

УДК 669.162.63

І. О. Маначин^{1*}, к.т.н., ст.д., с.н.с., ORCID 0000-0001-9795-6751**В. П. Петруша**¹, м.н.с. ORCID 0000-0002-1031-3241**О. Л. Руденко**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6068-9901**В. В. Чугуй**¹, пров. інж.**С. О. Почитаєв**¹, інж. I кат.**Д. В. Єськов**², аспірант, ORCID 0009-0001-3286-9291¹ *Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*² *Дніпровський державний технічний університет** Автор для листування: imanachyn@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПОЗАПІЧНОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ЗЕРНИСТИМ МАГНІЄМ

Анотація. Позапічна десульфуріація чавуну стала необхідною та надійною ланкою між доменним та сталеплавильним виробництвом при виробництві якісної металопродукції. Оцінка ефективності видалення сірки з чавуну визначає якість технології знесірчення в цілому, забезпечуючи якісне й повне видалення сірки з розплаву. Найбільшого поширення у практиці позапічного знесірчення чавуну знайшов реагент – магній, що має унікальні властивості взаємодії з розплавом чавуну. Обґрунтовано необхідність комплексного та всебічного підходу до оцінки та вибору технології позапічної десульфуріації чавуну. Представлені фактичні дані щодо технології коінжекції вапна з магнієм (СаО + Mg) та моноінжекції зернистого магнію за українською технологією вдування на різних металургійних підприємствах. Показано, що одним із основних параметрів і показників є витрата реагенту, яка визначає всі основні характеристики процесу. Проведено порівняльний аналіз різних технологічних показників за різними технологіями вдування магнію у розплав чавуну. Найменші питомі витрати реагенту при моноінжекції магнію зумовлюють найменші витрати при промисловому освоєнні цього процесу. Фактичні показники промислових продувок свідчать про те, що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів – у середньому 0,42 – 0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфуріації – у середньому 5,5 – 7,7 хв, забезпеченням надглибокої десульфуріації чавуну – до 0,0003 – 0,001 %, ступенем десульфуріації – до 99 %, високою інтенсивністю видалення сірки – у середньому 12 – 14,4 %/хв, високим ступенем засвоєння реагенту – у середньому 75– 92 %. Зроблений висновок, що моноінжекція зернистого магнію є пріоритетним і найбільш економічним процесом

© І. О. Маначин, В. П. Петруша, О. Л. Руденко, В. В. Чугуй, С. О. Почитаєв, Д. В. Єськов, 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

позапічної десульфуратії чавуну, перевершуючи інші технології знесірчення за багатьма показниками.

Ключові слова: позапічна десульфуратія чавуну, порошокоподібне вапно, гранульований магній, витрата реагентів, ефективність знесірчення.

Посилання для цитування: Порівняльний аналіз ефективності процесів позапічної десульфуратії чавуну зернистим магнієм / І. О. Маначин, В. П. Петруша, О. Л. Руденко, В. В. Чугуй, С. О. Почитаєв, Д. В. Єськов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 364-374. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-023>

Вступ. Необхідність покращення техніко-економічних показників виплавки чавуну та сталі [1–5], а також активне зростання потреби різних галузей промисловості у використанні продукції з низьким вмістом сірки в зумовили впровадження на багатьох металургійних підприємствах технологій і засобів для видалення сірки, зокрема позапічної десульфуратії чавуну в ковшах [6, 8].

Останніми роками споживачі знесіреного чавуну посилили вимоги до процесу десульфуратії у таких напрямках:

1. Забезпечення отримання значної частини чавуну з вмістом сірки $\leq 0,005\%$, зокрема особливо чистого за сіркою ($\leq 0,001 - 0,002\%$);
2. Значне скорочення тривалості циклу операцій з позапічної підготовки чавуну – аж до ≤ 20 хв для забезпечення режиму роботи «шлавка за плавкою»;
3. Зниження втрат температури рідкого чавуну;
4. Зменшення втрат чавуну як зі шлаком, так і через інші технологічні фактори;
5. Зниження собівартості десульфуратії чавуну;
6. Забезпечення мінімальних капітальних витрат на створення комплексу десульфуратії чавуну та очищення його від шлаку;
7. Гарантування стабільності (до 90 % і більше) технології та надійності обладнання в умовах промислової експлуатації.

