

## РОЗДІЛ «МЕТАЛУРГІЯ. ЗВАРЮВАННЯ»

УДК 669.162.463.2

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
НЕДБАЙЛО М.М., аспірант  
КРИВЦУН І.В., аспірант

Дніпродзержинський державний технічний університет

### НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ КІВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

**Вступ.** Забезпечення якості сталі та конкурентоспроможності металопродукції в умовах нестабільності складу та температури передільного чавуну, який поставляється у конвертерний цех, за відсутності засобів для попередньої ківшової десульфуратії чавуну є складним завданням. З метою забезпечення економічності при будівництві та експлуатації проектування, виконання та монтаж установки десульфуратії чавуну (УДЧ) для конвертерного цеху ПАТ «ДМК» здійснювалось з врахуванням особливостей існуючого обладнання та організації виробництва.

Основні особливості використання обладнання, проектування та розміщення УДЧ в умовах ПАТ «ДМК» наведено у роботі [1].

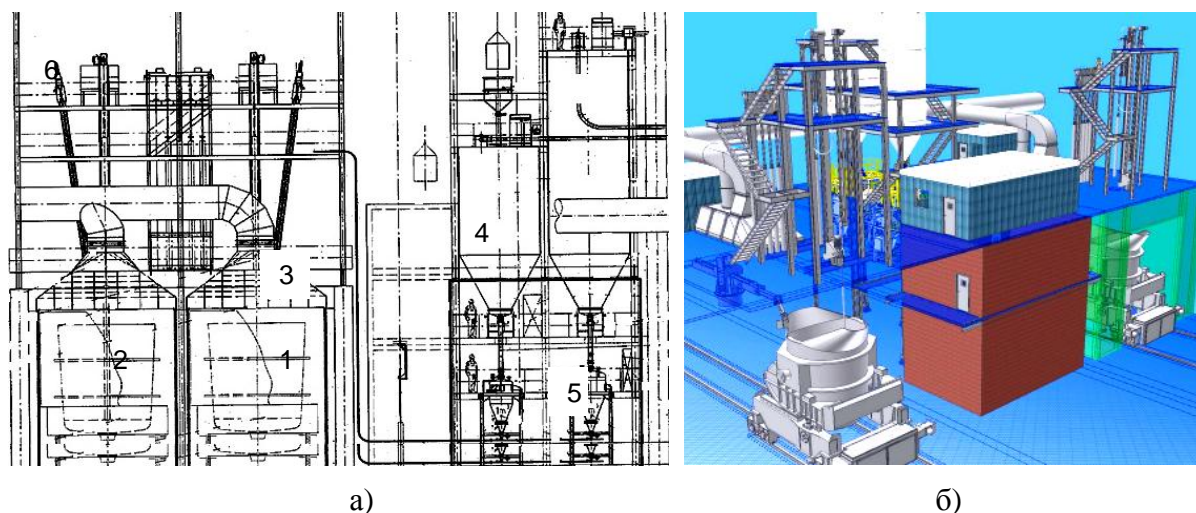
**Постановка задачі.** Показники роботи установки десульфуратії чавуну на етапі відпрацювання технології відрізняються від запланованих та представлених у роботі [1]. З метою забезпечення планових показників та підвищення ефективності роботи УДЧ необхідно визначити раціональні характеристики обробки чавуну (витрати та співвідношення реагентів та газу-носію у період коінжекції та моноінжекції вапна, глибини десульфуратії чавуну з врахуванням особливостей складу шихти конвертерної плавки тощо) та напрямки удосконалення технології в умовах ПАТ «ДМК».

**Результати роботи.** В умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» передільний чавун доставляється як з міксерного відділення, так і з доменного цеху без переливу на стенди установки десульфуратії [1]. Заливальні ковші місткістю 230 тон із передільним чавуном транспортуються із використанням двох паралельних чавуновозних шляхів по естакаді на рівні +10,50. Транспортні спарені візки-чавуновози проходять станції десульфуратії на своєму шляху до двох 260-т кисневих конвертерів.

