

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.8

УДК 669.162

Єлиссєв В.І.^{1,2}, к.ф.-м.н., ORCID:0000-0003-4999-8142, e-mail: ovoch-isi@outlook.com
Маначин І.О.¹, к.т.н., с.д., ORCID: 0000-0001-9795-6751, e-mail: ovoch-isi@outlook.com
Кисляков В.Г.¹, к.т.н., ORCID:0000-0002-1775-5050, e-mail: ovoch-isi@outlook.com
Руденко О.Л.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0001-6068-9901, e-mail: ovoch-isi@outlook.com
Чубіна О.А.³, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-2213-5013, e-mail: ms.chubina@ukr.net

¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАНУ, м. Дніпро

³Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Yelisiiev Volodymyr^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing

Manachyn Ivan¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, Senior Researcher of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing

Kislyakov Volodymyr¹, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing

Rudenko Olexander¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Out-of-Furnace Cast Iron Processing Department

Chubina Olena³, Candidate of Technical Sciences, Docent

¹Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

²Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

³Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДИФУЗІЙНО-КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗЧИНЕННЯ ПАРІВ МАГНІЮ В РОЗПЛАВІ ПІД ЧАС РУХУ БУЛЬБАШКИ В РЕЖИМІ ХІМІЧНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ РІВНОВАГИ МАГНІЮ ТА СІРКИ

Метою роботи є розгляд дифузійно-кінетичного розчинення магнію з бульбашки, що рухається, в розплав з урахуванням зміни його параметрів при локальній хімічній рівновазі. Виконано математичний опис дифузійного процесу. Наведено результати розрахунків для бульбашки, що піднімається з глибини 2 м розплаву при температурі чавуну 1300 °C і 1400 °C в умовах, коли концентрація сірки становить 0,05 % (початкова стадія процесу) і 0,002 % (режим глибокої десульфурзації). Проаналізовано залежності зміни радіусів бульбашок під час їх підйому в розплав чавуну, зміни глибини підйому бульбашок у розплав, концентрації магнію на їхній поверхні, а також зміни маси магнію в бульбашках при температурах металу 1300 °C і 1400 °C. Розроблено математичну модель розчинення рухомих бульбашок парів магнію в розплав з урахуванням хімічної рівноваги концентрацій сірки та магнію в металі. Запропонована математична модель дає теоретичну оцінку втрат парів магнію.

Ключові слова: рафінування чавуну; магній; пюзир, кінетика; модель.

The aim of the work is to examine the diffusion-kinetic dissolution of magnesium from a moving bubble into the melt, taking into account changes in its parameters under local chemical equilibrium. A mathematical description of the diffusion process is provided. The results of calculations are presented for a bubble rising from a depth of 2 meters in the melt at temperatures of 1300 °C and 1400 °C, under conditions where the sulfur concentration is 0.05 % (initial stage of the process) and 0.002 % (deep desulfurization mode). The dependencies of bubble radius changes during their ascent in the melt, the changes in the depth of bubble rise, magnesium concentration on their surface, as well as the changes in the mass of magnesium in the bubbles at metal temperatures of 1300 °C and 1400 °C, are analyzed. A mathematical model for the dissolution of moving magnesium vapor bubbles in the melt is developed, taking into account the chemical equilibrium of sulfur and magnesium concentrations in the metal. The proposed mathematical model provides a theoretical estimate of magnesium vapor losses.

Keywords: cast iron refining; magnesium; bubble, kinetics; model.