Аналіз світового досвіду позапічної десульфуратії чавуну [8-12] показує, що наразі найпоширенішими є так і технологічні процеси з використанням магнію:

1. Моноінжекція зернистого магнію;
2. Коінжекція суміші вапна та магнію.

Ці технології значною мірою відповідають сучасним вимогам, але не всім. Тому **метою** роботи є об'єктивна оцінка ефективності технологій десульфуратії чавуну було проведено комплекс всебічних досліджень показників позапічної обробки чавуну в однакових і рівноцінних умовах рафінування за двома групами ковшів – з масою чавуну 80 – 120 т та понад 200 т (великовантажні ковші).

Методика дослідження й результати. Одним із найбільш поширених процесів ковшової десульфурації чавуну є коінжекція меленого вапна в суміші з магнієм через занурювану фурму. Її активне впровадження зумовлене необхідністю підвищення здатності вапна до десульфурації, а також тим, що металурги більшості країн (крім України) не вміють раціонально та надійно вводити магній у чавун.

Коінжекцію магнію в суміші з вапном переважно застосовують у ковшах з масою чавуну понад 80 т, при цьому вміст магнію у вдуваній суміші зазвичай становить близько 20 %. Дані, що характеризують показники десульфурації чавуну в ковшах з масою 110, 180 і 220 т, наведені в таблиці 1. З них видно, що коінжекція суміші CaO і Mg також забезпечує зниження вмісту сірки в чавуні до 0,001 %.

Тривалість операції введення (вдування) реагентів, як правило, не перевищує 15 – 16 хв, що супроводжується меншими втратами температури чавуну. Тому коінжекція суміші CaO і Mg пов'язана з меншими (у порівнянні наприклад з KR-процесом) матеріальними та енергетичними витратами, хоча має більш складну структуру обладнання, систем автоматизації та управління.

При оцінці процесу коінжекції необхідно враховувати, що балансове співвідношення вапна і магнію становить не 4:1, а 6:1, тобто вапна витрачається більше, ніж зазначено в літературі [12-14], оскільки 2 частини вапна (відносно магнію) витрачаються під час занурення та підйому фурми з чавуну [13, 14]. Цей захід здійснюється для збереження чистоти (від заметалювання) каналу фурми.

На рис. 1 представлена отримана номограма залежності питомої витрати магнію (вдуваного в чавун методом коінжекції з вапном у 250-тонні заливальні ковші Каметсталь (м. Кам'янське) від початкового вмісту сірки та заданого кінцевого (цифри біля ліній номограми). Спостерігається чітка закономірність: витрати магнію (а відповідно і вапна) зростають зі збільшенням початкового вмісту сірки в чавуні та зниженням її кінцевого значення. Лінії функцій на діаграмі розташовані досить близько одна до одної, що можна пояснити участю вапна в процесі десульфурації чавуну.

Проведені нами спеціальні дослідження (на промислових ковшах) дозволили зробити висновок, що при вдуванні суміші магнію з вапном оксид кальцію також бере участь у реакціях взаємодії з сіркою чавуну. Отже, доданий до вапна магній не лише реагує з сіркою, але й виконує функцію відновника, активуючи вапно та беручи участь у реакції взаємодії 15 % CaO з сіркою чавуну.