Два стенди десульфуратії у вигляді мостових конструкцій зі стаціонарними витяжними ковпаками розташовуються у проході між колонами над чавуновозними шляхами (рис.1). Реагенти-десульфуратори (порошкоподібне флюїдизоване вапно і гранульований магній) пневматично розвантажуються з автомобільних цементовозів до відповідного силосу зберігання 4. Розвантажувальний кінець силосу обладнаний під фланцеве з'єднання для установки піддону псевдозрідження.

Для постачання реагентів на стенди десульфуратії встановлено два блоки інжекції 5, кожен з яких в свою чергу складається з двох пневмокамерних насосів-транспортів.

Необхідно відмітити, що система не призначена для забезпечення інжекції реагентів углиб розплаву на обох стендах десульфуратії одночасно. Також передбачено місце та можливість розширення силосної станції, за необхідністю, за рахунок установки третього силосу зберігання і двох додаткових пневмокамерних насосів для транспортування і вдування в заливальний ківш 1 третього реагенту (кондиціонеру шлаку). Згідно з попередніми умовами проектування передбачалося закрити бічні стіни стендів десульфуратії та створити пневмоуцільнення стисненим газом (шляхом подачі стисненого газу через кругову форсунку у витяжному ковпаку 3 (рис.1) стенду). У змонтованому варіанті УДЧ ізолювання робочого простору камери десульфуратії відсутнє.

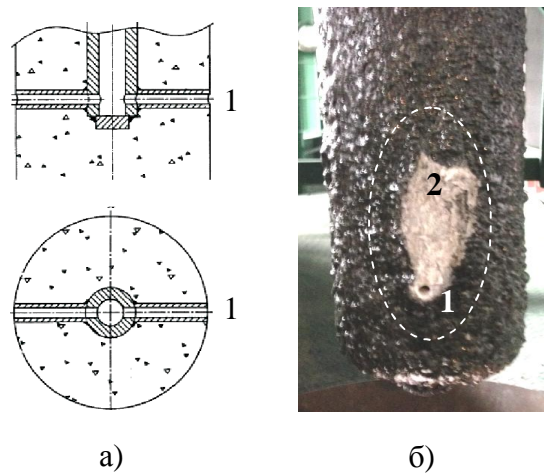


1 – заливальний ківш; 2 – заглибна фурма; 3 – витяжний ковпак;  
4 – силос; 5 – блок інжекції; 6 – фурма-зонд

Рисунок 1 – Розріз установки десульфурації переробного чавуну за коінжекційною технологією (а) та модель стенду десульфурації (б)

Для відбору проб і вимірювання температури рідкого чавуну до та після інжекції реагентів станції десульфурації обладнані індивідуальними механізмами підйому фурм-зондів 6 для вимірювання температури і відбору проб.

Установка десульфурації чавуну працює із використанням газоподібних азоту і аргону під тиском. Азот використовується в звичайному режимі, а аргон – в аварійному. Аргон призначений як для флюїдизації та інертизації силосів, так і для роботи клапанів. У разі перевищення норми вмісту кисню ( $O_2 > 1,5\%$ ) активується додаткова інертизація азотом через днище.



1 – сопло;  
2 – зона руйнування футерівки фурми  
Рисунок 2 – Схема наконечника (а) та характерний вигляд зони вимивання вогнетривкої футерівки заглибної фурми (б) по ходу експлуатації

Для інжекції реагентів через вогнетривку двосоплову фурму 2 (рис.1) із Т-подібним розподільником газопорошкового потоку (рис.2) в розплав чавуну у ковші обидві станції десульфурації обладнані індивідуальними механізмами підйому та опускання фурм.

Процес десульфурації чавуну розділений на три фази. У першій фазі вводиться вапно в режимі моноінжекції. У другій фазі (коінжекції) вапно і магній вдуваються одночасно. У третій фазі вапно знову вводиться в режимі моноінжекції. Кількість реагенту, що вводиться, так само, як і необхідна швидкість інжекції (у кг/хв.) обчислюється комп'ютером розрахунку металургійного процесу (МРС) компанії «ThyssenKrupp Polysius». Якщо використовується кондиціонер шлаку, необхідним є використання четвертої фази інжекції (моноінжекції кондиціонера шлаку).

