

Д. О. Степаненко, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0002-0184-8295

Д. М. Тогобицька, д.т.н., проф., ORCID 000-0001-6413-4823

А. І. Белькова, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0001-8519-9351

Н. О. Цюпа, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0003-0682-461X

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ДО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ СКЛАДІВ ШЛАКІВ ТА ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ СУМІШЕЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

Метою роботи є розвиток наукових уявлень про структурний стан шлакових розплавів на підставі дослідження їх властивостей і розробка раціонального складу шлаку при виплавці чавуну та сталі.

При вирішенні задачі вибору раціонального хімічного складу металургійних шлаків та шлакоутворюючих сумішей важливим є вивчення їх високотемпературних властивостей (в'язкість, температура плавлення, електропровідність, поверхневий натяг та ін.). Згідно з дослідженнями вітчизняних та зарубіжних вчених, фізико-хімічні властивості шлакових і алюмосилікатних розплавів, зокрема їх в'язкість та електропровідність, залежать від хімічного складу системи і температури і відображають структурні зміни в розплаві.

Незважаючи на відсутність єдиної і загальної теорії будови оксидних (шлакових) розплавів, прояв частини їх властивостей, добре пояснюється іонною теорією згідно якої, в'язкість визначається структурою полімерних іонів (наприклад, аніонами $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$), а електропровідність більш рухливими іонами – катіонами та/або аніонами (наприклад, Ca^{2+} , Mg^{2+} , O^{2-} , F^- та ін.). З підвищенням температури шлакового розплаву ослаблення зв'язків його структурних частинок (іонів і/або їх груп) є важливою і необхідною умовою для підвищення ефективності процесів тепло- і масообміну в системі «метал-шлак» і реалізації рафінуючих функцій розплаву. Тому, дослідження взаємозв'язку в'язкості і електропровідності та розробка на їх основі критерію оцінки структурного стану шлакового розплаву, встановлення раціонального хімічного складу для конкретних технологічних умов процесу виплавки чавуну чи сталі має важливе наукове та практичне значення.

На підставі виконаних теоретичних та аналітичних досліджень взаємозв'язку в'язкості та електропровідності різних оксидних систем і розрахованих енергії активації в'язкості (E_η) та електропровідності (E_χ) запропоновано, у якості структурно чутливого критерію, відношення $n = E_\eta / E_\chi$, яке змінюється в областях: $E_\eta > E_\chi = n > 1$, $E_\eta < E_\chi = n < 1$ і $E_\eta \approx E_\chi = n \approx 1$, що свідчать про наявність трьох структурних областей: гетерогенний ($E_\eta > E_\chi = n > 1$), гомогенний ($E_\eta < E_\chi = n < 1$) і рівноважний стан розплаву ($E_\eta \approx E_\chi = n \approx 1$).

Виконані в статті дослідження розширили наукові уявлення про структуру

шлакових розплавів, а запропонований критерій дозволяє здійснювати науково обґрунтований вибір раціональних складів шлаків та шлакоутворюючих сумішей при виробництві чавуну та сталі.

Ключові слова: шлак, в'язкість, електропровідність, модель, критерій, структура.

Посилання для цитування: Степаненко Д. О., Тогобицька Д. М., Белькова А. І., Цюпа Н. О. До вибору раціональних складів шлаків та шлакоутворюючих сумішей при виробництві чавуну та сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 200-211. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-200-211

Одне з важливих умов, що в певній мірі забезпечить ресурсо- і енергозбереження та підвищить якість металопродукції є вибір раціонального складу шлаку та шлакоутворюючих сумішей на всіх металургійних переділах від виробництва чавуну до розливання сталі.

При вирішенні задачі вибору раціонального хімічного складу шлаку, або шлакоутворюючої суміші, перш за все, важливим є вивчення їх фізико-хімічних властивостей (в'язкість, температура плавлення, електропровідність поверхневий натяг та ін.). Згідно з дослідженнями різних вчених [1-3] властивості шлакових і алюмосилікатних розплавів є наслідком складності структури і розмірів іонів або їх груп.