Постановка проблеми

У початковий момент процесу десульфурації, коли концентрація магнію в розплаві близька до нуля, навіть велика бульбашка, що досить швидко піднімається з глибини розплаву, встигає віддати практично весь магній. Згодом концентрація сірки зменшується, а концентрація магнію в розплаві поступово збільшується, що призводить до уповільнення розчинення парів. Уповільнення розчинення може призводити до того, що бульбашка, яка піднімається на поверхню, буде містити деяку кількість парів магнію, яка практично і складатиме його втрату. Внаслідок цього це питання представляє великий теоретичний інтерес і безпосередньо перекликається з принциповими науковими положеннями і технологічними методами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Великий статистичний матеріал про результати науково-виробничих здобутків у галузі позапічної десульфурації, викладений у монографіях [1, 2], дає можливість для поглиблення та узагальнення теоретичних положень досліджуваного процесу. Зокрема одним з найважливіших питань є питання про надходження парів магнію з бульбашки, що рухається, в розплавленій чавун з урахуванням хімічної реакції $Mg + S \Leftrightarrow MgS$. У роботах [3—5] теоретично показано, що завдяки високій розчинності парів магнію спливаюча бульбашка, що містить ці пари, швидко віддає їх розплаву. У цій роботі розглядається питання дифузійно-кінетичного розчинення магнію з бульбашки, що рухається, в розплав з урахуванням зміни його параметрів при локальній хімічній рівновазі. Останнє передбачає, що швидкості хімічної реакції (пряма та зворотна) значно перевищують швидкості дифузійного та переносного руху. Спроби чисельного розгляду процесу дифузійно-кінетичного розчинення парів магнію в розплав чавуну було здійснено ще в роботі [5], у якій було чисельно підтверджено швидке засвоєння магнію розплавленим металом. Відмінністю нового розв'язання задачі в даній статті від [5] є більш ширша постановка та детальніший аналіз кінетичної поведінки парів магнію в бульбашці та в розплавленому металі.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розгляд дифузійно-кінетичного розчинення магнію з бульбашки, що рухається, в розплав з урахуванням зміни її параметрів при локальній хімічній рівновазі.

Виклад основного матеріалу

Математична постановка задачі

Для математичного опису дифузійного процесу приймемо, що газова бульбашка має сферичну форму, що обтікається рідким металом. Враховуючи, що коефіцієнти дифузії магнію і сірки мають порядок 10^{-9} всю розрахункову область на поверхні бульбашки можна представити у вигляді плоскої смуги довжиною в півколо бульбашки L і шириною h в долі мм. Це полегшує постановку задачі та її вирішення. У цьому випадку рівняння мають вигляд

$$\frac{\partial c_{Mg}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{Mg}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{Mg}}{\partial y} = D_{Mg} \left(\frac{\partial^2 c_{Mg}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{Mg}}{\partial y^2} \right) - j_{Mg}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_{Se}}{\partial t} + u \frac{\partial c_{Se}}{\partial x} + v \frac{\partial c_{Se}}{\partial y} = D_{Se} \left(\frac{\partial^2 c_{Se}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{Se}}{\partial y^2} \right) - j_{Se}, \quad (2)$$

де t — час; x — поздовжня координата; y — поперечна координата; c_{Mg} , c_{Se} — масові концентрації магнію та сірки в розплаві; D_{Mg} , D_{Se} — коефіцієнти дифузії компонентів; u , v — швидкості потоку (поперечну швидкість v приймемо рівною нулю, швидкість u дорівнює швидкості пузиря U_P); j_{Mg} , j_{Se} — величини, що визначають швидкості хімічної реакції. Так як, ці швидкості невідомі, розв'язання задачі будуватимемо на основі, як уже вказувалося, локального квазірівноважного стану компонентів. Математично це зумовлює наступний процес чисельного рахунку. На кожному тимчасовому кроці з кінцево-різностних уявлень виписаних вище рівнянь (без j_{Mg} і j_{Se}) визначаються попередні величини $\overline{c_{Mg}}$, $\overline{c_{Se}}$. Потім вони коригуються відповідно до рівноважної залежності [6]

$$c_{Mg} \cdot c_{Se} = K = 1,4 \cdot 10^{-8} - 0,86(1400 - t) \cdot 10^{-10} \quad (3)$$

наступним чином. На кожному кроці в кожній точці маємо попередні значення $\overline{c_{Mg}} = \frac{\overline{N_{Mg}}}{\rho_M} m_{Mg}$, $\overline{c_{Se}} = \frac{\overline{N_{Se}}}{\rho_M} m_{Se}$, ($\overline{N_{Mg}}$, $\overline{N_{Se}}$ — мольні концентрації; m_{Mg} , m_{Se} — молекулярні маси магнію та сірки; ρ_M — щільність металу). У відповідності з реакцією магнію з сіркою