При масі чавуну у ковші до 230 тон, вихідному вмісті сірки до 0,090%, кінцевому вмісті сірки у чавуні до 0,005% загальна планова тривалість циклу обробки не повин-

на перевищувати 25 хвилин (не враховується час, необхідний для обробки і транспортування у ковші). Фактична, визначена обробкою даних, тривалість циклу складається з наступних ланок, хв.:

- |  |               |
|--|---------------|
| 1. Вимірювання початкової температури розплаву   | – 1,0;        |
| 2. Відбирання проби чавуну (за необхідністю та відсутністю даних міксерного відділення або доменного цеху)         | – 2,0;        |
| 3. Вдування реагентів (три фази) у залежності від початкового вмісту сірки та заданої глибини десульфурації чавуну | – 7,0-14,0;   |
| 4. Підйом заглибної фурми та продування сопел  | – 1,5-2,0;    |
| 5. Вимірювання температури розплаву  | – 1,5-2,0;    |
| 6. Відбирання проби рафінованого чавуну  | – 2,0;        |
| Загальна тривалість обробки  | – 13,0* -23,0 |
- \* – без 2-ї ланки.

Після завершення обробки розплаву у ковші з метою попередження ресульфурації чавуну на шляху до конвертера ківш переміщується та встановлюється в позицію скачування шлаку. Скачування шлаку відбувається механічним шляхом з використанням гідравлічного привода з операторської кабіни, встановленої на машині скачування шлаку.

Згідно із опрацьованими даними (за результатами обробки понад 800 ковшів) значення практично усіх визначальних показників десульфурації змінюються у широкому діапазоні:

- питома витрата гранульованого магнею від 0,45 до 0,54 кг/т чавуну (при інтенсивності вдування 12-20 кг/хв.);
- питома витрата флюїдизованого вапна від 1,59 до 1,92 кг/т чавуну (при інтенсивності вдування 36-50 кг/хв. у період коінжекції та до 60 кг/хв. – у період моноінжекції);
- початкова температура чавуну у ковші від 1250 до 1340<sup>0</sup>С;
- зниження температури чавуну від 0,9 до 1,2<sup>0</sup>С/хв.;
- ступінь десульфурації від 50,0 до 82,0%;
- тривалість обробки розплаву (вдування реагентів) від 8,0 до 14,0 хв.

За результатами етапу відпрацювання технології десульфурації в умовах ПАТ «ДМК» визначено, що причинами закупорювання каналу сопел фурми (рис.2) можуть бути:

- перепади тиску газу-носія та перешкоди для рівномірного витоку газопорошкового струменя внаслідок турбулізації ванни в межах реакційної зони взаємодії струменя із розплавом;

- контактування рідкого чавуну та каналу сопла фурми при перепадах тиску газу-носія, що призводить до виникнення пульсацій та «зворотних» ударів, звуження перетину каналу та, як наслідок, до закупорювання каналу;

- відносно малий діаметр каналу сопла (12 мм), що обумовлює підвищений газодинамічний опір системи, на подолання якого потрібно забезпечити запас тиску у бункері. Це призводить до недостатньої жорсткості газопорошкового потоку на виході з сопла фурми. На недостатню «жорсткість» потоку вказує і характер руйнування футерівки фурми у зоні витоку газопорошкового потоку (рис.2, б).

Фактичний хімічний склад міксерного або доменного шлаку на поверхні ванни не завжди відповідає умовам фірми «ThyssenKrupp Polysius» (склад шлаку за вимогами: CaO 48%; SiO<sub>2</sub> 39%; MgO 5,9%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5,4%; MnO 0,2%; FeO 0,05%). Робота заглибної фурми в умовах значного коливання хімічного складу шлаку, який залишається на поверхні чавуну у ковші перед десульфурацією, (CaO 21,5-48,2%; SiO<sub>2</sub> 37,3-46,2%; MgO 4,1-6,9%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5,4-7,2%; MnO 1,2-2,2%; FeO 2,1-4,5%) призводить до скорочення терміну її експлуатації у 1,6-1,8 рази у порівнянні із запланованими показниками (планований термін служби фурм – приблизно 1500 хвилин інжекції).

