталеплавильному виробництві. З метою врахування повного хімічного складу досліджуваних шлакових систем з властивостями їх розплавів були використані інтегральні параметри концепції спрямованого хімічного зв'язку ( $\rho$ ,  $d$ ,  $\Delta e$ ,  $Z_{(k-k)}$  та ін.) та, на підставі кореляційно-регресійного аналізу, отримано рівняння для розрахунку в'язкості, електропровідності, температури кристалізації та густини шлакових розплавів в діапазоні їх температур від 1200°C до 1800°C. Представлена методика прогнозування властивостей рафінувальних шлаків може бути використана для оцінки застосування шлаків різного складу в ковші, наприклад, на установках ковш-піч.

### Перелік посилань

1. Приходько Э. В., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Степаненко Д.А. *Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем*. Днепропетровск : Пороги. 2013. 339 с.
2. Приходько Э. В. *Металлохимия многокомпонентных систем*. М. : Металлургия. 1995. 320с.
3. Физико-химические свойства расплавов системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$  / Поволоцкий Д. Я., Мищенко В. Я., Вяткин Г. П. и др. // *Известия ВУЗов Черная металлургия*. 1970. №12. С. 8 - 11.
4. *Атлас шлаков*. Справ. изд. / Пер. с нем. Г.И. Жмойдина под ред.



И. С. Куликова. М. : Металлургия. 1985. 208с.

5. Физические свойства расплавов  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  / Акбердин А. А., Куликов И. С., Ким В. А. и др. // М.: Металлургия. 1987. 144 с.

6. Степаненко Д. А., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Баумер В. Н. Изучение микрогетерогенности расплавов доменных шлаков на основе исследования их фазового состава. *Металл и литье Украины*. 2012. №1(224). С. 35-38.

7. Матвеев М. А., Матвеев Г. М., Френкель Б. Н. *Расчеты по химии и технологии стекла*. М.: Госстрой издат. 1972. 240 с.

8. Попель С. И. *Физико-химические основы металлургических процессов*. М. : Металлургия. 1964. С. 118-130.

9. Соколов В. И., Попель С. И., Есин О. А. Плотность и молярный объем шлаков *Известия вузов. Черная металлургия*. 1970. №2. С. 10-15.

10. Влияние окислов железа, хрома и ванадия на поверхностное натяжение и плотность расплавов системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  / Мусихин В. И., Лепинский Б. М., Черняев В. Г. [и др.] // *Физическая химия металлургических расплавов*. Свердловск : АН СССР. 1969. Вып. 20. С. 85-87.

11. Дерябин А. А., Попель С. И., Зупник А. Е. Адгезия окислов с техническими сплавами и сталями. *Известия АН СССР. Металлы*. 1968. №2. С. 78-79.

12. Торопов Н. А., Борянцев Б. А. Физико-химические свойства и кристаллизация расплавов системы окись магния-закись железа-кремнезем. *Структурные превращения в стеклах при повышении температуры*. М.: Наука. 1965. С. 205-232.

13. Комельков В. К. Разработка, исследование и внедрение новых синтетических шлаков для рафинирования стали. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ЦНИИЧермет. 1974. 33 с.

14. Плотность фторидных расплавов / Жмойдин Г. И., Соколов В. И., Подгорнов Г. В. [и др.] // *Теория металлургических процессов*. 1975. №3. С. 15-157.

15. Еднерал Ф. П., Смоляренко В. Д., Якушев А. М. Исследования свойств шлаков, предназначенных для обработки металла в ковше. *Производство стали и стального литья: Тр. Московского вечернего металлургического института*. М. 1967. Вып. 5. С. 153-184.

## References

1. Prykhod'ko, E. V., Tohobyts'ka, D. M., Khamkhot'ko, O. F., & Stepanenko, D. O. (2013). *Prohnozuvannya fizyko-khimichnykh vlastyivostey oksydneykh system*. Porohy

2. Prykhod'ko, E. V (1995). *Metalokhimiya bahatokomponentnykh system*. Metalurhiya

3. Povolots'kyu, D. Ya., Mishchenko, V. Ya., Vyatkin, H. P. et al. (1970). *Fizyko-khimichni vlastyivosti rozplaviv systemy SaO - Al2O3 - CaF2*. *Visti VNZ Chorna metalurhiya*, 12, 8 – 11

4. Kulikov, I. S. (Ed.) *Atlas shlakiv. Sprav. vyd.* (1985). Metalurhiya

5. Akberdin, A. A., Kulykov, I. S., Kim, V. A. et al. (1987). *Fizychni vlastyivosti rozplaviv CaO-SiO2-Al2O3-MgO-CaF2*. Metalurhiya

