

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.029

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ МІКРОЧАСТИНОК ЗМІЦНЮВАЛЬНИХ ФАЗ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПЕРЕПЛАВІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ

Гришин О.М.¹ [ORCID], Надточій А.А.² [ORCID], Губа Р.М.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки та технологій, д.т.н., проф., Україна

²Український державний університет науки та технологій, к.т.н., доц., Україна

³Український державний університет науки та технологій, аспірант, Україна

Анотація. У роботі розглянуто сучасний стан досліджень електрошлакового переплаву (ЕШП), що поєднує експериментальні методи з чисельним моделюванням для опису руху металевих крапель у шлаковій ванні. Особливу увагу приділено впливу складу фтористо-оксидних шлаків на густину та в'язкість розплаву, які визначають кінематичні характеристики крапель та ефективність очищення металу. Запропоноване узагальнене емпіричне рівняння адекватно описує швидкість руху дрібних і середніх крапель у діапазоні густини 2800-3500 кг/м³ та в'язкості 0,2-0,6 Па·с. Показано, що діаметр краплі є ключовим фактором теплового вирівнювання: дрібні краплі нагріваються рівномірно, тоді як великі зберігають температурну неоднорідність. Результати моделювання підтверджують можливість використання рівняння як апроксимаційної моделі для прогнозування процесів ЕШП та відкривають перспективи його уточнення з урахуванням деформації крапель і багатофакторних ефектів.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, фтористо-оксидні шлаки, металеві краплі, швидкість, густина та в'язкість шлаків, теплообмін

Сучасний стан досліджень електрошлакового переплаву характеризується інтеграцією експериментальних методів із чисельним моделюванням, що дозволяє більш детально описати поведінку крапель у шлаковій ванні. Особливу увагу приділяють взаємодії мікрочастинок зміцнювальних фаз із компонентами шлаку, адже саме ці процеси визначають морфологію та стабільність фазових включень. Високоентропійні сплави, які останніми роками стали предметом інтенсивних досліджень, створюють нові виклики для ЕШП [1-3]. Їхня багатокомпонентна природа та складна термодинаміка зумовлюють непередбачувану поведінку крапель і фаз у шлаковій ванні, що потребує глибокого моделювання та аналізу.

Фтористо-оксидні розплави, що застосовуються як шлаки при ЕШП, складаються з комбінацій фторидів та оксидів кальцію, магнію, алюмінію та інших елементів. Основним компонентом є фторид кальцію (CaF_2), який забезпечує низьку температуру плавлення та високу електропровідність, а оксидні добавки (CaO , Al_2O_3 , MgO , SiO_2 тощо) регулюють в'язкість, густину та хімічну активність шлаку [4,5]. Густина таких систем становить $2,7\text{--}3,2 \text{ г/см}^3$, а динамічна в'язкість – $0,2\text{--}0,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температурах $1500\text{--}1700 \text{ }^\circ\text{C}$. Збільшення вмісту Al_2O_3 та MgO підвищує густину, тоді як CaF_2 її знижує. Високий вміст CaF_2 зменшує в'язкість, забезпечуючи легший рух крапель металу, тоді як Al_2O_3 та SiO_2 її підвищують, що може уповільнити масообмін. Оптимальний фтористо-оксидний шлак для ЕШП – це багатокомпонентна система, де CaF_2 , CaO та Al_2O_3 є базовими складниками, а MgO та SiO_2 вводяться для тонкого регулювання властивостей. Це забезпечує ефективне очищення металу, стабільність процесу та формування високоякісних зливків.

Рух металевої краплі, що відривається від поверхні електрода, в рідкому нерухомому шлаку відбувається під дією сили тяжіння, сили Архімеда і сили гідродинамічного опору. Для сферичної краплі баланс сил можна записати як:

$$k \cdot \xi \cdot S \cdot H_g = V_{\text{мет}} \cdot g \cdot (\rho_{\text{шл}} - \rho_{\text{мет}}), \quad (1)$$

де k – коефіцієнт форми тіла (для кулі прийнято $k=1$), ξ – коефіцієнт опору, $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу, d – діаметр краплі, $H_g = \frac{\rho_{\text{сеп}} \cdot W^2}{2}$ – динамічний напір потоку, $\rho_{\text{шл}}, \rho_{\text{мет}}$ – густина шлаку та краплі металу, відповідно, W – швидкість руху краплі, $V_{\text{мет}} = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$ – об'єм краплі (сферичної форми).