В цілому, показники роботи УДЧ в період дослідно-промислового випробування відповідають показникам впроваджених на металургійних підприємствах технологічних варіантів ківшової десульфурації чавуну. Порівняння показників роботи УДЧ ПАТ «ДМК» на етапі відпрацювання технології із впровадженими на українських та закордонних меткомбінатах установками десульфурації [2-5] із використанням як сумішей на основі вапна та магнію (1-4), так і магнію без добавок (6-8) представлено у табл.1. В той же час у перспективі необхідно забезпечити досягнення найкращих показників (1, 3 табл.1) за умов досягнення (за необхідністю) кінцевого вмісту сірки менш ніж 0,005%.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика показників десульфурації передільного чавуну на УДЧ<sup>1)</sup> різних метпідприємств [2-5]

Параметр	Север-сталь (320 т)	НЛМК (130 т)	НЛМК (300 т)	АМК (300 т)	ДМК (200 т)	Азов-сталь (140 т)	Завод ім. Ілліча	Тангшанський МК (КНР) (155 т)
	1	2	3	4	5	6	7	8
Початковий вміст сірки у чавуні, %	0,040	0,020	0,040	0,062	0,058	0,024	0,022	0,041
Вміст сірки у чавуні після десульфурації, %	0,005	0,005	0,005	0,023	0,018	0,005	0,005	0,010
Кількість видаленої сірки, %	0,035	0,015	0,035	0,039	0,040	0,019	0,017	0,031
Ступінь десульфурації, %	87,5	75,0	87,5	62,9	68,9	79,1	77,3	75,6
Середні питомі витрати флюїдизованого вапна / магнію, кг/т	3,11 / 0,80	2,16 / 0,40	2,95 / 0,62	2,10 / 0,35	1,89 / 0,49	- / 0,76	- / 1,10	- / 0,36
Питомі витрати магнію на видалення сірки, кг/кг S	2,28	2,66	1,77	0,90*	1,22*	3,96	6,47	1,25*

\* – кінцевий вміст сірки у чавуні перевищує 0,005%;

<sup>1)</sup> 1-5 – вдування суміші реагентів (1 – вдування через дві фурми одночасно);

6-8 – вдування гранульованого магнію без добавок через прямоточні (6, 7) та двосоплову фурми (8);

6,7 – використання доменних ковшів.

На відміну від запланованих компанією-постачальником обладнання та технології показників досягнення вмісту сірки у чавуні після десульфурації ( $[S]_K$ ) у 0,005-0,010% в існуючих сировинних умовах на етапі відпрацювання технології вміст  $[S]_K$  знаходиться, в основному, у межах 0,012-0,028% (рис.3). Ефективність використання десульфураторів у таких умовах проаналізована у роботі [2], авторами якої показано, що вапно, яке вдувається разом із магнієм, майже не впливає на результати обробки. Таким чином, при необхідності глибокої десульфурації (до 0,005%  $[S]_K$ ) витрати вапна на моноінжекцію після фази коінжекції недоцільні.

Цей висновок підтверджений і для умов роботи УДЧ ПАТ «ДМК». Визначено, що в умовах перевищення питомих витрат флюїдизованого вапна відносно гранульованого магнію у суміші реагентів більш ніж у 3,6-4,5 рази виникає тенденція до зниження ступеня десульфурації (рис.4), що може бути пов'язано із зростанням в'язкості та зниженням рідкорухомості покривного шлаку. Таким чином, доцільність підвищення питомих витрат вапна більш ніж у 3,0-3,5 рази відносно витрат магнію є сумнівним.