Таблиця 1- Показники десульфурації чавуну коінжекцією суміші вапна та магнію в ковшах різного типорозміру

№	Показники	Шаганський МК	Ханданський МК	ПАТ «Каметсталь»
1	Маса чавуну в ковшах, т	178	108	223
2	Витрата реагентів, кг/т чавуну: - магнію - вапно на вдування Mg - вапно всього - реагентів всього	0,43 0,62 1,30 1,73	0,443 2,27 2,59 3,08	0,51 2,00 3,07 3,58
3	Зміст сірки в чавуні, % - [S] _{поч.} - [S] _{кін.}	<u>0,006-0,062</u> 0,027 <u>0,001-0,047</u> 0,009	<u>0,006-0,056</u> 0,030 <u>0,001-0,041</u> 0,016	<u>0,017-0,047</u> 0,054 <u>0,003-0,110</u> 0,025
4	Температура чавуну : - початкова - після обробки - Δ t - Δ t / τ _{прод.} , °C/ хв	1345 1330 15 1,1	1323 н/д н/д н/д	1272 1263 10 0,82
5	Показники десульфурації: - Ст. D (Степ. десу.), % - D _{Mg} (Ст.D / q _{Mg}) - Ст.D / τ _{прод.} , %/хв - β _{Mg} (q Mg / Δ [S]), кг/кг - β _{реак.} , кг/кг	66,7 15,6 3,9 2,4 9,7	57,9 13,3 н/д 2,01 14,0	56,2 11,0 4,6 1,6 11,2
6	τ _{прод.} – тривалість продування, хв	14	н/д	12,2
7	Інтенсивність вдування реагентів у чавун, хв.: - магнію - вапна	5,5 8,0	н/д н/д	9,4 36,6
8	Додатково утворюється шлаку, кг/кг чавуну	3,46	6,16	7,16
9	Втрати чавуну з додатково утворюваним шлаком, кг/кг чавуну	1,75	3,10	3,6
10	Ступінь засвоєння магнію на сірку, (K ^S _{Mg}), %	31,8	37,7	47,7
11	Вміст сірки в сталі, %	н/д	н/д	0,031

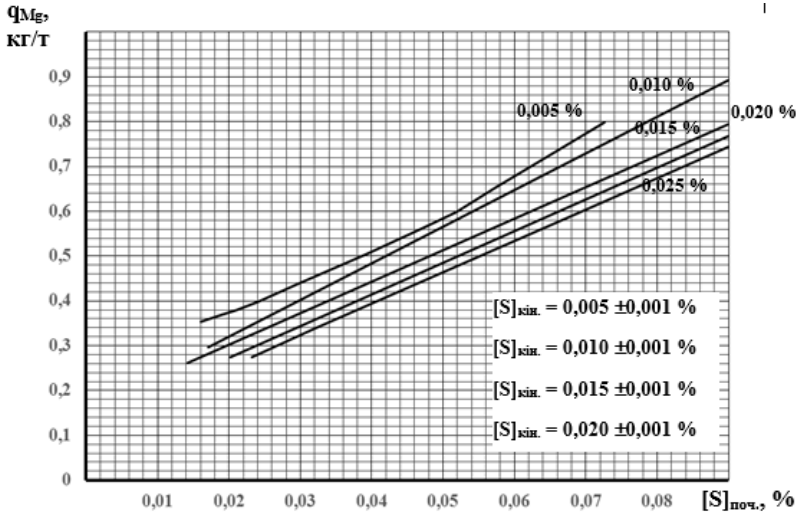


Рисунок 1- Залежність питомої витрати магнію (q_{Mg}) від початкового ($[S]_{поч.}$) та кінцевого (цифри біля ліній) вмісту сірки в чавуні при коінжекції вапна в суміші з магнієм. Маса чавуну в ковшах – 220 т (ПАТ «Камет-сталь»)

За результатами цих досліджень зроблено висновок, що при вдуванні суміші CaO і Mg близько 30 – 40 % вилученої сірки взаємодіє з оксидом кальцію. Таким чином, за цією технологією магній «працює» як десульфуратор, так і як відновник.

Моноінжекція зернистого магнію (без розбавляючих добавок) – сучасний технологічний процес ковшової десульфуратії чавуну методом моноінжекції зернистого магнію за українською розробкою є новим технологічним рішенням [5], у якому усунуто раніше наявні недопрацювання та недоліки.

Першою відмінністю є, передусім, забезпечення виняткової керованості, стабільності та надійності дозованої подачі магнію в рідкий чавун. Системи дозування та вдування магнію забезпечують надзвичайно високе парціальне тиск магнію в реакційній зоні, що створює сприятливі умови для його розчинення в чавуні та реалізації найбільш оптимального механізму взаємодії з сіркою чавуну.

