

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЇ КРАПЕЛЬ РОЗПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ НА ЇХ РУХ ТА НАГРІВАННЯ В ШАРІ ШЛАКУ ПРИ ЕШП

І.В. Кривцун, **В.М. Сидорець**, А.В. Сибір,
Г.П. Стівченко, Г.О. Полішко, Л.Б. Медовар

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Запропоновано спрощену математичну модель процесів руху і нагрівання крапель розплавленого металу в рідкому шлаку при ЕШП в двох варіантах постановки задачі: крапля зберігає вихідну сферичну форму; крапля деформується і набуває форму сплюсненого (в напрямку руху) сфероїда. Показано, що деформація краплі чинить істотний вплив на швидкість і тривалість її руху в шарі шлаку, а також на площу поверхні краплі (при збереженні її об'єму), яка визначає умови нагрівання і взаємодії металу краплі з розплавленим шлаком. Доведено, що внаслідок збільшення площі поверхні і зменшення швидкості руху крапель більшого діаметру їх нагрівання в шарі шлаку відбувається більш ефективно в порівнянні зі сферичними краплями. Біблігр. 16, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; математичне моделювання; витратний електрод; крапля рідкого металу; розплавлений шлак; нагрівання; рух; деформація краплі

Знання закономірностей руху частинок металу в різних середовищах (рідких, газоподібних, в тому числі таких, що знаходяться в стані плазми), а також закономірностей теплової взаємодії металевих частинок з вказаними середовищами необхідні при проведенні досліджень і розробок в області металургійних та зварювальних процесів (наплавлення й напилювання покриттів). При аналізі металургійних процесів найчастіше розглядають характер руху частинок розплавленого металу в рідкому шлаку або частинок шлаку, а також газових бульбашок в рідкому металі при отриманні або рафінуванні металевих сплавів. Дослідженню зазначених закономірностей присвячено значну кількість робіт [1–6].

При вивченні динаміки руху рідких металевих частинок в різних середовищах найважливішим параметром є коефіцієнт лобового опору. Досить часто цей коефіцієнт визначають або за формулою Стокса (для руху сферичних частинок при малих числах Рейнольдса), або за більш складними критеріальними залежностями, які враховують зміну характеру обтікання частинок з його збільшенням [7–9].

Слід зазначити, що в більшості розглянутих випадків передбачається, що досліджувана частинка є твердою сферою. Разом з тим рух рідкої частинки, наприклад краплі розплавленого металу, має важливу особливість, а саме зміну її форми в процесі руху і, відповідно, діючої на неї сили опору. У деяких випадках при дослідженні руху крапель, що деформуються, використовують чисельні методи, які дозволяють розраховувати поля швид-

костей як зовні, так і всередині краплі [10], однак такий підхід є досить складним.

Оцінка розміру крапель, що формуються при переплаві витратного електрода в умовах електрошлакових процесів, детально описана в багатьох роботах [11–15]. При цьому аналіз характеристик їх руху в шарі шлаку зазвичай проводять з використанням критеріальних залежностей коефіцієнта лобового опору для краплі, яка має сфе-

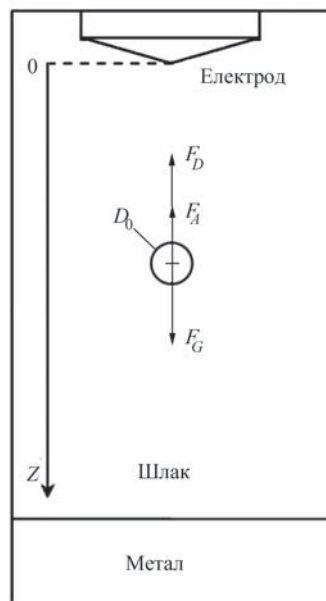


Рис. 1. Схема розподілу сил, що діють на краплю розплавленого металу, яка рухається в шарі рідкого шлаку при ЕШП: D_0 — початковий діаметр краплі; F_G — сила тяжіння; F_A — сила Архімеда; F_D — сила лобового опору

І.В. Кривцун — <https://orcid.org/0000-0001-9818-3383>, **В.М. Сидорець** — <https://orcid.org/0000-0002-8498-4726>,
А.В. Сибір — <https://orcid.org/0000-0002-9974-0636>, Г.П. Стівченко — <https://orcid.org/0000-0002-6555-5715>,
Г.О. Полішко — <https://orcid.org/0000-0001-7543-280X>, Л.Б. Медовар — <https://orcid.org/0000-0003-2077-5965>

© І.В. Кривцун, **В.М. Сидорець**, А.В. Сибір, Г.П. Стівченко, Г.О. Полішко, Л.Б. Медовар, 2021

Таблиця 1. Параметри шлаку і металу, які використані при моделюванні

Параметр	АНФ-29	Сталь 45
Густина, кг/м ³	$\rho_s = 2780$	$\rho_m = 7000$
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	$C_s = 1200$	$C_m = 600$
Коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с	$\eta_s = 0,01965$	$\eta_m = 0,003$
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	$\chi_s = 6$	$\chi_m = 35$
Коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м	–	$\sigma_m = 1,1$
Початкова температура каплі, К	–	$T_0 = 1823$
Температура шлаку, К	$T_s = 2073$	–

ричну форму, що потребує уточнення з точки зору можливої її деформації в процесі руху.