$$\overline{N_{Mg}} = N_{Mg} + \Delta N_{Mg}; \quad (4)$$

$$\overline{N_{Se}} = N_{Se} + \Delta N_{Se}, \quad (5)$$

де N_{Mg} , N_{Se} — мольні концентрації, що залишилися після реакції; ΔN_{Mg} , ΔN_{Se} — мольні величини, які вступили в реакцію. Враховуючи, що $\Delta N_{Mg} = \Delta N_{Se}$ віднімемо одне з іншого і, переходячи до масових концентрацій з урахуванням умови (3), отримуємо

$$c_{Mg} = \frac{1}{2} m_{Mg} \left(\frac{\overline{c_{Mg}}}{m_{Mg}} - \frac{\overline{c_{Se}}}{m_{Se}} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} m_{Mg}^2 \left(\frac{\overline{c_{Mg}}}{m_{Mg}} - \frac{\overline{c_{Se}}}{m_{Se}} \right)^2 + \frac{m_{Mg}}{m_{Se}} K}. \quad (6)$$

Далі ці нові значення c_{Mg} , c_{Se} беруть участь у рівняннях (1), (2) для отримання нових значень на наступному часовому кроці і т.п. Межевими умовами є такі рівності:

$$\text{при } x=0 \quad c_{Mg} = c_{Mg}^*, \quad c_{Se} = c_{Se}^*;$$

$$\text{при } x=L \quad \partial c_{Mg} / \partial x = 0, \quad \partial c_{Se} / \partial x = 0;$$

$$\text{при } y=0 \quad c_{Mg} = c_{Mg}^{**}, \quad \partial c_{Se} / \partial y = 0;$$

$$\text{при } y=H \quad c_{Mg} = c_{Mg}^*, \quad c_{Se} = c_{Se}^*;$$

де c_{Mg}^* , c_{Se}^* — рівноважні значення на нескінченності, а c_{Mg}^{**} визначається за умови динамічної рівноваги на поверхні розплаву [6]

$$\lg(100 \cdot c_{Mg}^{**}) = \frac{7000}{T} - 5,1 + \lg(p_{Mg} / 100000), \quad (7)$$

де p_{Mg} — парціальний тиск парів магнію у бульбашці. Швидкість бульбашки будемо визначати за такою формулою [7]

$$U_P = \left[g R_p \frac{\rho_M - \rho_P}{\rho_M + \rho_P} + \frac{\sigma_M}{R_p (\rho_M + \rho_P)} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

де R_p — радіус бульбашки; ρ_P , ρ_M — щільність газу у бульбашці; σ_M — коефіцієнт поверхневого натягу. Враховуючи, що $\rho_P \ll \rho_M$, щільністю газу можна знехтувати. Додамо до цих рівнянь такі вирази: рівняння стану газу

$$\rho_P R_S T_P = p_P, \quad (9)$$

де $R_S = \frac{R}{(\gamma_{Mg} / m_{Mg} + \gamma_G / m_G)}$ — газова стала суміші з парів магнію і несучого газу (аргон або азот), m_{Mg} — молекулярна маса несучого газу; γ_{Mg} , γ_G — масові концентрації магнію і газу в пузирі ($\gamma_{Mg} + \gamma_G = 1$), R — універсальна газова стала, $p_P = p_a + p_{Mg} \cdot H + 2 \cdot \sigma / R_p$ — тиск у бульбашці, H — глибина, на якій знаходиться бульбашка. Враховуючи, що тиск у бульбашці дорівнює також сумі парціальних тисків газу та парів магнію допишемо наступну залежність

$$p_{Mg} = x_{Mg} p_P, \quad (10)$$

де $x_{Mg} = \frac{\gamma_{MG} / m_{Mg}}{(\gamma_{Mg} / m_{Mg} + \gamma_G / m_G)}$ — мольна доля магнію.