Важливим показником при виборі раціонального складу шлаку є визначення температурного діапазону солідус-ліквідус, що характеризує перехід шлаку з гетерогенного стану в гомогенний. Гомогенність є важливою і необхідною умовою для підвищення ефективності процесів тепло- і масообміну в системі «метал-шлак» і реалізації рафінуючих функцій шлакового розплаву. Визначення температур ліквідус і солідус для оксидних розплавів пов'язане з труднощами експериментальних досліджень, а наявні дані про температури початку та кінця кристалізації досить умовні, а часто суперечливі і вимагають більш точних експериментальних методів. Тому актуальним є необхідність покращення технологічності та енергетичні параметри металургійних процесів виплавки чавуну та сталі.

Метою роботи є розвиток наукових уявлень про структурний стан шлакових розплавів на підставі дослідження їх властивостей і розробка раціонального складу шлаку при виплавці чавуну та сталі.

Основні результати дослідження. Виходячи з уявлень Я. І. Френкеля про електропровідність іонних розплавів, у перенесенні електричного струму беруть участь частинки (іони), здатні, в силу безперервного перерозподілу кінетичної енергії, переходити з одного відносно стійкого

стану в інший. Імовірність такого зміщення під впливом сил зовнішнього поля пропорційна $e^{-\frac{E_\chi}{RT}}$ [4]. З рівняння (1) слідує, що електропровідність є функцією не тільки температури, але і рухливості іонів, яка істотно залежить від енергії їх взаємодії, обумовленої хімічним складом, що є спільним як для електропровідності (E_χ), так і для в'язкості (E_η) див. рівн. (2).

$$\chi = B \cdot e^{-\frac{E_\chi}{RT}}, \quad (1)$$

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_\eta}{RT}}, \quad (2)$$

де T – абсолютна температура, К; A, B – величини, постійні для конкретної рідини; R – універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль К)); E_χ, E_η – енергії активації електропровідності та в'язкості відповідно, Дж/моль.

З вищевикладеного слідує, що електропровідність, як і в'язкість, обумовлена хімічним складом шлаку і структурою його розплаву, тобто здатна відображати фазові зміни у розплаві. Тому при вивченні в'язкості та електропровідності шлаків в якості їх структурно-чутливих властивостей представляється можливим більш докладно виконати оцінку фазового стану розплавів.

У свою чергу зв'язок між в'язкістю і електропровідністю описується виразом [5]:

$$\chi^n \cdot \eta = const. \quad (3)$$

Виходячи з рівнянь для електропровідності та в'язкості відповідно(1) і (2) їх добуток буде дорівнювати

$$\chi^n \cdot \eta = B^n A e^{\frac{-nE_\chi + E_\eta}{RT}}. \quad (4)$$

Добуток не буде залежати від температури, якщо

$$-nE_\chi + E_\eta = 0. \quad (5)$$

Звідси слідує

$$\chi^n \cdot \eta = const \text{ і } \chi^n \cdot \eta = B^n \cdot A \quad (6)$$

$$n = \frac{E_\eta}{E_\chi}. \quad (7)$$

Як зазначено у ряді робіт [5, 6] для різних оксидних систем з урахуванням температури їх розплаву показник n може бути >1 або <1 , відповідно $E_\eta > E_\chi$ і $E_\eta < E_\chi$. Можливість нерівності $n > 1$ і $n < 1$ автори робіт [6, 7] пов'язують з гетерогенністю алюмосилікатних розплавів. Так, нерівність $n < 1$ обумовлена дисоціацією кремнійкисневих аніонів і можливістю перегрупування гетерополярних зв'язків в гомеополярні при високих температурах. Навпаки, при $n > 1$ виконується нерівність $E_\eta > E_\chi$, що обумовлено гетерополярністю зв'язків між частинками в алюмосилікатному розплаві і його кристалізацією при зниженні температури. Отже, гетерогенність шлакових розплавів тягне за собою погіршення їх технологічних властивостей, за рахунок чого погіршуються дифузійні процеси в системі «метал-шлак».

З метою вивчення взаємозв'язку в'язкості і електропровідності та розрахунку відповідних енергій активації проаналізовано експериментальні данні бази даних «Шлак» [7] різних оксидних систем, зокрема: $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ [8]; $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$ [9]; $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [10]. Для оцінки структурного стану розплавів вищезазначених оксидних систем виконано розрахунок їх енергій активації в'язкості та електропровідності. Для цього було визначено логарифми в'язкості та електропровідності, що в математичному значенні стосовно рівнянь(1) та (2) має вид:

$$\ln \eta = \frac{E_\eta}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln A, \quad (8)$$

$$\ln \chi = -\frac{E_\chi}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln B. \quad (9)$$

Для спрощення виразів (8,9) введемо позначення:

$$y = \ln \eta, \quad A_1 = \frac{E_\eta}{R}, \quad x = \frac{1}{T}, \quad A_2 = \ln A,$$

звідки, $E_\eta = A_1 \cdot R$.