Метою цієї роботи є розробка спрощених математичних моделей і чисельне дослідження процесів руху й нагрівання крапель розплавленого металу, що відриваються від торця витратного електрода в умовах електрошлакового переплаву (ЕШП), з урахуванням зміни форми крапель при їх русі в шарі рідкого шлаку. Схема даного процесу зображена на рис. 1, основні параметри рідкого шлаку і металу краплі, які використані при проведенні розрахунків, наведені в табл. 1.

Моделювання руху крапель. Рух металеві краплі, що відривається від поверхні електрода, в рідкому нерухомому шлаку відбувається під дією сили тяжіння, сили Архімеда і сили гідродинамічного опору (див. рис. 1). Відповідне рівняння руху можна записати у вигляді:

$$\rho_m V \frac{du}{dt} = V(\rho_m - \rho_s)g - C_D S \frac{\rho_s u^2}{2}; t \geq 0, \quad (1)$$

де ρ_m — густина металу; ρ_s — густина рідкого шлаку; V — об'єм краплі; $u = \frac{dz}{dt}$ — її швидкість; t — час, що відрховується від моменту відриву краплі; g — прискорення вільного падіння; C_D — коефіцієнт лобового опору, що залежить від числа Рейнольдса; S — площа міделевого перетину краплі. У початковий момент часу ($t = 0$) будемо вважати, що крапля є сферичною, має діаметр D_0 (радіус r_0) і нульову швидкість ($u = 0$).

Для аналізу впливу деформації металеві краплі на її рух у рідкому шлаку будемо розглядати два випадки: крапля в процесі руху залишається сферичною; крапля змінює свою форму (деформується), зберігаючи той же об'єм, що і вихідна сферична крапля.

У першому випадку, з урахуванням того, що $V = \frac{4}{3}\pi r_0^3$; $S = \pi r_0^2$, рівняння (1) може бути записано у вигляді:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m} g - C_D \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{3u^2}{4D_0} \quad (2)$$

з початковою умовою, що

$$u|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Для визначення коефіцієнта лобового опору краплі сферичної форми використовували критеріальну залежність [4]:

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} \frac{24}{Re}, & Re < 0,2; \\ \frac{24}{Re} + 3,6 Re^{-0,317}, & 0,2 < Re < 4; \\ \frac{24}{Re} + 4 Re^{-0,333}, & 4 < Re < 400; \\ \frac{24}{Re} + 5,48 Re^{-0,573} + 0,36, & 400 < Re < 10^4, \end{cases} \quad (4)$$

де $Re = \frac{\rho_s u D_0}{\eta_s}$ — число Рейнольдса для краплі, яка рухається в рідкому шлаку, де η_s — коефіцієнт його динамічної в'язкості.

При проведенні чисельного аналізу початковий діаметр краплі D_0 варіювався в діапазоні 2...10 мм, глибина шлакової ванни L (відстань від торця електрода до поверхні металу) була обрана рівною 200 мм, всі розрахунки виконувалися в наступних діапазонах зміни перемінних: $0 < t < 1,5$ с; $0 < z < 500$ мм. Результати розрахунків швидкості сферичних крапель малого і великого діаметра наведені на рис. 2.

Сферична крапля діаметром 2 мм досягає своєї постійної (максимальної) швидкості 0,153 м/с через 0,1 с свого руху (рис. 2, а) на відстані від електрода близько 13 мм (рис. 2, б), що набагато менше обраної глибини шлакової ванни.

Крапля діаметром 10 мм рухається набагато швидше краплі діаметром 2 мм і досягає своєї постійної швидкості 0,641 м/с через 0,3 с (рис. 2, в) на відстані близько 150 мм від електрода (рис. 3, з), що є сумірним з глибиною шлакової ванни.

Розглянемо другий випадок, коли крапля рідкого металу при русі в шарі шлаку деформується. У загальному випадку форму краплі, що деформується, в будь-який момент часу можна представити у вигляді суперпозиції лінійно незалежних мод власних коливань її поверхні, що за умови аксіально-симетричній деформації можна записати у вигляді:

$$\frac{r_s(\vartheta, t)}{R_0} = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} a_n(t) P_n(\cos \vartheta), \quad (5)$$