Виклад основного матеріалу

Як приклади вирішення поставленої задачі наведемо результати розрахунків для бульбашки ($R_p = 0,0025$ м), що піднімається з глибини 2 м розплаву при температурі чавуну 1300 °С і 1400 °С в умовах, коли концентрація сірки становить $0,05$ % (початкова стадія процесу) і $0,002$ % (режим глибокої десульфурації) при цьому початковий вміст магнію в бульбашці $\gamma_{Mg_0} = G_{Mg_0} / (G_{Mg_0} + G_{G_0})$ дорівнює $0,9$ та 1 (G_{Mg} , G_G — маси магнію та газу в бульбашці). На перших рис. 1—4 показані розраховані параметри для випадку, коли температура чавуну дорівнює 1300 °С. З рис. 1 видно, що радіуси бульбашок, наповнені парами магнію (криві 1, 2) швидко зменшуються і бульбашки лопаються, як на початковій стадії, так і в кінці процесу. Це свідчить про те, що бульбашки з парами магнію практично досягають поверхні металу, магній у цих випадках повністю поглинається чавуном.

У разі, коли у бульбашці виявляється частина газу-носія картина дещо інша. Криві 3, 4 на рис. 1 та 2 показують, що такі бульбашки доходять до поверхні металу, при цьому радіуси бульбашок спочатку зменшуються, а потім починають збільшуватися. Зменшення розмірів бульбашок пов'язане зі швидкою віддачею парів магнію розплаву, а збільшення — із зменшенням гідростатичного тиску у шарі розплаву. Про розчинення магнію свідчать значення концентрації його на поверхні бульбашки в металі, наведені на рис. 3.

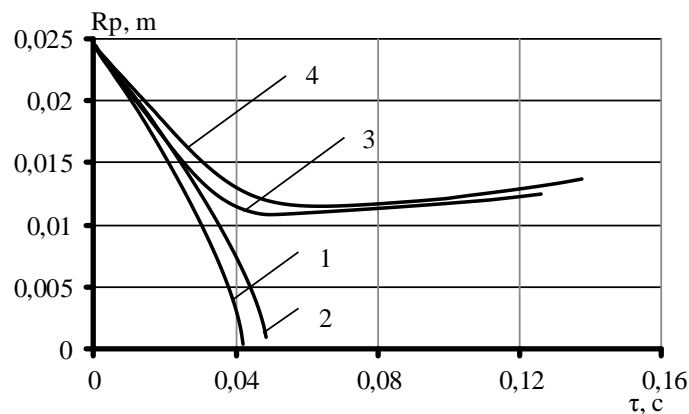


Рис. 1. Зміна радіусів бульбашок під час підйому в розплаві чавуну за температури металу 1300 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05$ %; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002$ %; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05$ %; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002$ %

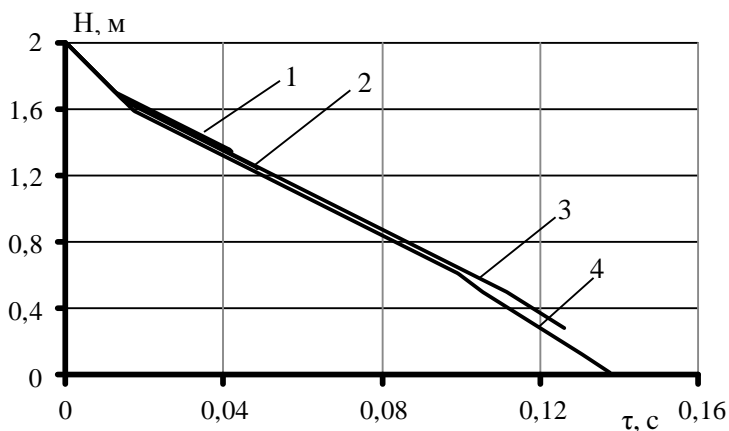


Рис. 2. Зміна глибини підйому бульбашок у розплаві чавуну при температурі металу 1300 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05$ %; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002$ %; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05$ %; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002$ %

Як впливає з цього рисунку концентрації при $\gamma_{Mg_0} = 1$ досить високі та слабо відрізняються один від одного. Зменшення їх пов'язане зі зменшенням гідростатичного тиску в бульбашках, що піднімаються. Ці значення і забезпечують швидке розчинення парів та колапс бульбашок. У випадку, коли $\gamma_{Mg_0} = 0,9$ його концентрація швидко падає: по-перше, через зменшення гідростатичного тиску і, по-друге, через зменшення частки парів магнію у бульбашках.