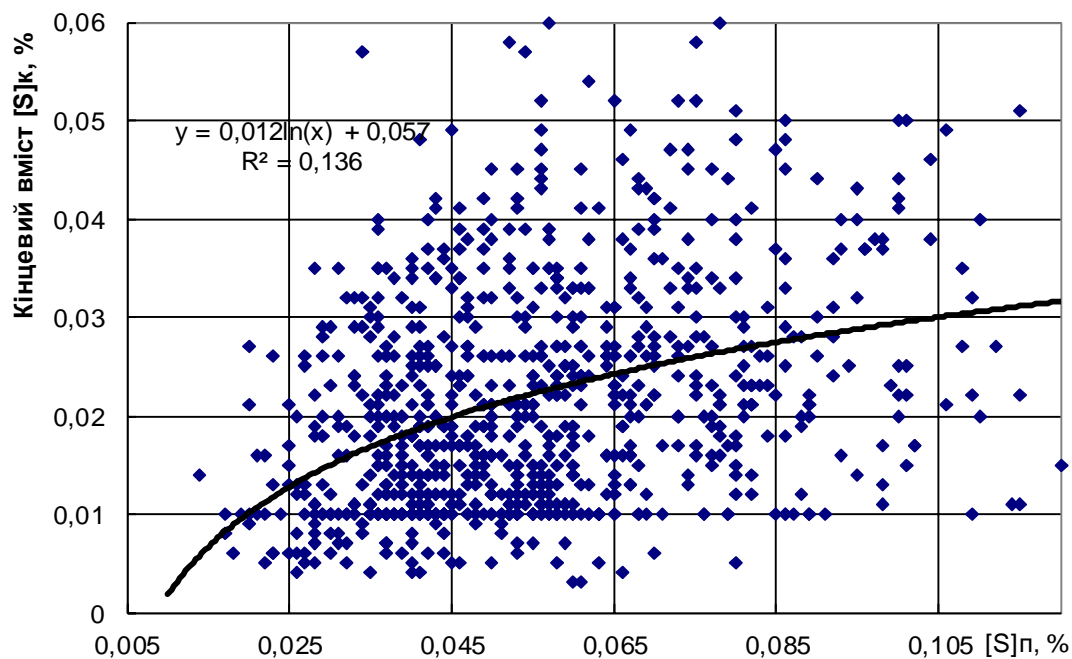


Рисунок 3 – Залежність між вмістом сірки у чавуні до десульфурації  $[S]_{п}$  та після обробки на УДЧ  $[S]_{к}$ , %

Обробкою даних рис.3 отримано модель залежності вмісту сірки після десульфурації на УДЧ від вихідного вмісту сірки у чавуні:  $[S]_{к} = 0,012 \ln [S]_{п} + 0,057$ .

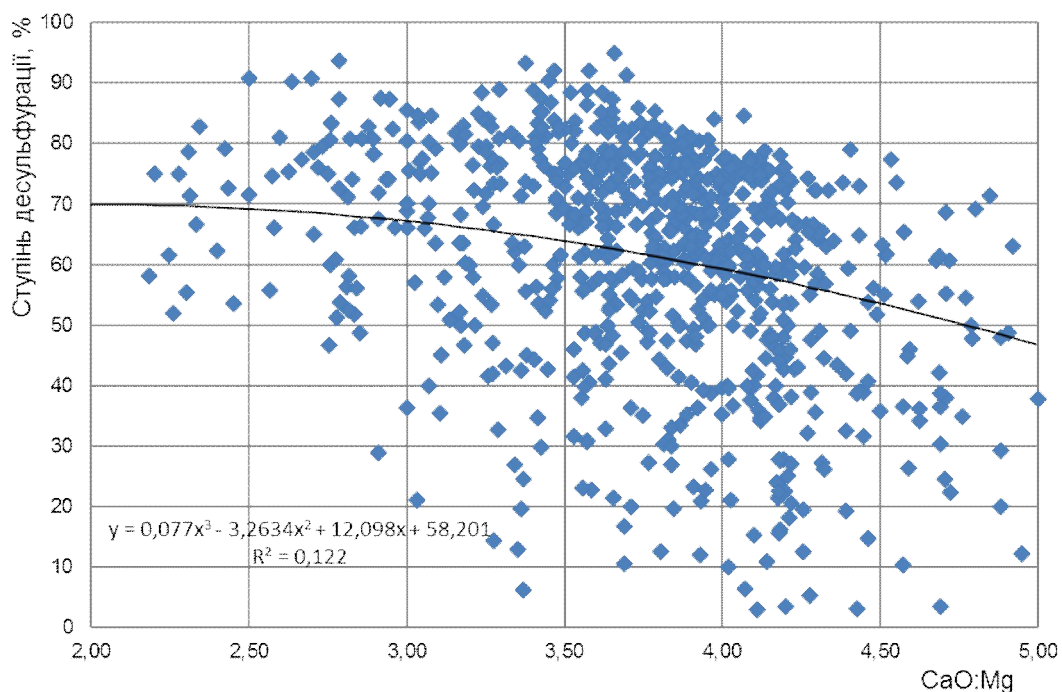


Рисунок 4 – Вплив співвідношення CaO : Mg у суміші реагентів на ступінь десульфурації чавуну