З урахуванням змінних і нестабільних початкових умов у ковші щодо шлаку, передбачено вибірково корекцію складу шлаку шляхом додання фракціонованих матеріалів із відходів металургійного виробництва в невеликій кількості – близько 1 кг/т чавуну.

Для запобігання потраплянню утвореного післяпродувного шлаку в

конвертер передбачено високомеханізовані стенди для зливу шлаку з дистанційним керуванням та продувкою чавуну азотом у період зливу. Параметри технологічного процесу та компоновання установки десульфурації дозволяють забезпечити найвищу пропускну здатність установки – до 4 ковшів за 1 годину. Процес моноінжекції зернистого магнію перевірено в промислових умовах на ковшах із масою чавуну від 2 – 3 т до 350 т. У таблиці 2 наведено показники промислового застосування моноінжекції зернистого магнію в ковшах із масою чавуну 100, 150 і 260 т.

Фактичні показники промислових продувок свідчать про те, що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів – у середньому 0,42 – 0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфурації – у середньому 5,5 – 7,7 хв, і водночас забезпечує надглибоку десульфурацію чавуну – до 0,0003 – 0,001 %, ступінь десульфурації – до 99 %, високу інтенсивність видалення сірки – у середньому 12 – 14,4 %/хв, високий ступінь засвоєння реагенту – у середньому 75 – 92 %.

Звертає на себе увагу той факт, що моноінжекція магнію супроводжується найменшим додатковим шлакоутворенням і, відповідно, втратами чавуну з цим шлаком.

На рис. 2 представлено діаграму зміни питомої витрати магнію залежно від $[S]_{\text{поч}}$ для двох інжекційних процесів – моноінжекції магнію та коінжекції магнію в суміші з флюїдизованим вапном, з якої видно, що у випадку коінжекції магнію в суміші з вапном (за інших рівних умов) питома витрата магнію більша на 0,1 кг/т чавуну, ніж при моноінжекції.

При цьому слід звернути увагу на те, що сумарна витрата реагенту при коінжекції суміші у 6–7 разів перевищує витрату магнію, оскільки кінцеве співвідношення магнію до вапна при процесі коінжекції становить 1:6 [10], що пов'язано з тим, що при цій технології занурення та підйом фурми з чавуну здійснюється з подачею вапна (що запобігає заметалюванню каналу фурми).

Висновки

Підсумовуючи результати досліджень та аналізу, слід зробити висновок, що моноінжекція зернистого магнію є пріоритетним і найбільш економічним процесом позапечної десульфурації чавуну. Витрати на її реалізацію менші ніж за іншими технологіями введення магнію. Крім того, капітальні витрати на встановлення установки десульфурації методом моноінжекції магнію у 1,3–2,0 рази менші, ніж при використанні інших технологій.

Таблиця 2 – Показники десульфуратії чавуну моноіжекційного зернистого магнію на різних підприємствах в ківшах різного типорозміру

№ з/п	Показники	Баотоський меткомбінат (КНР)	Тонхуанський меткомбінат (КНР)	Корпор. CSC, сталезавод №2 (Тайвань)
1.	Маса чавуну в ковшах, т	$\frac{92-103}{97}$	$\frac{139-156}{140}$	$\frac{246-273}{233}$
2.	Питома витрата магнію, кг/т чавуну	$\frac{0,32-1,08}{0,53}$	$\frac{0,32-0,74}{0,55}$	$\frac{0,28-0,67}{0,42}$
3.	Тривалість вдування магнію ($\tau_{\text{прод}}$), хв.	$\frac{5,0-15,5}{7,1}$	$\frac{3,8-7,7}{5,5}$	$\frac{4,7-11,8}{7,7}$
4.	Вміст сірки в чавуні, %:			
	- початковий	$\frac{0,021-0,096}{0,041}$	$\frac{0,015-0,050}{0,030}$	$\frac{0,015-0,061}{0,029}$
	- кінцевий	$\frac{0,001-0,020}{0,005}$	$\frac{0,003-0,005}{0,002}$	$\frac{0,001-0,006}{0,0029}$
5.	Температура чавуну, °С			
	- початкова	$\frac{1223-1363}{1300}$	$\frac{1287-1386}{1335}$	$\frac{1263-1394}{1327}$
	- після вдування	$\frac{1197-1357}{1285}$	$\frac{1275-1374}{1326}$	$\frac{1257-1388}{1319}$
	- Δt (Різниця)	$\frac{0-30}{15}$	$\frac{2-17}{9}$	$\frac{4-31}{8}$
6.	Швидкість зниження температури чавуну при вдування зернистого магнію, °С/хв.	$\frac{0,1-2,0}{0,9}$	$\frac{0,1-0,9}{0,6}$	$\frac{0,1-0,9}{0,5}$