Графічна залежність, зокрема, $\ln \eta = f(1/T)$, представлена на рис. 1.

Аналогічно виконується розрахунок енергії активації електропровідності (E_χ).

Виконаний аналіз результатів розрахунку енергій активації в'язкості (E_η) та електропровідності (E_χ) показав (рис. 2), що для досліджуваних складів оксидних систем характерним є наявність трьох областей співвідношень $E_\eta/E_\chi = n$, коли $n \leq 1$, $n \approx 1$ і коли $n \geq 1$.

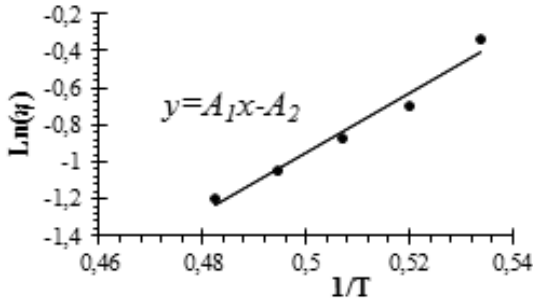


Рисунок 1 – Залежність логарифму в'язкості ($\ln\eta$) від температури ($1/T$).

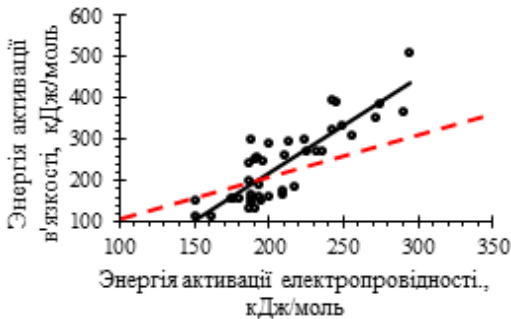


Рисунок 2 – Зв'язок енергій активації в'язкості і електропровідності оксидних систем в діапазоні температур 1350-1800°C.

Відношення $E_\eta > E_\chi$ свідчить про гетерогенність розплаву, тобто, у розплаві наявний ближній порядок зв'язків між структурними частинками, що призводить до формування двох і більше фаз і супроводжується процесом кристалізації, а відношення $E_\eta < E_\chi$ – навпаки, свідчить про процеси розупорядкування іонних структур шлакового розплаву і характеризують розплав близький до гомогенного. Відношення $E_\eta/E_\chi = n \approx 1$ є проміжним станом розплаву, тобто характеризує розплав як систему яка знаходиться у рівноважному стані між гетерогенним та гомогенним його станами. При умові збереження постійності хімічного стану розплаву одним із основних чинників, що може змістити систему відносно рівноваги в той чи інший бік – є температура (при умові постійного тиску).

Представлена методика оцінки структурного стану шлакових розплавів на підставі досліджень взаємодії їх в'язкості та електропровідності була раніше успішно використана для вибору раціонального складу шлаків в умовах роботи доменної печі №8 «АрселорМіттал Кривий Ріг» [11]. Але даний метод може бути використаний для обґрунтування вибору раціонального складу шлаків і для сталеплавильного виробництва, зокрема

розглянемо систему $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ [8] в діапазоні вмісту компонентів (мас.%): CaF_2 – 0-60, CaO – 2-61, Al_2O_3 – 29-56, та в діапазоні температур зміни їх в'язкості та електропровідності $1400\div 1800$ °С, яка є базовою для рафінувальних шлаків при виплавці сталі в ДСП, обробці її на УКП та при ЄШП.