Модель залежності ступеня десульфурації від співвідношення питомих витрат вапна та магнію у суміші реагентів (z) має вигляд:



$$D = 0,077z^3 - 3,2634z^2 + 12,098z + 58,201.$$

Необхідно відмітити, що в існуючих умовах вимушеного використання у якості металевих добавок у конвертерну шихту (охолювачів), окрім лому (при його недостатній кількості або відсутності) агломерату, конвертерного шлаку та т.ін., вміст сірки у рідкому металі на випуску з конвертера перевищує вміст сірки у чавуні після десульфурації (ряд 3, рис.5), що зменшує ефективність використання УДЧ.

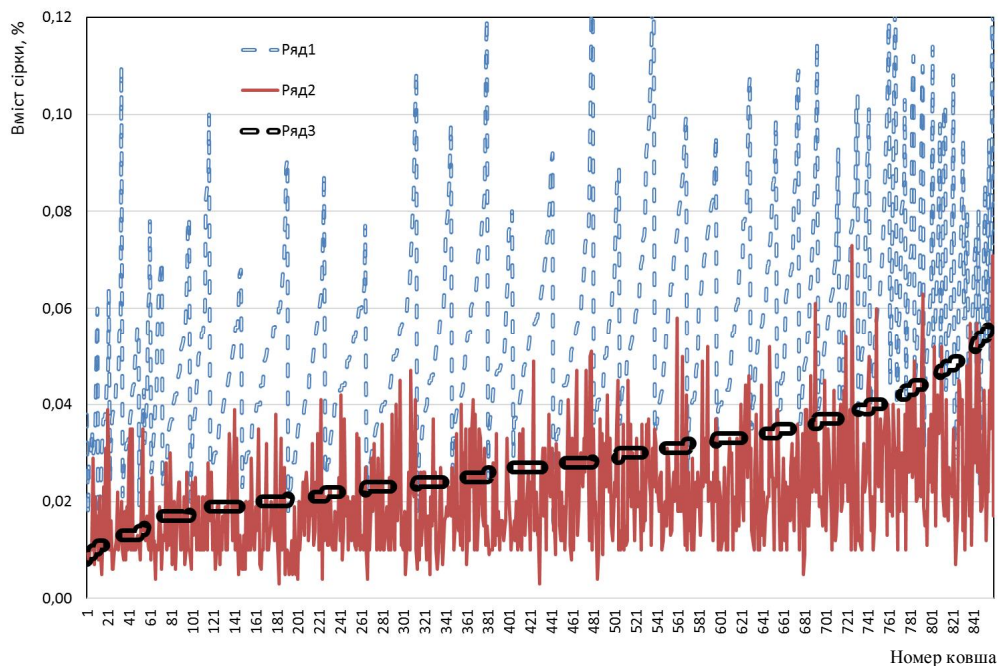


Рисунок 5 – Діапазон змін вмісту сірки у чавуні до обробки  $[S]_{\text{п}}$  (ряд 1), після десульфурації  $[S]_{\text{к}}$  (ряд 2) та залежність вмісту сірки у рідкому металі на випуску з конвертера (ряд 3) від  $[S]_{\text{к}}$

Ще одним з вузьких місць залишається тривалість та ступінь скачування шлаку з поверхні ванни після завершення обробки (тривалість скачування від 8 до 12 хв.).

Для усунення або зменшення впливу виявлених недоліків на показники роботи УДЧ та ефективність використання рафінованого по сірці чавуну у конвертерній плавці можуть бути рекомендовані наступні заходи.

По-перше, удосконалення конструкції наконечника заглибної фурми (рис.2) з метою підвищення кінетичної енергії струменя та зменшення впливу пульсацій у зоні контакту струменю із ванною.

Забезпечення сталої критичної швидкості потоку забезпечить зменшення впливу пульсацій при барботажі ванни, запобігання закупорюванню сопел фурми. Комплекс заходів з удосконалення конструкції наконечника може включати також пошук та обґрунтування способів «гарячої» заміни наконечника або відновлення зруйнованої частини футерівки заглибної фурми у процесі її експлуатації.