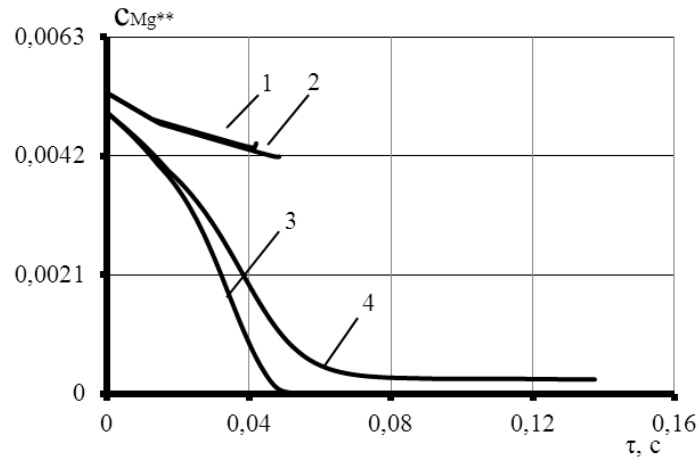


Рис. 3. Концентрації магнію на поверхні бульбашок в розплаві чавуну при температурі металу 1300 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$

При цьому криві 3 і 4 помітно відрізняються одна від одної: крива 3 (початок процесу) практично падає до нуля, крива 4 до нуля не доходить, що вказує на залишкове значення магнію в пазурі при виході з металу. Проте величина залишкової маси магнію незначна, що вказує крива 4 на рис. 4.

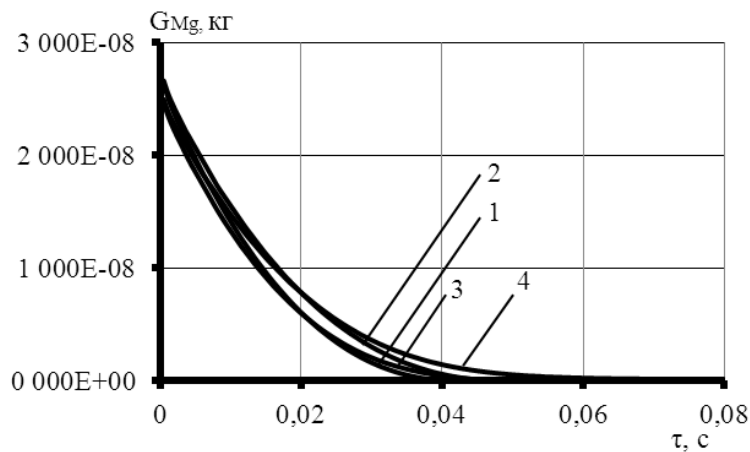


Рис. 4. Зміни величини маси магнію в бульбашках при температурі металу 1300 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$

З рис. 4 видно, що майже весь магній під час підйому бульбашки встигає заглибитись у розплав. Таким чином, з розрахунків випливає, що при температурі чавуну 1300 °С магній з бульбашки радіусом 2,5 см практично повністю переходить у метал (для кривої 4 частка залишкового магнію по відношенню до початкового становить менше 0,01).

У наступній серії розрахунків візьмемо температуру розплаву 1400 °С. На рис. 5—8 наведемо такі ж криві, що характеризують динаміку руху бульбашки та розчинення магнію. З рис. 5 добре видно, що бульбашка з парами магнію при $\gamma_{Mg_0} = 1$ (крива 1) не досягає поверхні металу, її час колапсу дещо більше, ніж для аналогічної бульбашки при 1300 °С. В інших варіантах бульбашки досягають поверхні, це стосується навіть бульбашки повністю з парів магнію (крива 2 рис. 6). У цьому випадку вони не встигають лопнути, внаслідок чого частина пари йде в атмосферу. З рис. 7 видно, що концентрація магнію на поверхні бульбашки в цій серії варіантів приблизно в півтора-два рази нижче, ніж при температурі 1300 °С.