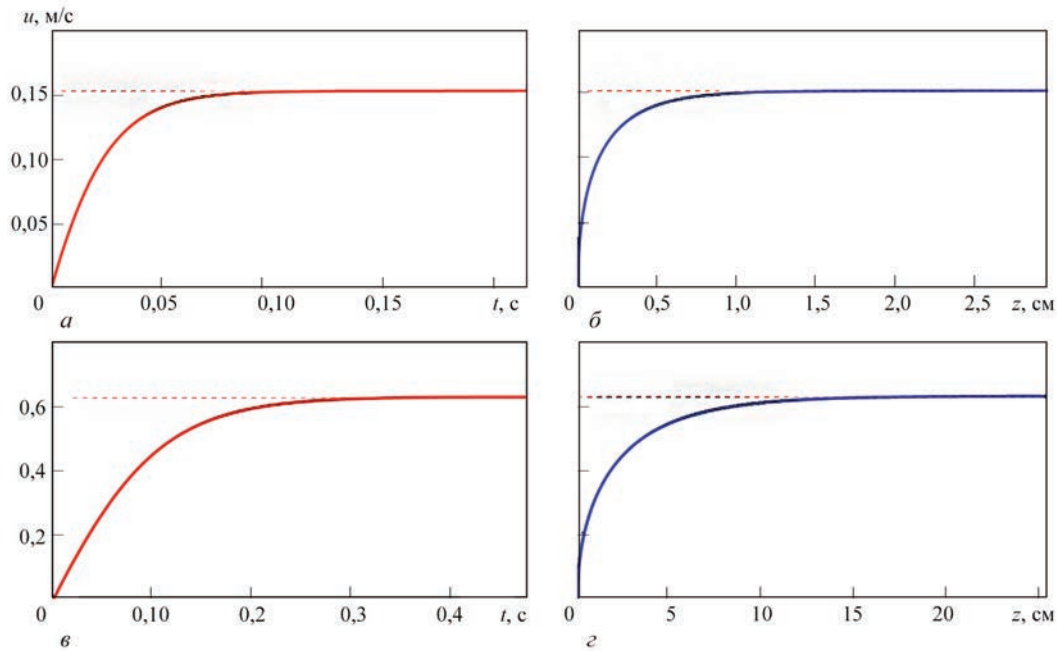


Рис. 2. Залежність швидкості руху сферичної краплі, що має початковий діаметр 2 мм (а, б) та 10 мм (в, г), від часу (а, в) і пройденої відстані (б, г)

де $r = r_s(\vartheta, t)$ — рівняння поверхні краплі в полярних координатах $\{r, \varphi, \vartheta\}$; $P_n(\cos \vartheta)$ — поліном Лежандра. Рівняння для визначення залежностей коефіцієнтів розкладання (5) від часу мають вигляд [16]:

$$\frac{d^2 a_n}{d\bar{t}^2} + 8(n-1)(2n+1) \frac{1}{\text{Re}_{def}} \frac{da_n}{d\bar{t}} + 8n(n-1)(n+2) \frac{1}{\text{We}} a_n = -2nC_n; n \geq 2. \quad (6)$$

Тут $\bar{t} = \frac{t}{t^*}$ — безрозмірний час, де $t^* = \sqrt{\frac{\rho_m D_0}{\rho_s u}}$;

$\text{Re}_{def} = \frac{uD_0}{\eta_m} \sqrt{\rho_m \rho_s}$ — число Рейнольдса для течії

металу всередині краплі, де η_m — коефіцієнт динамічної в'язкості рідкого металу; $\text{We} = \frac{\rho_s u^2 D_0}{\sigma_m}$ — число Вебера, де σ_m — коефіцієнт поверхневого натягу розплавленого металу; C_n — коефіцієнт розкладання розподілу тиску $p_s(\vartheta)$ по поверхні краплі

$$\frac{p_s(\vartheta) - p_\infty}{(\rho_s/2)u^2} = \sum_{n=2}^{\infty} C_n P_n(\cos \vartheta). \quad (7)$$

Залежності коефіцієнтів C_n в розкладанні (7) від числа Рейнольдса для найбільш істотних мод власних коливань ($n = 2 \dots 5$) наведено на рис. 3.

Для наближеної оцінки впливу деформації краплі електродного металу на характеристики її руху в рідкому шлаку врахуємо тільки одну, найбільш істотну моду ($n = 2$) коливань поверхні краплі. Це відповідає тому, що при деформації крапля набуває форму сплюсненого (в напрямку руху) сфероїда — тіла обертання, утвореного еліпсом з напіввісьями $a > c$ при його обертанні навколо малої осі, як показано на рис. 4.

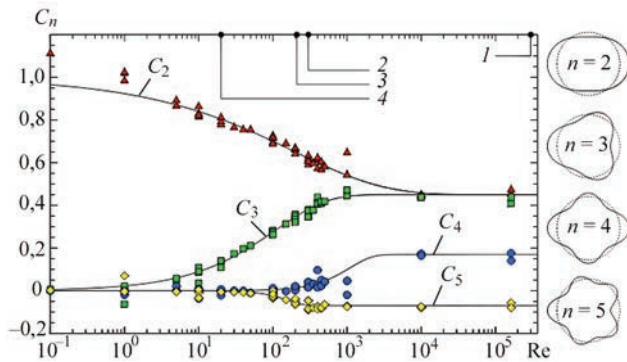


Рис. 3. Експериментальні залежності коефіцієнтів C_n від числа Рейнольдса, їх апроксимації і власні моди коливань поверхні краплі: $C_2 = 0,45 + 0,55 \exp(-0,15 \text{Re}^{0,36})$; $C_3 = 0,45 - 0,45 \exp(-5,2 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0,63})$; $C_4 = 0,17 - 0,17 \exp(-3,9 \cdot 10^{-5} \text{Re}^{1,45})$; $C_5 = -0,07 + 0,07 \exp(-5,6 \cdot 10^{-5} \text{Re}^{1,93})$; 1 — турбулентний потік; 2 — нестационарний потік; 3 — несиметричний стаціонарний потік; 4 — ламинарний потік [16]