Для визначення коефіцієнта опору краплі сферичної форми використовували критеріальні залежності [6]:

$$\xi = \begin{cases} \frac{24}{Re} & \text{при } 10^{-4} < Re < 2 \\ \frac{18,5}{Re^{0,6}} & \text{при } 2 < Re < 500 \\ 0,44 & \text{при } 500 < Re < 2 \cdot 10^5 \end{cases}, \quad (2)$$

де $Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho_{\text{сеп}}}{\eta}$ – число Рейнольдса для краплі, яка рухається в рідкому шлаку, η – коефіцієнт його динамічної в'язкості.

Використані у дослідженні формули та критерії (Re , Bi та Fo) є загальноприйнятими в гідродинаміці та тепломасообміні й широко застосовуються для аналізу руху частинок у рідких середовищах. Саме ці критерії обрані для аналізу, оскільки вони дають можливість узагальнити складні процеси тепло- та масообміну у вигляді простих безрозмірних залежностей, що робить результати моделювання універсальними та порівнюваними з даними інших досліджень.

При проведенні чисельного аналізу початковий діаметр краплини d варіювався в діапазоні 0,2...10 мм, глибина шлакової ванни L (відстань від торця електрода до поверхні металу) була обрана рівною 200 мм. Сферична крапля діаметром 0,2 мм досягає своєї постійної швидкості 0,0047 м/с через 0,00008 с на відстані близько 0,002 мм від електрода, що набагато менше глибини шлакової ванни. Час проходження шару 200 мм становить близько 43 с. Крапля діаметром 2 мм рухається швидше і досягає своєї постійної швидкості 0,144 м/с через 0,027 с на відстані близько 3,9 мм від електрода; час проходження шару 200 мм становить близько 1,4 с. Крапля діаметром 10 мм рухається набагато швидше і досягає своєї постійної швидкості 0,67 м/с через 0,115 с на відстані близько 77 мм від електрода; час проходження шару 200 мм становить близько 0,30 с. Таким чином, залежно від діаметра краплі змінюється режим її руху: від ламінарного при $d = 0,2$ мм ($Re \approx 0,13$) до турбулентного при $d = 10$ мм ($Re \approx 950$).

Отримані значення швидкості руху крапель у шлаковій ванні дозволяють визначити час їхнього перебування у розплаві, що є ключовим для аналізу теплових процесів. Розрахункові дані показують, що крапля діаметром 0,2 мм нагрівається рівномірно й повністю досягає температури шлаку (~ 2073 K) за $\sim 1,4$ с; крапля діаметром 2 мм майже повністю вирівнює температуру (~ 2070 - 2073 K) вже через 0,3 с; крапля діаметром 10 мм нагрівається лише частково (~ 1970 - 1980 K), її поверхня гаряча, але центр холодніший, що узгоджується з літературними даними [7].

У роботі запропоновано узагальнене емпіричне рівняння (1) для швидкості руху металевих крапель у шлаковій ванні, яке охоплює широкий інтервал параметрів густини (2800-3500 кг/м³) та в'язкості (0.2-0.6 Па·с):

$$W = 10^{5,85} d^{1,84} \rho_{\text{шл}}^{-0,72} \eta_{\text{шл}}^{-0,70} \cdot R=0,966 \quad (3)$$

Запропоноване емпіричне рівняння адекватно описує швидкість руху дрібних і середніх крапель у шлаковій ванні, підтверджуючи узгодженість із розрахунковими даними, але попри високий коефіцієнт кореляції для великих крапель спостерігається відхилення, що пояснюється, можливо, деформацією та переходом до турбулентного режиму.

Перспективи подальших досліджень полягають у врахуванні деформації крапель у майбутніх моделях, що дозволить ще точніше описати процеси ЕШП. За даними сучасних робіт [7-9], деформація може зменшувати швидкість руху на 15-30% залежно від діаметра, що суттєво впливає на умови нагрівання великих крапель. Врахування цього ефекту у чисельних моделях дасть змогу більш адекватно описати реальні процеси тепло- та масообміну. Таким чином, рівняння може бути використане як апроксимаційна модель для прогнозування кінематичних характеристик крапель у процесі ЕШП, а його подальше уточнення з урахуванням деформації та багатофакторних ефектів відкриває перспективи створення більш універсальних моделей.