Продовження табл. 2

№ з/п	Показники	Баотоський меткомбінат (КНР)	Тонхуанський меткомбінат (КНР)	Корпор. CSC, сталевий завод №2 (Тайвань)
7.	Інтенсивність вдування магнію, кг/хв.	$\frac{3,5-9,0}{7,3}$	$\frac{10-20}{14,4}$	$\frac{16-16}{16}$
8.	Показник β (Виграга магнію на сірку відделену), кг/кг	$\frac{1,05-3,45}{1,64}$	$\frac{1,3-3,6}{2,2}$	$\frac{1,1-3,5}{1,8}$
9.	Ст. D, % (ступінь десульфурзації підсумкова)	$\frac{63-98}{86}$	$\frac{86-99}{93}$	$\frac{67-97}{90}$
10.	D (Питомий ступінь десульфурзації - Ст D на 0,1 кг/т магнію), %	$\frac{9-27}{17}$	$\frac{11,8-28,1}{17,6}$	$\frac{14,1-29,8}{22,5}$
11.	D _т = Ст. D \ t _{прод} (інтенсивність видалення сірки), %/хв.	-	$\frac{11,2-23,7}{14,9}$	-
12.	K _{Mg} ^S - ступінь засвоєння магія на сірку, %	$\frac{22,1-72}{50}$	$\frac{21-57}{39}$	$\frac{21,6-70,5}{47,4}$
13.	K _{Mg} ^{S+Mg} - ступінь засвоєння магнію на сірку відделену і магній залишковий в чавуні, %	$\frac{42-99}{75}$	$\frac{69-99}{80}$	$\frac{74-99}{92}$

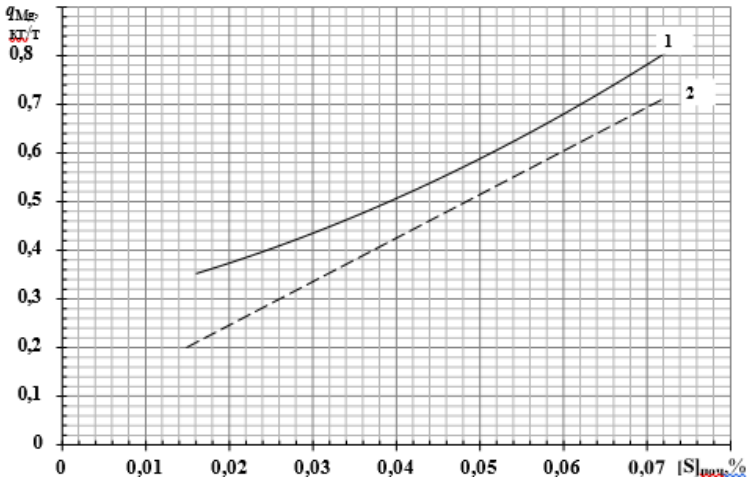


Рисунок 2-Питомі витрати магнію (q_{Mg}) залежно від початкового вмісту сірки ($[S]_{поч.}$) при зниженні вмісту сірки в чавуні до 0,005 %. Маса чавуну в ковшах – 220 – 260 т: 1 – моноінжекція магнію; 2 – коінжекція магнію в суміші з флюїдизованим вапном