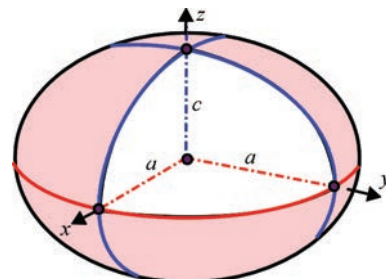


Рис. 4. Зовнішній вигляд сплюсненого сфероїда

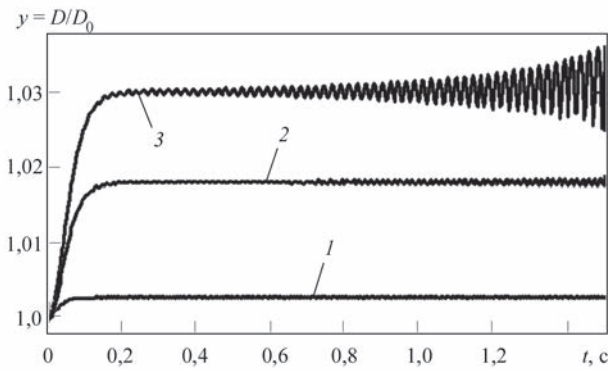


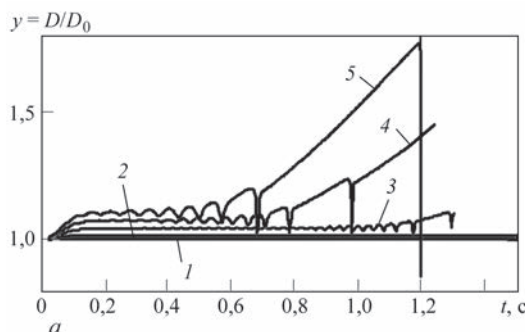
Рис. 5. Залежності коефіцієнту несферичності крапель розплавленого металу від часу при малих значеннях початкового діаметра краплі, мм: 1 — $D_0 = 2$; 2 — 4; 62,5 Гц; 3 — 5; 45,0 Гц

Рівняння руху (1) зберігає свій вигляд при врахуванні того, що об’єм (маса) краплі зберігається, а площа міделевого перетину і коефіцієнт лобового опору змінюються при її деформації.

Введемо поняття коефіцієнта несферичності $y = \frac{D}{D_0} = \frac{a}{r_0} \geq 1$, який характеризує форму деформованої краплі, де D — діаметр сплюсненого сфероїда. Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m} g - \bar{C}_D \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{3u^2 y^2}{4D_0} \quad (8)$$

з початковою умовою (3). Умова збереження об’єму краплі при її деформації від початкової сферичної форми до сплюсненого сфероїда дає $a = r_0 y$, $c = \frac{r_0}{y^2}$, при цьому площа поверхні краплі визначається наступним чином: $S_s = 2\pi a \left(a + \frac{c^2}{\sqrt{a^2 - c^2}} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - c^2}}{c} \right)$. Цю площу будемо надалі порівнювати з площею поверхні вихідної сферичної краплі $S_{s_0} = 4\pi r_0^2$ за допомогою відношення $S = \frac{S_s}{S_{s_0}}$.



Для обчислення коефіцієнта лобового опору краплі, яка деформується, що входить в рівняння (8), будемо використовувати наступну залежність [16]:

$$\bar{C}_D = (1-f)C_{D, sphere} + fC_{D, disc} \quad (9)$$

Тут $f = 1 - E^2$, де $E = \frac{c}{a} = \frac{1}{y^3}$ — відношення малої напівосі сплюсненого сфероїда до великої (в граничних випадках маємо: для сфери $E = 1$, для нескінченно тонкого диска $E = 0$). Величина $C_{D, sphere}$ обчислюється за формулами (4) при $Re = \bar{Re}$, де $\bar{Re} = \frac{\rho_s u D_0 y}{\eta_s}$ — число Рейнольдса, що обчислене з урахуванням зміни діаметра міделевого перетину краплі, а коефіцієнт лобового опору диска — за формулою [16]:

$$C_{D, disc} = 1,1 + \frac{64}{\pi Re} \quad (10)$$

Для визначення величини $y(t)$ використовуємо перше рівняння (6) при $(n = 2)$, яке можна записати у вигляді [16]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{40}{Re_{def}} \frac{dy}{dt} + \frac{64}{We} (y-1) &= \\ &= 0,9 + 1,1 \exp[-0,15 \bar{Re}^{0,36}] \end{aligned} \quad (11)$$

з початковими умовами

$$y|_{t=0} = 1; \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (12)$$

Результати моделювання поведінки крапель розплавленого металу різного початкового діаметра з урахуванням їх деформації представлені на рис. 5–9. Як впливає з розрахункових даних, що наведені на рис. 5, краплі малого розміру ($D_0 = 2 \dots 4$ мм) при їх русі в рідкому шлаку практично зберігають сферичну форму поверхні, однак зазнають слабкі коливання з частотою, що спадає при збільшенні D_0 . Крапля з початковим ді-

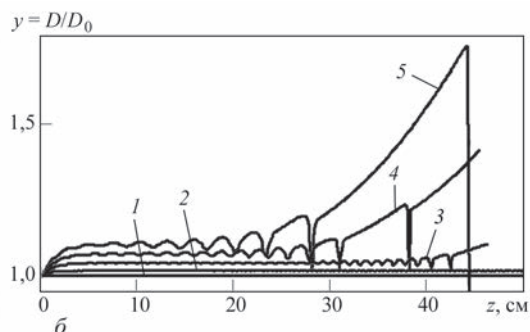


Рис. 6. Залежності коефіцієнту несферичності крапель розплавленого металу від часу (а) і пройдені відстані (б) при різних значеннях початкового діаметра краплі, мм: 1 — $D_0 = 2$; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8; 5 — 10

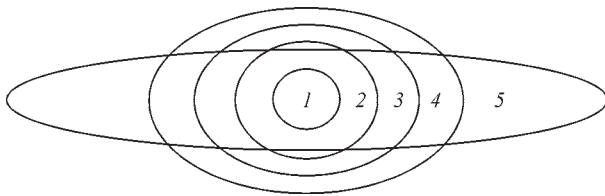


Рис. 7. Форма крапель різного початкового діаметра, мм: 1 — $D_0 = 2$; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8; 5 — 10 в момент часу 1,2 с від початку руху

метром 5 мм зазнає деформацію в коливальному режимі з дедалі більшою амплітудою, при цьому середнє значення ступеня деформації $\delta = \frac{D - D_0}{D_0}$

становить величину біля 3 % (рис. 5, крива 3).