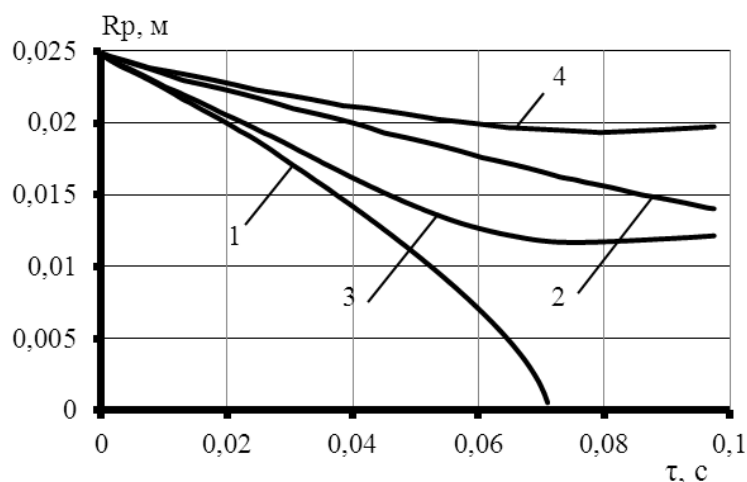


Рис. 5. Зміна радіусів бульбашок під час підйому в розплаві чавуну при температурі металу 1400 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$.

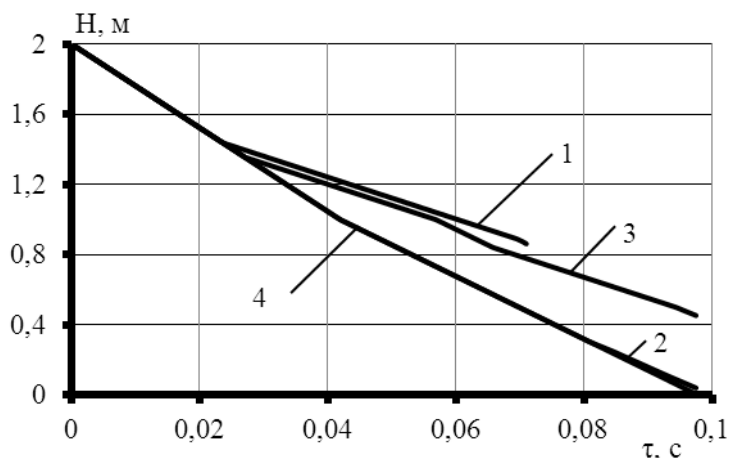


Рис. 6. Зміна глибини підйому бульбашок у розплаві чавуну при температурі металу 1400 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$.

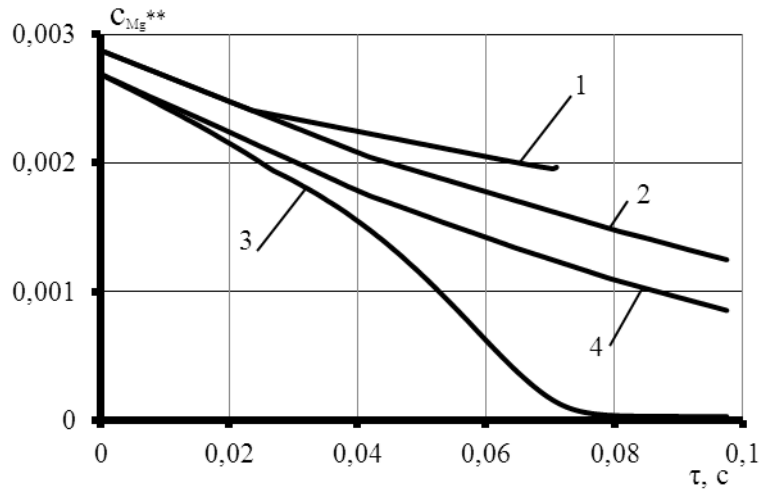


Рис. 7. Концентрації магнію на поверхні бульбашок в розплаві чавуну при температурі металу 1400 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$