6. Stepanenko, D. A., Tohobyts'ka, D. M., Khamkhot'ko, O. F., & Baumer, V. N. (2012). Vyvchennya mikroheterohennosti rozplaviv domennykh shlakiv na osnovi doslidzhennya yikh fazovoho skladu. *Metal ta lyttya Ukrainy*, 1(224), 35-38
7. Matvyeyev, M. A., Matvyeyev, H. M., & Frenkel', B. N. (1972). *Rozrakhunky z khimiya ta tekhnolohiyi skla*. Derzhbud yzdat
8. Popel', S. I. (1964). *Fizyko-khimichni zasady metalurhiynykh protsesiv*. Metalurhiya
9. Sokolov, V. I., Popel', S. I., & Yesin, O. A. (1970). Shchil'nist' ta molyarnyy obsyah shlakiv. *Yzvestyya vuziv. Chorna metalurhiya*, 2, 10-15
10. Musykhin, V. I., Lepins'kykh, B. M., Chernyayev, V. H. et al. (1969). Vplyv oksydiv zaliza, khromu ta vanadiyu na poverkhnevyy natyah ta shchil'nist' rozplaviv systemy  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ . *Fizychna khimiya metalurhiynykh rozplaviv. AN SRSR*, 20, 85-87
11. Deryabin, A. A., Popel', S. I., & Zupnyk, A. Ye. (1968). Adheziya oksydiv z tekhnichnymy splavamy ta stalyamy. *Yzvestyya AN SRSR. Metaly*, 2, 78-79
12. Toropov, N. A., & Boryantsev, B. A. (1965). Fizyko-khimichni vlastyvoli ta krystalizatsiya rozplaviv systemy oksy mahniyu-zakys zaliza-kremnezem. *Strukturni peretvorennya u skli pry pidvyshchenni temperatury*. Nauka, 205-232
13. Komel'kov, V. K. (1974). *Rozrobka, doslidzhennya ta vprovadzhennya novykh syntetychnykh shlakiv dlya rafinuvannya staly*. Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk. Modkva, TSNDIChermet
14. Zhmoydin, H. I., Sokolov, V. I., & Pidhornov, H. V. et al. (1975). Shchil'nist' ftorydnykh rozplaviv. *Teoriya metalurhiynykh protsesiv*, 3, 15-157
15. Edneral, F. P., Smolyarenko, V. D., & Yakushev, A. M. (1967). Doslidzhennya vlastyvostey shlakiv, pryznachenykh dlya obroby metalu v kovshi. *Vyrobnytstvo stali ta stalevoho lyttya: Tr. Moskovs'kyy vechirniy metalurhiyny inlytut.*, 5, 153-184

**D. O. Stepanenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0001-5913-2284

**O. M. Grishin**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0009-0000-0665-1179

**A. I. Belkova**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8519-9351

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## **ANALITICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF PROPERTIES OF SLAG AND SLAG-FORMING MIXTURES OF STEELMAKING PRODUCTION**

**Abstract.** The aim of the study is to analyze and generalize the properties of slags within the  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  system in different ratios of components and their concentrations, which is the basis of refining slags in modern steelmaking. To ensure the technological functions, the slag melt should have a set of optimal values of physical and chemical properties, in particular: viscosity, surface tension, electrical conductivity, melting temperature (beginning and end), enthalpy, density and others, which significantly affect the kinetics of heat and mass transfer processes in the "metal-slag" system. The information resource of researches is provided by own experimental data and data of databases "Slag" and "SFM" containing

information about technological properties of melts of slag and oxide systems. The analysis of the data on the dependence of the properties of oxide systems on their chemical composition and temperature was performed. Oxide systems within the chemical composition  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  are considered. The connection of the chemical composition of slag systems with the properties of their melts from the point of view of the concept of directed chemical bonding using integral parameters is established:  $\rho$  is the stoichiometry index;  $\Delta e$  is the average number of electrons localized in the direction of the cation-anion (K-A) bond;  $d$  is the average inter-nuclear distance K-A;  $\text{tg}\alpha$  is the change in the electron density in the direction of the K-A bond;  $Z_{A(A-A)}$ ,  $Z_{K(K-A)}$ ,  $Z_{K(K-K)}$  are the weighted average values of cation and anion charges in the A-A, K-A, K-K bonds. Based on the results of experimental and analytical studies, predictive models of the properties of the considered oxide systems were obtained, namely for the calculation of viscosity, electrical conductivity, crystallization temperature and density of slag melts in the range of their temperatures from 1200°C to 1800°C. The presented method of predicting the properties of refining slags can be used to evaluate the use of slags of different composition in the ladle, for example, in ladle-furnace installations.

**Key words:** slag, properties, chemical composition, temperature, dependence.

**For citation:** Stepanenko, D. O., Grishin, O. M., & Belkova, A. I. (2023). Analytical and experimental studies of properties of slag and slag-forming mixtures of steelmaking production. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 260-270. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-260-270>

*Стаття надійшла до редакції збірника 19.10.2023 р.*

*Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*