Для ще більших крапель ($D_0 = 6...10$ мм) ступінь деформації зростає зі збільшенням D_0 при відповідному зростанні амплітуди коливань поверхні краплі, а самі коливання, починаючи з певного моменту часу (або після проходження відповідної відстані в рідкому шлаку) стають аперіодичними (рис. 6), що може призводити до розпаду краплі на більш дрібні фрагменти. Наприклад, число Вебера для крапель, що мають початковий діаметр 10 мм, вже при $t = 0,2$ с досягає значень, близьких до критичних ($We > 5$).

Розрахункові дані, наведені на рис. 7, ілюструють ступінь максимальної деформації крапель розплавленого металу різного початкового діаметра при їх русі в рідкому шлаку протягом 1,2 с.

Значна деформація великих крапель ($D_0 = 8...10$ мм) призводить до того, що площа їх поверхні стає істотно більшою за площу поверхні вихідної сферичної краплі (рис. 8). Це може значно інтенсифікувати теплообмін і хімічну взаємодію їх з рідким шлаком.

Вплив деформації металевих крапель різного початкового діаметра на швидкість їх руху в рідкому шлаку проілюстровано на рис. 9. Наведені розрахункові залежності показують, що краплі діаметром 2 мм, які практично не деформуються в процесі руху (рис. 5–7), досягають постійної швидкості 0,153 м/с протягом 0,1 с їх руху в

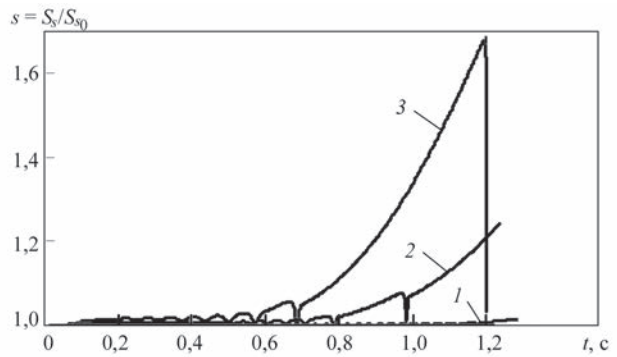


Рис. 8. Залежність площі поверхні деформованих крапель металу від часу при різних значеннях початкового діаметра краплі, мм: 1 — $D_0 = 6$; 2 — 8; 3 — 10

шлаку на відстані 13 мм від торця електрода, що відповідає значенням, отриманим для аналогічних крапель сферичної форми (див. рис. 2, а, б). Що стосується крапель великого початкового діаметра ($D_0 = 6...10$ мм), то вони рухаються повільніше відповідних крапель сферичної форми, оскільки піддаються в процесі руху значній деформації (рис. 6, 7). Так, наприклад, краплі з початковим діаметром 10 мм при врахуванні їх деформації досягають швидкості 0,450 м/с на відстані 100 мм від поверхні шлакової ванни протягом 0,2 с, що істотно менше відповідних значень для сферичних крапель того ж початкового діаметра (див. рис. 2, в, г). При цьому, з огляду на те, що деформація великих крапель відбувається в коливальному режимі з дедалі більшою амплітудою (рис. 6), їх швидкість знижується (рис. 9) через зміну сили опору, що діє на такі краплі.

Завершуючи аналіз процесів руху крапель розплавленого металу в шарі шлаку при ЕШП, слід зазначити, що при обраній глибині шлакової ванни ($L = 200$ мм) відмічені особливості руху крапель, що пов'язані з їх деформацією, можуть проявлятися тільки для великих крапель з початковим діаметром більше 8 мм (рис. 6, б, 9, б).

Моделювання нагрівання крапель. За припущення, що температура металу в об'ємі краплі має однорідний розподіл, рівняння, яке описує

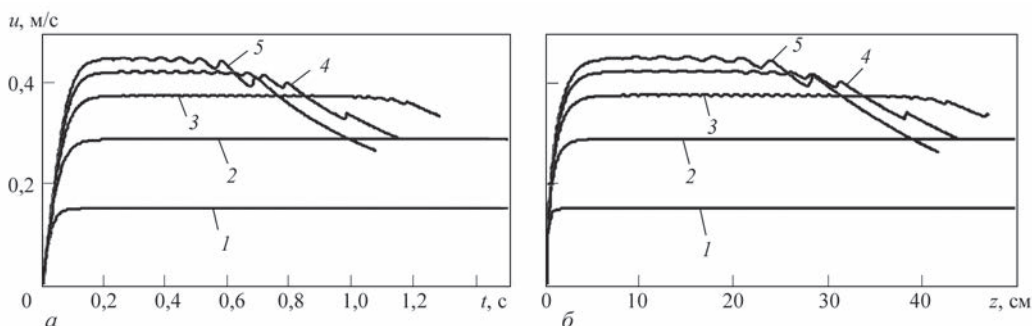


Рис. 9. Залежності швидкості руху крапель металу, що деформуються, від часу (а) й пройденої відстані (б) при різних значеннях початкового діаметра краплі, мм: 1 — $D_0 = 2$; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8; 5 — 10