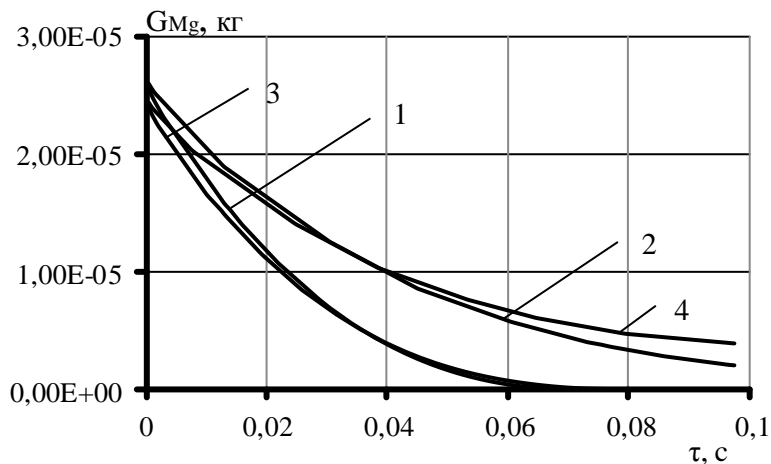


Рис. 8. Зміни величини маси магнію в бульбашках при температурі металу 1400 °С. Крива 1 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 2 — $\gamma_{Mg_0} = 1$, $c_{Se}^* = 0,002\%$; 3 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,05\%$; 4 — $\gamma_{Mg_0} = 0,9$, $c_{Se}^* = 0,002\%$

Таке зменшення концентрацій призводить до зменшення витрат магнію із бульбашок при розчиненні. Внаслідок цього, як випливає з рис. 8, у варіантах 2 і 4 бульбашки виносять на поверхню розплаву цілком помітну кількість магнію. Так, при $\gamma_{Mg_0} = 1$ (варіант 2) залишкова маса магнію становить 0,075 від початкової, а при $\gamma_{Mg_0} = 0,9$ (варіант 4) — 0,161, тобто за такої температури металу втрата магнію може становити близько 10—15 %.

Висновки

Розроблено математичну модель розчинення рухомих бульбашок парів магнію в розплаві з урахуванням хімічної рівноваги концентрацій сірки та магнію в металі. Розрахунки показують, що при температурі розплаву 1300 °С майже весь магній йде з бульбашки в метал. При температурі 1400 °С швидкість розчинення зменшується, і частина парів виносить в атмосферу, що визначає його втрату. Запропонована математична модель дає теоретичну оцінку таких втрат.

Список використаної літератури

1. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. *Наукова думка*, 2011. 206 с.
2. Шевченко А.П., Маначин И.А., Вергун А.С., Двоскин Б.В., Кисляков В.Г., Шевченко С.А., Остапенко, А.В. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. *Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. VAL*, 2017. 251 с.
3. Булахтин А.С., Елисеев В.И., Шевченко А.Ф. К вопросу массообмена магнийсодержащих пузырей с расплавом чугуна. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. ИЧМ НАНУ. 2005. №11. С. 57—66.
4. Булахтин А. С., Елисеев В. И., Курилова Л. П., Руденко О. Л. Модель движения и растворение магнийсодержащих пузырьков в расплаве чугуна. *Теория и практика металлургии*. 2007. №2(3). С. 70—74.
5. Елисеев В. И., Булахтин А. С., Курилова Л. П., Шевченко А. П. Исследование особенностей динамики и растворения паромagneйных пузырьков, всплывающих в расплаве чугуна. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. ИЧМ НАНУ. 2008. №18. С. 91—105.
6. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием. *Металлургия*, 1980. 240 с.
7. Маленков И. Г. О движении крупных пузырей, всплывающих в жидкости. *ПМТФ*. 1968. №6. С. 130—134.

DIFFUSION-KINETIC MODEL OF DISSOLUTION OF MAGNESIUM VAPOR IN A MELT DURING BUBBLE MOTION IN THE REGIME OF CHEMICAL LOCAL EQUILIBRIUM OF MAGNESIUM AND SULFUR

Abstract

The mathematical description of the diffusion process is performed. The results of calculations for a bubble rising from a depth of 2 m of melt at a cast iron temperature of 1300 °C and 1400 °C under conditions when the sulfur concentration is 0.05 % (initial stage of the process) and 0.002 % (deep desulfurization mode) are presented. The dependences of the change in the radii of bubbles during the rise in the cast iron melt, the change in the depth of bubble rise in the cast iron melt, the concentration of magnesium on the surface of bubbles in the cast iron melt, and the change in the mass of magnesium in bubbles at metal temperatures of 1300 °C and 1400 °C were analyzed. A mathematical model of the dissolution of moving bubbles of magnesium vapor in a melt has been developed, taking into account the chemical equilibrium of sulfur and magnesium concentrations in the metal. The proposed mathematical model gives a theoretical estimate of magnesium vapor losses.

