

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.056

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ, ВВЕДЕНОГО В ЧАВУН, ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Маначин І.О.¹, Єлісєєв В.І., Кисляков В.Г.³, Рибальченко М.О.⁴

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., ст. досл., Україна. Український державний університет науки і технологій, Україна

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України к.ф.-м.н., с.н.с., Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., Україна, Український державний університет науки і технологій, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

Анотація. Фактичні результати промислового застосування позапічної десульфурації свідчать, що практичні результати застосування технології в багатьох випадках не є досить стійкими. Дослідження були проведені на розрахункових та "холодних" фізичних моделях. В якості десульфуруючих реагентів оцінені магній, мелене вапно, карбід кальцію. На основі фактичних результатів фізичного моделювання та подальших розрахунків був сформульований поліпшений вираз для розрахунку глибини занурення струменя в залежності від параметрів інжекційної занурювальної фурми. Показано, що під час інжекційної десульфурації чавуну газовий компонент потоку зупиняє свій напрямний рух у розплаві до 80 мм (фактично 50-60 мм), тверді частки продовжують рухатися у порожнині та вдаряються у поверхню цієї порожнини. Для оцінки подальшого руху частинки через межу "газова порожнина-розплав" була розроблена модель для визначення глибини занурення частинок реагенту як функції швидкості вдування двофазного потоку.

Ключові слова: реагент, частинка, модель, занурення, магній, вапно.

Стан питання. Процеси інжекційної десульфурації чавуну широко застосовуються на металургійних підприємствах у багатьох країнах [1–6]. Основні способи десульфурації чавуну використовують методи інжекції для введення диспергованих реагентів у розплав через занурені вогнетривкі фурми [1-9, 11-14]. Використання цих процесів та різних реагентів у диспергованій формі обумовлене бажанням забезпечити десульфурацію чавуну з найвищою ефективністю і за найкоротший період часу.

Фактичні результати промислового застосування позапічної десульфурації чавуну свідчать, що практичні результати застосування в деяких випадках не є досить стійкими та далеко не досягають можливого і очікуваного. Так, процес спільної інжекції магнію у суміші з вапном супроводжується значним споживанням реагентів - 3-4,5 кг/т чавуну, що призводить до значного додаткового шлакоутворення та втрат чавуну разом із цим шлаком [1, 10]. У випадку моноінжекції магнію згідно з технологією китайських інститутів, погані параметри системи вдування та параметрів інжекційні магнію значно знижують робочі можливості технології та ефективність процесу десульфурації чавуну в цілому. Однією з основних причин наведених вище недоліків є те, що розвиток технологій знесірчення чавуну не врахував умови та особливості взаємодії інжекційного двофазного потоку (твердий реагент + газ) з розплавом чавуну, особливо в зоні витоку з каналу фурми до розплаву.

Мета роботи – є розробка моделі розрахунку занурення газової та твердої складових інжектуючого двофазного потоку з розплавом чавуну при позапічній обробці.

Основні результати дослідження.

Змінні параметри були наступними: межі діаметра частинок реагента - від 0,04 до 1,8 мм; витрата інжектуючого азоту - від 10 до 160 нм³/год; діаметр каналу фурми - від 7,5 до 20 мм; швидкість потоку - від 20 до 150 м/с. Гранульований магній, мелене вапно та карбід кальцію були оцінені як десульфуруючі реагенти. Азот був використаний як носій газу. При холодному фізичному моделюванні в якості моделюючого середовища використовувалася вода. На основі фактичних результатів фізичного моделювання та наступних розрахунків було сформульовано поліпшений вираз для визначення довжини газового струменя у рідині, залежно від параметрів інжекційної через занурену фурму [7].

$$L_{\text{стр}} = K_k W_{\Gamma} \times \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \times D_k}{(\rho_m - \rho_{\Gamma}) \times g}} \quad (1)$$

де ρ_r , ρ_m - густина газової фази та чавуну відповідно; W_r - швидкість потоку на виході фурми; D_k - діаметр каналу фурми; K_k - фактор корекції, встановлений у кожному випадку згідно з виразом:

$$K_k = 3.4408 \cdot W_r^{-0.339} \quad (2)$$

З розрахунків, випливає, що глибина проникнення газової фази збільшується зі збільшенням швидкості потоку та діаметру каналу фурми, досягаючи 15–100 мм (залежно від параметрів інжекційної системи).