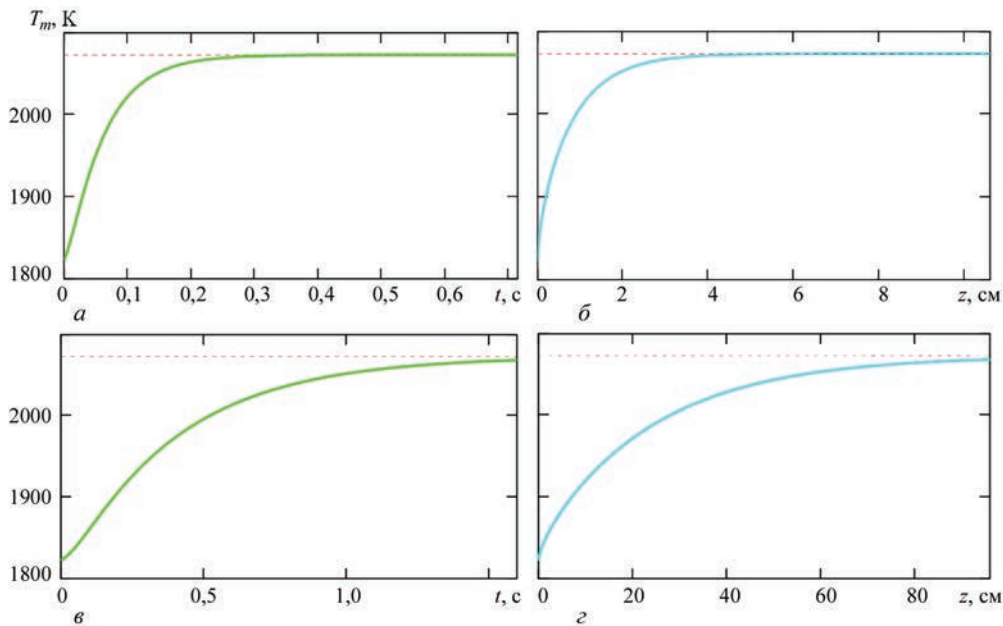


Рис. 10. Залежність температури сферичної краплі, що має початковий діаметр 2 мм (а, б) та 10 мм (в, з), від часу (а, в) і пройденої відстані (б, з)

нагрівання металеві краплі при її русі в рідкому шлаку, можна записати у вигляді:

$$\rho_m V C_m \frac{dT_m}{dt} = S_s \alpha (T_s - T_m); t \geq 0, \quad (13)$$

де C_m — питома теплоємність металу; T_m — температура металу; T_s — температура шлаку; α — коефіцієнт конвективно-кондуктивного теплообміну, а інші позначення відповідають прийнятим раніше.

Якщо крапля в процесі руху зберігає сферичну форму, то при врахуванні того, що $V = \frac{4}{3} \pi r_0^3$; $S_s = 4 \pi r_0^2$, рівняння (13) може бути записано у вигляді:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{6\alpha}{\rho_m C_m D_0} (T_s - T_m) \quad (14)$$

з початковою умовою

$$T_m|_{t=0} = T_0, \quad (15)$$

де T_0 — початкова температура краплі.

Для визначення коефіцієнта теплообміну α будемо використовувати критерій Нуссельта $Nu = \frac{\alpha D_0}{\chi_s}$, де χ_s — коефіцієнт теплопровідності шлаку. У разі сферичної форми поверхні краплі критеріальна залежність матиме вигляд:

$$Nu = 2,0 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,333}. \quad (16)$$

Тут $Pr = \frac{C_s \eta_s}{\chi_s}$ — число Прандтля, де C_s — питома теплоємність шлаку, а число Рейнольдса визначається

з урахуванням зміни швидкості краплі в залежності від часу згідно з прийнятою моделлю руху.

Результати моделювання нагрівання недеформованих (сферичних) крапель металу різного діаметра при їх русі в рідкому шлаку, наведені на рис. 10, показують, що краплі малого розміру нагріваються від початкової температури (1823 К) до температури шлаку (2073 К) набагато швидше, ніж великі краплі. Так, наприклад, крапля діаметром 2 мм досягає температури шлаку вже через 0,3 с (рис. 10, а) на відстані від електрода близько 50 мм (рис. 10, б), що істотно менше обраної глибини шлакової ванни.

Крапля діаметром 10 мм нагрівається значно повільніше, тому при проходженні всієї глибини шлакової ванни ($L = 200$ мм) її температура не перевищує 1980 К (рис. 10, з).