З метою оцінки структурних особливостей даної системи та вибору її раціонального складу виконано розрахунки енергій активації в'язкості (E_η) та електропровідності (E_χ) при температурах $1400\div 1800$ °С. На підставі розрахованих значень $n=E_\eta/E_\chi$ встановлено їх зв'язок з хімічним складом потрійної системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ (рис. 3-5)

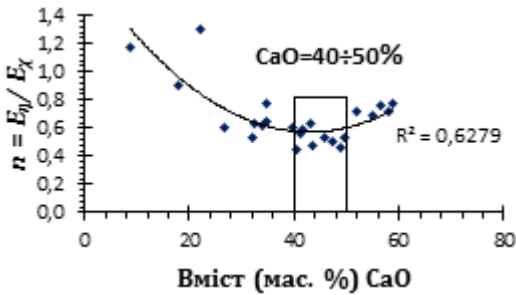


Рисунок 3 – Зв'язок $n=E_\eta/E_\chi$ з вмістом CaO у системі $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$.

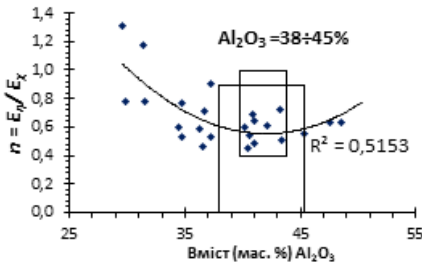


Рисунок 4 – Зв'язок $n=E_\eta/E_\chi$ з вмістом Al_2O_3 у системі $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$.

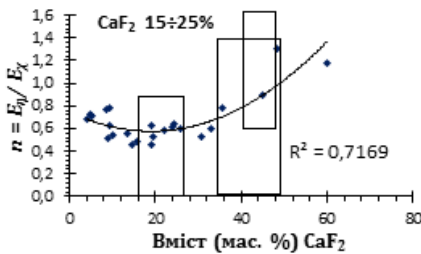


Рисунок 5 – Зв'язок $n=E_\eta/E_\chi$ з вмістом CaF_2 у системі $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$.

За умови $n = E_{\eta} / E_{\chi} < 1$ шлакові розплави представляють собою гомогенну систему зі стабільним значенням в'язкості і високою активністю катіонів, для системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ це, насамперед, іони Ca^{2+} , які безпосередньо приймають участь в процесах рафінування сталі. Як слідує з рис. 3-5 оптимальним складом для системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ можна вважати вміст в ній компонентів: CaO – 40-50%; Al_2O_3 – 38-45%; CaF_2 15-25% при цьому $n = E_{\eta} / E_{\chi} < 1$, що свідчить про їх гомогенний стан. Однак для конкретних технологічних умов сталеплавильного процесу визначений оптимальний діапазон вмісту компонентів для системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ може бути звужений у відповідності до технологічних вимог що пред'являються до шлакового розплаву, що потребує додаткових експериментальних досліджень в'язкості та електропровідності.

Отримані результати узгоджуються з діаграмою фазового стану даної системи (див. рис. 6). Встановлений вище оптимальний склад для системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ на діаграмі відмічено зафарбованим трикутником, який знаходиться в області рідкого стану системи.

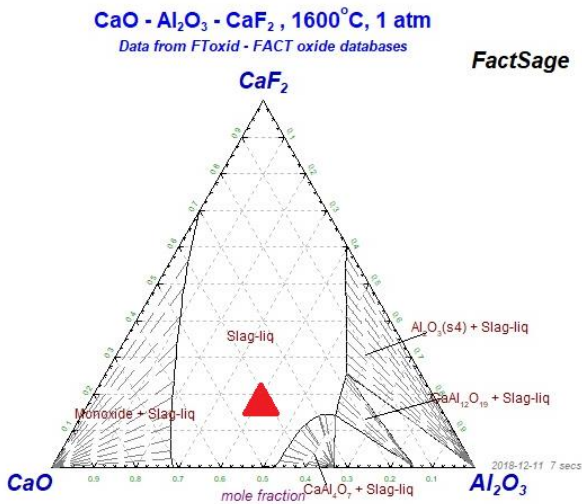


Рисунок 6 –
Діаграма фазового стану розплаву системи $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ при температурі 1600°C [9].

З вищевикладеного слідує, що електропровідність і в'язкість, обумовлені хімічним складом і структурою розплаву шлаку, а їх зміна здатна відображати фазові перетворення у розплаві.

Прогнозування в'язкості, електропровідності та відповідних енергій активації є першим кроком до розуміння впливу структури шлакових розплавів на їх фізико-хімічні властивості та науково обґрунтованого вибору раціонального їх складу.