Для реальних умов інжекційної подачі десульфуруючих реагентів ($D_c = 7$ –20 мм, $W_g = 20$ –100 м/с), довжина утвореної газової порожнини може бути 20–80 мм. Подібні залежності отримуються за інших умов занурення фурми у розплав чавуну (в середньому 0,5–4,0 м), але з іншими значеннями параметрів. Таким чином, під час інжекційної десульфурації чавуну газовий компонент потоку зупиняє свій напрямлений рух у розплаві до 80 мм (фактично 50–60 мм), тверді частки продовжують рухатися у газовій порожнині та вдаряються у поверхню цієї порожнини. Для оцінки подальшого руху частинки через межу "газова порожнина-розплав" була розрахована глибина проникнення частинок у рідке залізо. Рух частинки у розплаві може бути описаний рівнянням (3), яке відображає умови вертикального руху частинки від верху донизу з заданою початковою швидкістю до повного зупинення частинки:

$$h_{TB} = \frac{dW_{TB}}{dx} = \frac{\left[-0,5 \cdot \pi \cdot r_{TB}^2 \cdot C_x \cdot \rho_m \cdot W_{TB}^2 \right] + \left[0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB}^3 \cdot g \cdot (\rho_{TB} - \rho_m) \right]}{\left[0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB} \cdot (\rho_{TB} + 0,5 \cdot \rho_m) \right] \cdot W_{TB}} \quad (3)$$

де C_x - коефіцієнт гідродинамічного опору кулі, r_{TB} - радіус твердої частки, ρ_{TB} - густина твердої частки, ρ_m - густина розплаву чавуну, W_{TB} - змінна швидкість частинки у розплаві чавуну. Коефіцієнт C_x може бути визначений за формулою:

$$C_x = \frac{24}{Re_{TB}} + \frac{4,4}{Re_{TB}^{1/2}} + 0,42 \quad (4)$$

де Re_{TB} - критерій Рейнольдса для твердої частки, що рухається у розплаві.

$$= \frac{2r_{TB} W_{TB}}{V_M} \quad (5)$$

де ν_m - кінематична в'язкість розплаву.

У розрахунках було враховано, що перед введенням у розплав чавуну тверда частка реагента повинна подолати поверхневий натяг. Враховуючи прийняті припущення,

процес зміни швидкості частинки ($W_{\text{ТВ}}$) через подолання поверхневого натягу може бути оцінений аналітичним виразом (6):

$$W_{\text{ТВ}} = \sqrt{W_{0\text{ТВ}}^2 - \frac{2\sigma_{\text{м}}}{\rho_{\text{ТВ}} \cdot d_{\text{ТВ}}}} \quad (6)$$

де $W_{\text{ТВ}}$ - поточна швидкість твердої частки реагента; $W_{0\text{ТВ}}$ - початкова швидкість твердої частки реагента; $\sigma_{\text{м}}$ - поверхневий натяг рідкого металу; $d_{\text{ТВ}}$, $\rho_{\text{ТВ}}$ - діаметр та густина частинки, відповідно.