Розглянемо тепер особливості нагрівання металевих крапель при їх русі в рідкому шлаку з урахуванням деформації. Як і раніше будемо наближено вважати, що крапля в процесі руху набуває форму сплюсненого сфероїда. Однорідне нагрівання деформованої таким чином краплі рідкого металу описується диференціальним рівнянням

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{3\bar{\alpha} y^2}{\rho_m C_m D_0} \times \left[1 + \frac{1}{y^3 \sqrt{y^6 - 1}} \ln(y^3 + \sqrt{y^6 - 1}) \right] (T_s - T_m) \quad (17)$$

з початковою умовою (15). Тут $y = \frac{D}{D_0} = \frac{a}{r_0} \geq 1$ — коефіцієнт несферичності краплі; $\bar{\alpha}$ — коєфі-

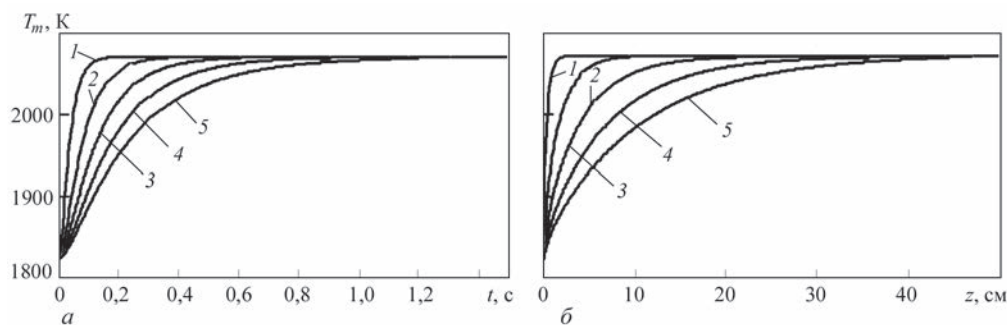


Рис. 11. Залежності температури крапель металу, що деформуються, від часу (а) і пройдені відстані (б) при різних значеннях початкового діаметра краплі, мм: 1 — $D_0 = 2$; 2 — 4; 3 — 6; 4 — 8; 5 — 10

Таблиця 2. Результати моделювання досліджень процесів руху та нагрівання в рідкому шлаку крапель розплавленого металу

D_0 , мм	Рух						Нагрівання							
	u_{max} , м/с		$l = z(u = u_{max})$, мм		$\tau = t(u = u_{max})$, с		$l = z(T_m = T_s)$, мм		$\tau = t(T_m = T_s)$, с		$T_m(z = 200 \text{ мм})$, К		$\tau(z = 200 \text{ мм})$, с	
	*СК	**ДК	СК	ДК	СК	ДК	СК	ДК	СК	ДК	СК	ДК	СК	ДК
2	0,153	0,153	13	13	0,10	0,10	40	40	0,3	0,15	2073	2073	0,3	0,15
4	—	0,289	—	30	—	0,15	—	90	—	0,38	—	—	—	0,30
6	—	0,375	—	60	—	0,16	—	220	—	0,60	—	2070	—	0,32
8	—	0,420	—	80	—	0,18	—	370	—	0,93	—	2050	—	0,38
10	0,641	0,450	150	100	0,30	0,20	1000	450	1,6	1,20	1980	2010	0,5	0,40

*СК — сферична крапля; **ДК — крапля, що деформується.

цієнт теплообміну для сфероїда, при визначенні якого використовували критеріальну залежність (16) з урахуванням того, що число Нуссельта $\bar{Nu} = \frac{\bar{\alpha} D_0 y}{\chi_s}$ і число Рейнольдса $\bar{Re} = \frac{\rho_s u D_0 y}{\eta_s}$ обчислюються за діаметром краплі, що деформується.

Розрахункові залежності температури крапель, що деформуються, різного початкового діаметра від часу та пройдені відстані в шлаку наведені на рис. 11.

Як впливає з порівняння даних рис. 10, а, б та 11 мала деформація дрібних крапель ($D_0 = 2$ мм) в процесі руху (див. рис. 5) не призводить до істотної зміни умов їх нагрівання в шлаку в порівнянні з такими для сферичних крапель. Зі збільшенням розміру крапель врахування їх деформації чинить все більш істотний вплив на швидкість нагрівання крапель в рідкому шлаку. Так, наприклад, деформована крапля з початковим діаметром 10 мм нагрівається до температури шлаку за час порядку 1,2 с на відстані від електрода близько 450 мм, тоді як для аналогічної краплі без урахування деформації зазначені умови ($T_m = T_s$) виконуються при $t \geq 1,6$ с, $z \geq 1000$ мм (рис. 10, в, з). Це дозволяє зробити висновок про інтенсифікацію теплообміну між рідким шлаком і краплею металу, що відбувається за рахунок деформації останньої при русі в шлаку.

Цим вичерпується опис спрощених математичних моделей і результатів чисельного дослідження

процесів руху і нагрівання в рідкому шлаку крапель розплавленого металу різного початкового діаметра без урахування і з урахуванням їх деформації. Для зручності читачів в табл. 2 наведені узагальнені дані, щодо отриманих розрахункових результатів.

Висновки

1. Розроблено спрощені математичні моделі і проведено чисельний аналіз процесів руху і нагрівання крапель розплавленого металу в рідкому шлаку при ЕШП. Розглянуто два випадки: крапля в процесі руху зберігає початкову сферичну форму; крапля деформується і набуває форму сплюсненого (в напрямку руху) сфероїда. Показано, що деформація краплі чинить істотний вплив на швидкість і тривалість її руху в шарі шлаку, а також на збільшення площі поверхні краплі (при збереженні її об'єму), яка визначає умови нагрівання і взаємодії металу краплі з розплавленим шлаком.

2. Деформація крапель малого діаметра (до 5 мм) відбувається у вигляді гармонійних коливань поверхні з частотою в діапазоні 50...100 Гц, що збільшується зі зменшенням початкового діаметра краплі, при цьому ступінь такої деформації виявляється малою (до 3 %) й практично не впливає на швидкість їх руху і умови нагрівання в рідкому шлаку в порівнянні з краплями, що мають сферичну форму.