На основі аналізу вибірки експериментальних даних ($N = 36$) [8] встановлено зв'язок в'язкості і питомої електропровідності розплавів фторвмісних шлаків з їх хімічним складом, представленим через модельні параметри (ρ і $Z(k-k)$) концепції спрямованого хімічного зв'язку [10, 11] і температурою їх розплавів (рис. 7, 8).

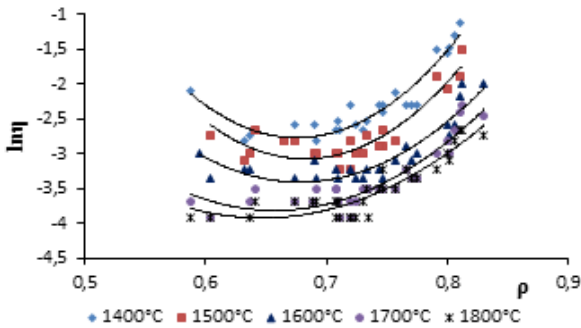


Рисунок 7 – Залежність логарифму в'язкості ($\ln\eta$) від показника ρ при різних температурах.

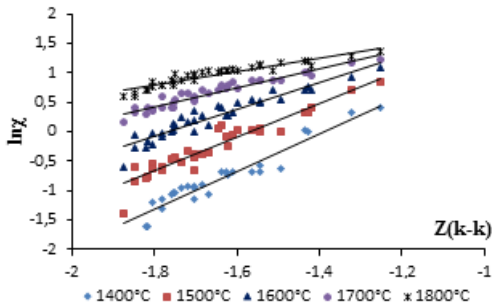


Рисунок 8 – Залежність логарифму електропровідності ($\ln\chi$) від показника $Z(k-k)$ при різних температурах.

За результатами аналізу отримано прогнозу модель розрахунку логарифму в'язкості ($\ln\eta$) і питомої електропровідності ($\ln\chi$) для фторвмісних шлаків системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ в діапазоні вмісту компонентів (мас.%): CaF_2 – 0-60, CaO – 2-61, Al_2O_3 – 29-56, з урахуванням їх хімічного складу в діапазоні температур $1400 \div 1800$ °C:

$$\ln \eta = -2,36 + 5,7 \cdot \rho - 3 \cdot \left(\frac{T}{1000} \right), \text{ Па} \cdot \text{с}, R^2 = 0,73 \quad (10)$$

$$\ln \chi = -3,4 + 2,14 \cdot Z(k - k) - 4,44 \cdot \left(\frac{T}{1000} \right), \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}, R^2 = 0,95 \quad (11)$$

На основі розрахованих даних енергії активації електропровідності виконано кореляційно-регресійний аналіз зв'язку E_χ розплавів фтормісних шлаків системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ з їх хімічним складом, представленим через параметр стехіометрії багатокомпонентної оксидної системи (ρ) в діапазоні температур $1400\div 1800^\circ\text{C}$ і отримано відповідну прогнозну модель:

$$E_\eta = 439,9 \cdot \rho - 212,1, \text{ кДж/моль}, R^2 = 0,67 \quad (12)$$

$$E_\chi = 415,86 \cdot \rho - 183,26, \text{ кДж/моль}, R^2 = 0,65 \quad (13)$$

Розроблені моделі (10-13) дозволять виконати прогноз в'язкості, електропровідності та відповідних енергій активації фтормісних шлаків системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$.

Представлені вище рекомендації потребують додаткових досліджень в'язкості та електропровідності оксидних систем, проте, в рамках виконаних досліджень можуть бути використані у якості рекомендацій по зменшенню використання імпортованого плавикового шпату в складі шлакоутворюючих сумішей при виробництві сталі.

Висновки

1. Виконано теоретичні та аналітичні дослідження взаємозв'язку в'язкості та електропровідності шлакових розплавів. Запропоновано структурно чутливий критерій - $n = E_\eta / E_\chi$, що характеризує відношення енергії активації в'язкості (E_η) до енергії активації електропровідності (E_χ).

2. Показано, що для досліджуваних оксидних систем відношення $E_\eta / E_\chi = n$ змінюється в областях: $E_\eta < E_\chi = n < 1$, $E_\eta > E_\chi = n > 1$ і $E_\eta \approx E_\chi = n \approx 1$, що з позиції іонної будови шлакових розплавів характеризує зміну структурного стану розплаву.