It is shown that at a temperature of 1300 °C the radii of bubbles filled with magnesium vapor decrease rapidly and the bubbles pop both at the initial stage and at the end of the process. This indicates that the bubbles with magnesium vapor practically reach the metal surface, and magnesium is completely absorbed by the cast iron in these cases. In the case when a part of the gas is in the bubble, such bubbles reach the metal surface, while the radii of the bubbles first decrease and then begin to increase. The decrease in the size of the bubbles is associated with the rapid release of magnesium vapor to the melt, and the increase is associated with a decrease in hydrostatic pressure in the melt layer.

The curves characterizing the dynamics of bubble motion and magnesium dissolution at a melt temperature of 1400 °C are presented. It is shown that a bubble with magnesium vapor at $\gamma_{Mg_0} = 1$ does not reach the metal surface, its collapse time is somewhat longer than for a similar bubble at 1300 °C. In other variants, bubbles do reach the surface, even a bubble made entirely of magnesium vapor. In this case, it does not have time to collapse, causing part of the vapor to escape into the atmosphere. The concentration of magnesium on the surface of the bubble in a series of variants at a temperature of 1400 °C is about one and a half to two times lower than at a temperature of 1300 °C.

A mathematical model of the dissolution of moving bubbles of magnesium vapor in the melt was developed, taking into account the chemical equilibrium of sulfur and magnesium concentrations in the metal. The calculations show that at a melt temperature of 1300 °C, almost all of the magnesium leaves the bubble for the metal. At a temperature of 1400 °C, the dissolution rate decreases, and some of the vapors are released into the atmosphere, which determines its loss. The proposed mathematical model provides a theoretical estimate of such losses.

References

- [1] Shevchenko, A. F., Bolshakov, V. I., & Bashmakov, A. M. (2011). Tehnologiya i oborudovanie desulfuracii chuguna magniem v bolshegruznyh kovshah [Technology and equipment for desulfurization of cast iron with magnesium in heavy-duty ladles]. *Naukova dumka*. [in Russian].
- [2] Shevchenko, A. P., Manachin, I. A., Vergun, A. S., Dvoskin, B. V., Kislyakov, V. G., Shevchenko, S. A., & Ostapenko, A. V. (2017). Vnepechnaya desulfuraciya chuguna v kovshah Tehnologiya. Issledovaniya. Analiz. Sovershenstvovanie [Ladle desulphurization of pig iron. Technology. Research. Analysis. Improvement]. *VAL*. [in Russian].
- [3] Bulahtin, A. S., Eliseev, V. I., & Shevchenko, A. F. (2005). K voprosu massoobmena magnijsoderzhashih puzyrej s rasplavom chuguna [On the issue of mass transfer of magnesium-containing bubbles with cast iron melt]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii*. IChM NANU, (Vyp. 11), 57—66. [in Russian].
- [4] Bulahtin, A. S., Eliseev, V. I., Kurilova, L. P., & Rudenko, O. L. (2007). Model dvizheniya i rastvorenija magnijsoderzhashih puzyrkov v rasplave chuguna [Model of movement and dissolution of magnesium-containing bubbles in cast iron melt] *Teoriya i praktika metallurgii*, (2–3), 70—74. [in Russian].
- [5] Eliseev, V. I., Bulahtin, A. S., Kurilova, L. P., & Shevchenko, A. P. (2008). Issledovanie osobennostej dinamiki i rastvorenija paromagnievyyh puzyrkov, vsplyvayushih v rasplave chuguna [Study of the dynamics and dissolution features of magnesium vapor bubbles floating in cast iron melt]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii*. IChM NANU, (Vyp. 18), 91—105. [in Russian].
- [6] Voronova, N. A. (1980). Desulfuraciya chuguna magniem [Desulfurization of cast iron with magnesium]. *Metallurgiya*. [in Russian].
- [7] Malenkov, I. G. (1968). O dvizhenii krupnyh puzyrej, vsplyvayushih v zhidkosti [On the movement of large bubbles rising in liquid]. *PMTF*, (6), 130—134. [in Russian].

Надійшла до редколегії 30.09.2024