3. Краплі великого діаметра (6...10 мм) зазнають значної деформації, ступінь якої зростає зі збільшенням початкового діаметра краплі, при цьому коливання її поверхні стають аперіодичними з амплітудою, яка збільшується (для краплі діаметром 10 мм ступінь деформації може досягати величини 75 %), що в кінцевому підсумку може призвести до розпаду таких крапель на більш дрібні (число Вебера досягає значень $We > 5$). Деформовані краплі з початковим діаметром 10 мм досягають максимальної швидкості 0,45 м/с за час 0,2 с на відстані 100 мм від електрода, що значно менше граничної швидкості відповідної сферичної краплі (0,64 м/с), а потім їх швидкість знижується.

4. За рахунок збільшення площі поверхні і зменшення швидкості руху крапель більшого діаметра їх нагрівання в шарі шлаку в порівнянні з сферичними краплями відбувається більш ефективно. Так, наприклад, сферична крапля діаметром 10 мм досягає температури шлаку за час близько 1,6 с на відстані більше 1000 мм від електрода, тоді як з урахуванням деформації це відбувається за час 1,2 с на відстані 450 мм. З урахуванням того, що глибина шлакової ванни становить 200 мм, крапля діаметром 10 мм, що деформується, нагрівається тільки до температури 2010 К, що більш, ніж на 60 К нижче температури шлаку.

References

1. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Gulyaev, I.P., Dolmatov, A.V., Kharlamov, M.Yu. et al. (2015) Arc-plasma wire spraying: An optical study of process phenomenology. *J. of Thermal Spray Technology*, 24(4), 659–670.
3. Chaulet, J., Kharicha, A., Charmond, S. et al. (2020) A 2D multiphase model of drop behavior during electroslag remelting. *Metals*, 10, 490; DOI:10.3390/met10040490.
4. Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. (1978) *Bubbles, drops and particles*. New-York, London, Academic Press.
5. Michaelides, E.E. (2006) *Particles, bubbles & drops: Their motion, heat and mass transfer*. World Scientific Publ.
6. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Sybir, A.V. (2020) Comparison of conditions of mass exchange in electroslag processes with consumable electrode and liquid metal. *Uspekhi Fiziki Metallov*, 4, 481–500 [in Russian]. DOI:10.15407/ufm.21.01.001.
7. Happel, J., Brenner G., (1976) *Hydrodynamics under small Reynolds numbers*. Moscow, Mir [in Russian].
8. Brooks, G., Subagyo, Y. Pan (2005) Modeling of trajectory and residence time of metal droplets in slag–metal–gas emulsions in oxygen steel making. *Metall. and Material Transact. B*, 36, 525–535. DOI: 10.1007/s11663-005-0044-x
9. Nanda Kishore, Sai Gu (2011) Momentum and heat transfer phenomena of spheroid particles at moderate Reynolds and Prandtl numbers. *Heat Mass Transfer*, 54(11–12), 2595–2601. Doi:10.1016/j.jheatmasstransfer.2011.02.001.
10. Yang, C., Mao, Z. (2014) *Numerical simulation of multiphase reactors with continuous liquid phase*. Academic Press.
11. Kharicha, A., Karimi-Sibaki, E., Wu, M. et al. (2018) Review on modeling and simulation of electroslag remelting. *Steel Research Int.*, 89(1).
12. Dudko, D.A., Rublevsky, I.N. (1961) About drop transfer of electrode metal in electroslag welding. *Avtomatich. Svarka*, 4, 24–31 [in Russian].
13. Polishko, G., Stovpchenko, G., Medovar, L., Kamkina, L. (2019) Physicochemical comparison of electroslag remelting with consumable electrode and electroslag refining with liquid metal. *Iron Making & Steel Making*, 46(8), 789–793. <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>
14. Klyuev, M.M., Volkov, S.V. (1984) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
15. Klyuev, M.M., Nikulin, A.A. (1970) Speed of movement and degree of heating of the metal drop in slag during electroslag remelting. *Bulleten TsNICherMet.*, 4, 32–34 [in Russian].
16. Schmehl, R. (2002) Advanced modeling of droplet deformation and breakup for CFD analysis of mixture preparation. In: *Proc. of ILASS-Europe 2002 (Zaragoza, 9–11 September, 2002)*.

EFFECT OF DEFORMATION OF MOLTEN METAL DROPS ON THEIR MOVEMENT AND HEATING IN A SLAG LAYER AT ESR

I.V. Krivtsun, V.M. Sidorets, A.V. Sybir, G.P. Stovpchenko, G.O. Polyshko, L.B. Medovar
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

A simplified mathematical model of the processes of movement and heating of molten metal drops in liquid slag at ESR is proposed in two variants of problem definition: the drop preserves its initial spherical shape; the drop is deformed and takes the shape of a spheroid flattened in the direction of movement. It is shown that drop deformation makes an essential impact on the velocity and duration of its movement in the layer of slag, as well as on the drop surface area (at preservation of its volume), which determines the conditions of heating and interaction of drop metal with molten slag. It was proved that due to increase of surface area and lowering of movement velocity of larger diameter drops, their heating in the slag layer occurs more effectively, compared to spherical drops. Ref. 16, Tabl. 2, Fig. 11.

Key words: electroslag remelting; mathematical modeling; consumable electrode; liquid metal drop; molten slag; heating; movement; drop deformation

Надійшла до редакції 22.01.2021