Згідно з вищезазначеною моделлю, глибина проникнення частинок реагента в розплав чавуну була визначена шляхом зміни діаметра частинки від 0,02 до 1,8 мм та швидкості від 5 до 160 м/с. Глибина занурення фурми у розплав становила 3 м. Магній, вапно і карбід кальцію вивчалися як реагенти. Перешкода в шляху руху частинки - це межа «газова порожнина-розплав». З розрахунків встановлено, що коли діаметр частинки менше 0,08 а швидкість менше 10 м/с, частинки реагента не подолають поверхневий натяг на межі "порожнина-розплав чавуну". З частинкою діаметром від 0,15 до 1,8 мм та швидкістю 20 м/с або більше, частинки, подолавши поверхневий опір, зменшують швидкість на 0-1 м/с, тобто ці втрати швидкості можна не враховувати. Після подолання поверхневого натягу частинки реагента вводяться у розплав чавуну. Зміни глибини проникнення частинок (на прикладі магнію) розраховані та показані на діаграмі на рис. 2. Подібні діаграми були отримані для використання вапна та карбіду кальцію (майже не відрізняються від діаграми для магнію). З діаграми на рис. 2 випливає, що діаметр частинок (включаючи їх масу) та швидкість руху фундаментально впливають на параметри взаємодії частинок з розплавом. Збільшення діаметра частинки від 0,02–0,06 до 1,8 мм та швидкості частинки від 5–10 до 160 м/с збільшує глибину проникнення частинок магнію в розплав чавуну до 27 мм.

Висновки. За допомогою введення двофазових потоків до розплаву через заглибну фурму здійснюється десульфуратія чавуну дисперсними реагентами. Компоненти двофазового потоку, при їх руху в розплав, мають різні фізичні та енергетичні параметри. Тому газова фаза першою зупиняє свій рух у розплаві, проникаючи у рідкий залізо на глибину до 60 мм (з відповідними параметрами введення). Розроблена модель для розрахунку параметрів занурення твердих

частинок реагенту, що дозволяє прогнозувати їх поведінку у розплаві чавуну при рафінуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Voronova, N. A. (1983). Desulfurization of Hot Metal by Magnesium; Publisher. Iron & Steel Society; Publication date. January 1, 1983. [in Russian]
2. Robey, R. and etc. (2014). Out-of-blast processing of cast iron, taking into account specific production conditions. MPT International, 1, 16-24 [in Russian].
3. Molchanov, L., Nizyaev, K., Boychenko, B., Stoyanov, A., Synehin, Ye. (2013). Ladle desulphurization of liquid iron in context of the tasks of national industry. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 38-41 [in Ukrainian].
4. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, K. E. Pismarev, V. V. Akulov & G. Ya. Dovgalyuk (2010). Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. Steel Transl., 40, 35–37 <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
5. A. F. Shevchenko, A. M. Bashmakov, A. S. Vergun, I. A. Manachin, V. G. Kislyakov, É. A. Trotsenko, Liu Dong Yie & Yang Jia Rui. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. Metallurgist, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>.
6. Tovarovskii, I. G. (2014). Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. Steel Transl., 44, 350–358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>.
7. Vergun, A. S., Shevchenko, A. F., Kislyakov, V. G., Molchanov, L. S., Dvoskin, B. V. (2019). Sulphur and gas removal from hot metal by injecting disperse magnesium in a gas jet. Steel in translation, 49(1), 45-49. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010133>
8. Lindström, D., Nortier, P., Sichen, D. (2014). Functions of Mg and Mg–CaO Mixtures in Hot Metal Desulfurization. Steel Research International, 85(1), 76–88. <https://doi.org/10.1002/srin.201300071>.
9. Shevchenko, Manachin I.A., Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G., Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. (2017). Out-of-furnace desulphurisation of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement. Publisher. Dnipro-VAL; Publication date. July 25, 2017; ISBN 978-966-8704-75-8 [in Russian]. Що це за джерело?
10. Rudenko, A. L. (2014). The analysis of patterns of interphase sulfur distribution in the injection treatment of iron with magnesium. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 57(8), 13-18. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-13-18> [in Russian].
11. Rudenko, A. L. (2016). Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, 59(12), 896-902.). [in Russian].
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom (2017). Sulphur removal in hot metalmaking and oxygen steelmaking. Hot metalmaking & Steelmaking, 44(5), 333-343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>.
13. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, G. Ya. Dovgalyuk & K. V. Vinnik. (2011). Effectiveness of fluidized lime in the desulfurization of hot metal in 300-t casting ladles. Steel Transl., 41, 741–744. <https://doi.org/10.3103/S096709121109021X>

14. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgalyuk, G. Y. & V.N. Belomerya. The Efficiency of Using Fluidized Lime for Desulfurization of Iron in 300-Ton Charging Ladles. Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy, 13(194), 53-60. <https://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/14635>