По-друге, з метою компенсації зниження температури при транспортуванні ковша до УДЧ, при проведенні десульфурації, під час скачування шлаку та транспортування розплаву до конвертера можливо використання наступних заходів:

- підвищення температури чавуну на випуску з доменної печі;
- збільшення вмісту кремнію в чавуні;
- скорочення теплового випромінювання під час транспортування ковша з доменного цеху та/або міксерного відділення шляхом «ізоляції» поверхні рідкого металу від атмосфери (шляхом нанесення на поверхню розплаву у ковші шару теплоізолюючої суміші);

- компенсація втрат температури при обробці металу на установці «під-ківш».

По-третє, в умовах утворення під час десульфурації значної кількості додаткового шлаку рекомендується обладнання заливального ковша пористими пробками у днищі. Продувка ванни азотом через пробки (із витратою 50-70 нм<sup>3</sup>/год) забезпечить підвищення швидкості видалення шлаку з поверхні ванни у шлакову чашу при скачуванні після оброки. При цьому скорочується тривалість операції та підвищується ступінь очищення поверхні чавуну від шлаку. З метою зменшення втрат чавуну із шлаком, що скачують з поверхні ванни після десульфурації, доцільно використання заходів щодо зменшення в'язкості та підвищення поверхневого натягу шлаку шляхом присадки або вдування сумішей реагентів з дешевих вторинних матеріалів. Необхідно відмітити, що доцільність повернення корольків чавуну з поверхневого шлаку, за умов вмісту у останньому 1,9-3,4% сірки, потребує обґрунтування та додаткових досліджень.

Доцільним також є дослідити можливість зменшення співвідношення СаО:Мg у суміші реагентів, яку вдувають у розплав у другій фазі, з (3,8-4,5):1 до (2,3-3,0):1 із одночасним виключенням вдування флюїдизованого вапна у третій фазі інжекції (у тому числі за умов необхідності досягнення <0,005% S) та впровадженням продувки ванни у вказаному періоді через сопла фурми або пористі пробки азотом. Це дозволить зменшити витрати на десульфурацію, кількість додатково утвореного шлаку та втрат чавуну із шлаком.

**Висновки.** Наведено результати відпрацювання технології на стендах установки десульфурації чавуну у 230-т заливальних ковшах в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК». Визначено особливості організації рафінування розплаву по сірці вдуванням суміші реагентів на основі флюїдизованого вапна та гранульованого магнію у сировинних умовах ПАТ «ДМК». Підтверджено, що при десульфурації чавуну до вмісту сірки 0,012-0,028% вдуванням суміші реагентів підвищені витрати вапна для збільшення ступеня десульфурації необґрунтовані, а вдування вапна у третій фазі інжекції є недоцільним. Запропоновано напрямки удосконалення обробки у сировинних умовах комбінату, способи зменшення витрат на десульфурацію та напрямки зниження втрат чавуну із шлаком, що скачують з поверхні розплаву.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бычков С.В. Внедоменная обработка чугуна для выплавки стали в ПАО «Днепропетровский меткомбинат» / С.В.Бычков, В.Ю.Довгач, А.Ф.Черный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – №1. – С.14-16.
2. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах / А.М.Зборщик, С.В.Куберский, Г.Я.Довгалоук [и др.] // *Сталь*. – 2011. – №9. – С.16-19.
3. Десульфурация чугуна в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Алчевский металлургический комбинат» / А.М.Зборщик, С.В.Куберский, Г.Я.Довгалоук [и др.] // *Металл и литее Украины*. – 2010. – №7. – С.9-12.
4. Перспективы десульфурации чугуна на ОАО «Северсталь» с использованием реагентов на основе магния / А.М.Ламухин, С.Д.Зинченко, В.Г.Ордини [и др.] // VII междунар. симпозиум по десульфурации чугуна и стали, 26-27 сентября 2002 г.: сб. науч. трудов. – Анин. Австрия, 2002. – С.32-33.
5. Техничко-економическое сопоставление процессов внепечной десульфурации чугуна по результатам их промышленного освоения / Шевченко А.Ф., Башмаков А.М., Маначин И.А. [и др.] // *Бюл. «Черная металлургия»*. – М.: Черметинформация. – 2013. – №10. – С.9-13.

Надійшла до редколегії 25.10.2016.