3. Встановлено зв'язок показника $n = E_\eta / E_\chi$ з хімічним складом оксидної системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$, яка є базовою для рафінувальних шлаків сталеплавильного виробництва і встановлено раціональний вміст компонентів $\text{CaO} = 40\div 50\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 38\div 45\%$, $\text{CaF}_2 = 15\div 20\%$, який забезпечує гомогенність їх розплавів при температурі 1600°C .

4. На основі аналізу вибірки експериментальних даних для

фторвмісних шлаків встановлено зв'язок в'язкості і питомої електропровідності шлакових розплавів з їх хімічним складом, шляхом врахування модельних параметрів ρ і $Z_{(k-k)}$ – зарядовий стан катіонної підрешітки на рівні $R^2 = 0,73$ і $R^2 = 0,95$ відповідно, та отримано прогнозні моделі, що дозволять дати рекомендації по зменшенню використання імпортованого плавикового шпату в складі шлакоутворюючих сумішей при виробництві сталі.

Перелік посилань

1. Mills K. C., Yuan L., Li Z., Zhang G. Estimating the electrical & thermal conductivities of slags. Proceedings of 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking. 2012, Dresden, Oct. 1-3. p. 1-10.
2. Zang Z. H., Chou K. C. Measuring and modeling viscosity of CaO-Al₂O₃-SiO₂(K₂O) melt. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 43. 2012. pp. 841-848. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9668-9>
3. Zang Z. H., Yan B. J., Chou K. C., Li F. S. Relation between viscosity and electrical conductivity of silicate melts. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 42. 2011. pp. 261-264. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9484-7>
4. Stepanenko D. A., Volkova O., Heller H. P., Otorvin P. I., Chebykin D. A. Selecting Optimal Slag Conditions in the Blast Furnace. *Steel in Translation*, Vol. 47, No. 9, p.p. 610-613 (2017). <https://doi.org/10.3103/s0967091217090133>
5. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Ленинград: Наука. 1975. 592 с.
6. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Москва: Металлургия. 1966. Ч. 2. 704 с.
7. Габдуллин Т. Г., Такенов Т. Д., Байсанов С. О., Букетов Е. А. Физико-химические свойства марганцевых шлаков. Алма-Ата: Наука. 1984. 232 с.
8. Поволоцкий Д. Я., Мищенко В. Я., Вяткин Г. П. и др. Физико-химические свойства расплавов системы CaO - Al₂O₃ - CaF₂. *Известия ВУЗов Черная металлургия*. 1970. № 12. с. 8-11.
9. PhaseDiagram-Web. Non-interactive diagrams. Retrieved from <https://www.crct.polymtl.ca/fact/PDsearch.php>
10. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Степаненко Д. А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. Днепропетровск: Пороги. 2013. 339 с.
11. Приходько Э. В. Металлохимия многокомпонентных систем. Москва: Металлургия. 1995. 320 с.

References

1. Mills K.C., Yuan L., Li Z., Zhang G. (2012). Estimating the electrical & thermal conductivities of slags. Proceedings of 5th *International Congress on the Science and Technology of Steelmaking*. Dresden, Oct. 1-3. p. 1-10.
2. Zang Z.H. Chou K.C. Measuring and modeling viscosity of CaO-Al₂O₃-SiO₂(K₂O)