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE INTERACTION PROCESS OF THE
COMPONENTS OF A TWO-PHASE FLOW INTRODUCED INTO CAST IRON
DURING INJECTION DESULFURIZATION**

Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyeyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko

Abstract. *Actual results of the industrial application of out-of-furnace desulfurization indicate that practical results of the technology in many cases are not sufficiently stable. The studies were conducted on computational and "cold" physical models. Magnesium, ground lime, calcium carbide - desulfurizing reagents. Based on the actual results of physical modeling and further calculations, improved expression was formulated for calculating the depth of jet immersion depending on the parameters of the injection lance. It is shown that during injection desulfurization of cast iron, the gas component of the flow stops its directional movement in the melt up to 80 mm (actually 50-60 mm), solid particles continue to move in the cavity and hit the surface of this cavity. To assess further movement of the particle through the "gas cavity-melt" boundary, model was developed to determine the depth of immersion of reagent particles as a function of the injection velocity of the two-phase flow.*

Keywords: *reagent, particle, model, immersion, magnesium, lime.*

REFERENCE

1. Voronova, N. A. (1983). Desulfurization of Hot Metal by Magnesium; Publisher. Iron & Steel Society; Publication date. January 1, 1983. [in Russian]
2. Robey, R. And etc. (2014). Out-of-blast processing of cast iron, taking into account specific production conditions. MPT International, 1, 16-24 [in Russian].
3. Molchanov, L., Nizyaev, K., Boychenko, B., Stoyanov, A., Synehin, Ye. (2013). Ladle desulphurization of liquid iron in context of the tasks of national industry. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 38-41 [in Ukrainian].
4. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, K. E. Pismarev, V. V. Akulov & G. Ya. Dovgalyuk (2010). Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. Steel Transl., 40, 35–37 <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
5. A. F. Shevchenko, A. M. Bashmakov, A. S. Vergun, I. A. Manachin, V. G. Kislyakov, É. A. Trotsenko, Liu Dong Yie & Yang Jia Rui. (2019). Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium. Metallurgist, 62, 965–973. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00734-w>.
6. Tovarovskii, I. G. (2014). Influence of blast-furnace parameters on coke consumption and productivity. Steel Transl., 44, 350–358. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050155>.

7. Vergun, A. S., Shevchenko, A. F., Kislyakov, V. G., Molchanov, L. S., Dvoskin, B. V. (2019). Sulphur and gas removal from hot metal by injecting disperse magnesium in a gas jet. *Steel in translation*, 49(1), 45-49. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010133>
8. Lindström, D., Nortier, P., Sichen, D. (2014). Functions of Mg and Mg–CaO Mixtures in Hot Metal Desulfurization. *Steel Research International*, 85(1), 76–88. <https://doi.org/10.1002/srin.201300071>.
9. Shevchenko, Manachin I.A., Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G., Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. (2017). Out-of-furnace desulphurisation of cast iron in ladles. Technology, research, analysis, improvement. Publisher. Dnipro-VAL; Publication date. July 25, 2017; ISBN 978-966-8704-75-8 [in Russian]. Що це за джерело?
10. Rudenko, A. L. (2014). The analysis of patterns of interphase sulfur distribution in the injection treatment of iron with magnesium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 57(8), 13-18. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-13-18> [in Russian].
11. Rudenko, A. L. (2016). Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 59(12), 896-902.). [in Russian].
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom (2017). Sulphur removal in hot metalmaking and oxygen steelmaking. *Hot metalmaking & Steelmaking*, 44(5), 333-343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>.
13. A. M. Zborshchik, S. V. Kuberskii, G. Ya. Dovgalyuk & K. V. Vinnik. (2011). Effectiveness of fluidized lime in the desulfurization of hot metal in 300-t casting ladles. *Steel Transl.*, 41, 741–744. <https://doi.org/10.3103/S096709121109021X>
14. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgalyuk, G. Y. & V.N. Belomerya. The Efficiency of Using Fluidized Lime for Desulfurization of Iron in 300-Ton Charging Ladles. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy*, 13(194), 53-60. <https://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/14635>