Результати моделювання показують, що швидкість руху крапель у шлаковій ванні визначає час їхнього перебування у розплаві, а отже – умови теплового вирівнювання. Діаметр краплі є визначальним фактором як для її кінематичних характеристик, так і для теплового стану при проходженні шлакової ванни.

Висновки

Контроль діаметра крапель і властивостей шлаку дозволяє прогнозувати якість зливків, уникати дефектів та керувати мікроструктурою високолегованих сталей і сплавів. Дрібні краплі, які довго перебувають у шлаковій ванні, сприяють більш ефективному очищенню металу від неметалевих включень, тоді як великі краплі, що швидко проходять ванну, можуть залишати центр холоднішим і формувати неоднорідності. Це означає,

що регулювання складу шлаку (густини та в'язкості) та контроль розміру крапель є ключовими інструментами для оптимізації процесу ЕШП.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Oketola, A. M., Adegbola, T. A., Jamiru, T., Ogunbiyi, O., Salifu, S. Advances in High-Entropy Alloy Research: Unraveling Fabrication Techniques, Microstructural Transformations, and Mechanical Properties. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. Springer, 2025. DOI: 10.1007/s40735-025-00987-3
2. Ganesan, S., Bhatt, D., Satheesh, D., Kokulnathan, T., Pant, P., Bharathi, D. S., Baskar, L., Sahoo, N. G., Palaniappan, A., Manavalan, K. High entropy alloys: a comprehensive review of synthesis, properties, and characterization for electrochemical energy conversion and storage applications. Journal of Materials Chemistry A. RSC Publishing, 2025. DOI: 10.1039/D5TA01234A
3. Ibrahim, P. A., Özkul, İ., Canbay, C. A. An overview of high-entropy alloys. Emergent Materials, 2022, vol. 5, pp. 1779-1796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00349-z>.
4. Stepanenko, D. O., Stovpchenko, G. P., Togobitskaya, D. M., Lisova, L. O. Evaluating the structural state of fluoride-oxide melts and their interactions with steel to sensible selection of ESR slag. Theory and Practice of Metallurgy, 2023, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.4.2023.08>.
5. Ju J., Yang K., Zhu Z., et al. Effect of CaF_2 and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on viscosity and structure of TiO_2 -bearing slag for electros slag remelting. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, vol. 28, pp. 1541-1550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00683-2>.
6. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles. New York; London: Academic Press, 1978. 380 p.
7. Krivtsun, V., Sydorets, G., Stovpchenko, G., Polishko, A., Sybir, L., Medovar, L. Effect of deformation of molten metal droplets on their motion and heating in liquid slag. The Paton Welding Journal, 2022, no. 6, pp. 41-48. <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.06.06>
8. Prakash, J., Keh, H. J. Slow translation of a slightly deformed spherical fluid drop. Physics of Fluids, 2023, vol. 35, is. 7, article 073105. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0155908>
9. Thakre S., Ma W., Li L. A numerical analysis on hydrodynamic deformation of molten droplets in a water pool. Annals of Nuclear Energy, 2013, vol. 53, pp. 228-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.09.008>.

REGULARITIES OF THE BEHAVIOR OF MICRO-PARTICLES OF STRENGTHENING PHASES DURING ELECTROSLAG REMELTING OF HIGH-ENTROPY ALLOYS

O.M. Hryshyn, A.A. Nadtochii, R.M. Huba

Abstract *The study examines the current state of research on electros slag remelting (ESR), which combines experimental methods with numerical modeling to describe the motion of metallic droplets in the slag bath. Particular attention is paid to the influence of fluorine–oxide slag composition on the density and viscosity of the melt, which determine*

the kinematic characteristics of droplets and the efficiency of metal purification. The proposed generalized empirical equation adequately describes the velocity of small and medium droplets within the density range of 2800-3500 kg/m³ and viscosity of 0.2-0.6 Pa·s. It is shown that droplet diameter is a key factor in thermal equalization: small droplets heat uniformly, whereas large ones retain temperature heterogeneity. The modeling results confirm the applicability of the equation as an approximation model for predicting ESR processes and highlight prospects for its refinement by considering droplet deformation and multifactorial effects.

Keywords: *electroslag remelting, fluorine–oxide slags, metallic droplets, velocity, slag density and viscosity, heat transfer*