Перелік посилань / References

1. Voronova, N. A. (1983). *Desulfurization of Hot Metal by Magnesium*. Iron & Steel Society
2. Robey, R., Whitehead, M. (2014). Out-of-blast processing of cast iron, taking into account specific production conditions. *MPT International*, 1, 16-24
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
4. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Pismarev, K. E., Akulov, V. V. & Dovgalyuk, G. Ya. (2010). Comparison of ladle technologies for hot-metal desulfurization. *Steel Transl.*, 40, 35–37. <https://doi.org/10.3103/S0967091210010092>
5. Shevchenko, A. F., Bashmakov, A. M., Vergun, A. S., Manachin, I. A., Kislyakov, V. G., Trotsenko, E. A., Yie, Liu Dong & Rui, Yang Jia (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. Shevchenko, A. F., Manachin, I. A., Shevchenko, A. M., Dvoskin, B. V., Vergun, A. S., Shevchenko, S. A., Rudenko, A. L., Bashmakov, A. M., & Kurilova, L. P. (2013). Technical and economic indices of different processes of external pig iron desulphurization comparative analysis. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 27, 97-110. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000839597>

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, A. F., 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*. Dnipro-VAL. ISBN 978-966-8704-75-8
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>
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
12. Schrama, F. N. H., Beunder, E. M., Van den Berg, B., Yang, Y., & Boom, R. (2017). Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 44(5), 333–343. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>
13. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgalyuk, G. Ya. & Vinnik, K. V. (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. & Belomerya, V. N. 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>

I. O. Manachyn^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

V. P. Petrusha¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-1031-3241

O. L. Rudenko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Research, ORCID 0000-0001-6068-9901

V. V. Chuhui¹, Leading Engineer

S. O. Pochytaiev¹, 1st Category Engineer

D. V. Yeskov², Ph. D. Student, ORCID 0009-0001-3286-9291

¹ *Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine*

² *Dnipro State Technical University*

* *Corresponding author: imanachyn@gmail.com*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF PIG IRON LADLE DESULFURIZATION PROCESSES USING GRANULAR MAGNESIUM

Abstract. Off-furnace desulfurization of hot metal has become a necessary and reliable link between blast furnace and steelmaking operations in the production of

high-quality metal products. The efficiency of sulfur removal from hot metal determines the overall quality of the desulfurization process, ensuring thorough and effective sulfur elimination from the melt. Magnesium, due to its unique interaction properties with molten iron, has become the most widely used reagent in off-furnace desulfurization practices. A comprehensive and well-rounded approach to evaluating and selecting the appropriate desulfurization technology is justified. The paper presents actual data on co-injection technologies using lime and magnesium (CaO + Mg), as well as mono-injection of granular magnesium based on a Ukrainian injection technology implemented at various metallurgical plants. It is shown that one of the key parameters is reagent consumption, which determines all major characteristics of the process. A comparative analysis of various technological indicators for different magnesium injection methods into molten iron has been conducted. The lowest specific reagent consumption is observed with mono-injection of magnesium, which results in the lowest costs during industrial implementation. Industrial data show that mono-injection of granular magnesium is characterized by: the lowest reagent consumption – on average 0.42–0.55 kg per ton of hot metal, the shortest desulfurization duration – on average 5.5–7.7 minutes, ultra-deep desulfurization levels – down to 0.0003–0.001% sulfur, desulfurization efficiency – up to 99%, high sulfur removal rate – averaging 12–14.4% per minute, high reagent utilization rate – averaging 75–92%. It is concluded that mono-injection of granular magnesium is the most promising and cost-effective off-furnace desulfurization process, outperforming other desulfurization technologies across multiple performance indicators.

Key words: ladle desulfurization of pig iron, powdered lime, granular magnesium, reagent consumption, desulfurization efficiency.

For citation: Manachyn, I. O., Petrusha, V. P., Rudenko, O. L., Chuhui, V. V., Pochytaiev, S.O. & Yeskov, D. V. (2026). Comparative analysis of the efficiency of pig iron ladle desulfurization processes using granular magnesium. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 364-374. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-023>

Рукопис надійшов до редакції / Received 18.01.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026