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

- melt. (2012). *Metallurgicals and Materials Transaction B*, 2012, 43, 841-848
<https://doi.org/10.1007/s11663-012-9668-9>
3. Zang Z.H., Yan B.J., Chou K.C., Li F.S. (2011). Relation between viscosity and electrical conductivity of silicate melts. *Metallurgicals and Materials Transaction B*, 2011, 42, 261-264. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9484-7>
 4. Stepanenko D.A., Volkova O., Heller H.-P., Otorvin P.I., Chebykin D.A. (2017). Selecting Optimal Slag Conditions in the Blast Furnace. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, 9, 610-613. <https://doi.org/10.3103/s0967091217090133>
 5. Frenkel Ya.I. (1975). *Kineticheskaya teoriya zhidkostej [Kinetic theory of liquids]*. Leningrad: Nauka. 1975. 592 [In Russian].
 6. Esin O.A., Geld P.V. (1966). *Fizicheskaya himiya pirometallurgicheskikh processov [Physical chemistry of pyrometallurgical processes]*. Part 2. Moskva: Metallurgiya. 1966. 704 [In Russian].
 7. Gabdullin T.G., Takenov T.D., Bajsanov S.O., Buketov E.A. *Fiziko-himicheskie svoystva margancevyh shlakov [Physical and chemical properties of manganese slags]*. Alma-Ata: Nauka. 1984. 232 [In Russian].
 8. Povolockij D.Ya., Mishenko V.Ya., Vyatkin G.P. et al. (1970). Fiziko-himicheskie svoystva rasplavov sistemy $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ [Physicochemical properties of melts of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ system]. *Izvestiya VUZov Chernaya metallurgiya [Izvestiya VUZov Ferrous metallurgy]*, 1970, 12, 8-11. [In Russian].
 9. PhaseDiagram-Web. Non-interactive diagrams. Retrieved from <https://www.crct.polymtl.ca/fact/PDsearch.php>.
 10. Prihod'ko E.V., Togobitskaya D.N., Hamhotko A.F., Stepanenko D.A. (2013). *Prognozirovaniye fiziko-himicheskikh svoystv oksidnih sistem [Prediction of the physicochemical properties of oxide systems]*. Dnepropetrovsk: Porogi. 2013. 339 p. [In Russian].
 11. Prihod'ko E.V. (1995). *Metallohimiya mnogokomponentnyh sistem [Metallochemistry of multicomponent systems]*. Moskva: Metallurgiya. 1995. 320 p. [In Russian].

D. O. Stepanenko, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0184-8295

D. M. Togobitskaya, Dr. Sci. (Engin.), Professor, ORCID 000-0001-6413-4823

A. I. Bielkova, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8519-9351

H. O. Цюна, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0003-0682-461X

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

SELECTION OF RATIONAL COMPOSITIONS OF SLAGS AND MIXTURES IN THE PRODUCTION OF IRON AND STEEL

Summary. When solving the problem of choosing the rational chemical composition of metallurgical slags and mixtures, it is important to study their properties (viscosity,

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

melting point, electrical conductivity, surface tension, etc.). According to scientific studies, the physicochemical properties of slag and aluminosilicate melts (including their viscosity and electrical conductivity) depend on the chemical composition of the system and temperature and reflect structural changes in the melt.

The properties of slag melts are well explained by the ion theory according to which the viscosity is determined by the structure of polymer ions ($\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ anions), and the electrical conductivity by mobile ions by cations and/or anions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , O^{2-} , F^- , and etc.). Increasing the temperature of the slag melt weakens the bonds of its structural particles (ions and/or their groups) is an important and necessary condition for improving the efficiency of heat and mass transfer processes in the system "metal-slag". The study of the relationship between viscosity and electrical conductivity and the development of criteria for assessing the structure of the slag melt, the establishment of a rational chemical composition for specific technological conditions of the smelting process of cast iron or steel is of great scientific and practical importance.

The relationship between the viscosity and electrical conductivity of different oxide systems has been studied and the activation energies of viscosity (E_η) and electrical conductivity (E_χ) have been calculated. A criterion is proposed, the ratio $n = E_\eta/E_\chi$, which varies in the regions: $E_\eta > E_\chi = n > 1$, $E_\eta < E_\chi = n < 1$ and $E_\eta \approx E_\chi = n \approx 1$, which indicate the presence of three structural regions: heterogeneous ($E_\eta > E_\chi = n > 1$), homogeneous ($E_\eta < E_\chi = n < 1$) and equilibrium state of the melt ($E_\eta \approx E_\chi = n \approx 1$).

The performed research has expanded the scientific ideas about the structure of slag melts, and the proposed criterion allows the choice of rational compositions of slags and mixtures in the production of iron and steel.

Keywords: slag, viscosity, electrical conductivity, model, criterion, structure.

For citation: *Stepanenko D.O., Togobytska D.M., Belkova A.I., Tsyupa N.O.* Do vyboru ratsionalnykh skladiv shlakiv ta shlakoutvoryuyuchykh sumishey pry vyrobnytstvi chavunu ta stali [Selection of rational compositions of slags and mixtures in the production of iron and steel]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 200-211. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-200-211.

*Стаття надійшла до редакції збірника 19.10.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35