

Abstract. The paper describes the process flow diagram of the injection molding of bimetallic castings. It is shown that effective quality control of bimetallic castings «steel — aluminum» requires appropriate metrological support. The structural scheme of the automated process control system of injection molding of bimetallic castings was proposed. To measure the heating uniformity of the steel insert surface before aluminum casting and weldability completeness of these components, using images obtained with the thermal imager was proposed. Junction zone control was proposed to carry out using macrosection pictures in the junction zone.

As a result, metrological evaluation of the thermal image of composite casting was performed using the Hausdorff-Besicovitch dimension. This has allowed to reduce the diversity of the information contained in the source image to a single number. This number reflects the characteristic features of the structure and allows the use for process management decision-making. Decrease in the rejection rate of castings in the actual production was experimentally confirmed.

Keywords: ACS, metrological support, bimetallic castings, thermal image, macrosection picture, image convolution.

УДК 669.162

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40534

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ КІВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

Сігарьов Євген Миколайович, доктор технічних наук, доцент

Кафедра металургії чорних металів, Дніпродзержинський державний технічний університет,
пр. Пеліна, 16, м. Дніпродзержинськ, Україна, 51918

E-mail: en_sigarev@ua.fm

У роботі виконано аналіз та оцінку ресурсо- та енергоефективності технологічного маршруту «доменна піч — кисневий конвертер» із впровадженням комплексу нових способів інтенсивної десульфурзації передільного чавуну у заливальному ковші, технології конвертерної плавки із використанням десульфурованого чавуну та нанесення гарнісажу на футерівку конвертера. Очікуване скорочення енергетичних витрат у порівнянні зі штатними технологіями складає 0,973 ГДж/т сталі.

Ключові слова: чавун, ківшова десульфурация, обертова фурма, конвертер.

В работе выполнен анализ и оценка ресурсо- и энергоэффективности технологического маршрута «доменная печь — кислородный конвертер» с задействованием комплекса новых способов интенсивной десульфурации передельного чугуна в заливочном ковше, технологии конвертерной плавки с использованием десульфурованного чугуна и нанесения гарнисажа на футеровку конвертера. Ожидаемое сокращение энергетических затрат в сравнении со штатными технологиями составляет 0,973 ГДж/т стали.

Ключевые слова: чугун, ковшовая десульфурация, вращающаяся фурма, конвертер.

1. Вступ

У країнах ЄС та в Україні зберігається пріоритетна роль киснево-конвертерного способу виробництва металопродукції як впливової ланки технологічного маршруту «доменна піч — конвертер — МБЛЗ». Ресурсо- і енерговитрати на виплавку та попереднє ковшове рафінування передільного чавуну перед заливкою у конвертер визначають підсумкові показники ефективності виробництва металопродукції.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Технологічний маршрут конвертерного виробництва сталі, що на сьогодні використовується

в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» складається з наступних етапів. У доменних печах виплавляється передільний чавун із витратами коксу, у середньому на рівні 492,8 кг/т чавуну та виходом шлаку 445 кг/т із основністю 1,24. Передільний чавун із температурою не нижче 1320 °С та вмістом, %: 0,70–1,10 Si, 0,20–0,60 Mn, до 0,040 S та 0,15 P, зливається у міксер.

За потребою зниження вмісту сірки в чавуні менш ніж 0,020 % перед міксером використовують установку десульфурзації чавуну мартенівського цеху. У якості реагенту використовують зливки пасивованого магнію із вмістом активного магнію на рівні 86 % та ступенем використання 20–40 % при масі чавуну, що обробляється 60–110 т.

До конвертерного цеху, у складі 6-ти 160-т конвертерів із верхнім продуванням ванни, надходить передільний чавун із широким діапазоном коливань за складом ($Si = 0,76-1,15\%$; $Mn = 0,22-0,47\%$; $S = 0,022-0,029\%$; $P = 0,067-0,079\%$) та температурою ($1300-1346\text{ }^\circ\text{C}$), що не завжди відповідає межі ($1320\text{ }^\circ\text{C}$), що передбачена технологічною інструкцією ТІ-228-КК-07-2010. Окрім того, технологія виплавки сталі, що використовується у конвертерному цеху характеризується рядом недоліків:

➔ на відміну від сучасних технологій, з метою отримання якісного розплаву, у конвертері проводять плавку із намаганням максимально видалити [S] і [P] по ходу продувки. Переокислення металу та шлаку у результаті проведення додувок з метою підвищення температури металу до заданої ($75-85\%$ від усіх плавок) або зниження вмісту фосфору призводить до перевитрат феросплавів та зниженню виходу годного;

➔ з метою економії чавуну шихтовку ведуть із підвищеними витратами лому та скрапу ($23,0-24,5\%$ від маси металошихти). При цьому кількість плавок із температурою чавуну, що використовують, нижче межі у $1320\text{ }^\circ\text{C}$ досягає $45-50\%$ від загального;

➔ складнощі у забезпеченні потрібного рівня десульфурації, навіть за умов проведення проміжного скачування шлаку та перевитрати вапна ($65-73\text{ кг/т}$ сталі);

➔ робота із проміжним скачуванням шлаку (на $7-10$ хвил. продувки), присадженням доломіту та формуванням у процесі продувки шлаку із підвищеним вмістом оксиду магнію ($8-12\%$ MgO) супроводжується «згортанням» шлаку, погіршенням умов для видалення [S] та [P], підсиленням виносу металу із утворенням охолоді на стовбурі фурми, необхідністю видалення охолоді ($3-4$ операції у зміну) та, частіше за все, виведенням фурми з експлуатації.

3. Цілі і завдання дослідження

З урахуванням результатів попередніх досліджень автора [1-5] виплавку якісного залізобудівного напівпродукту у конвертері, в умовах ПАО «АрселорМіттал Кривий Ріг» пропонується здійснювати за новим технологічним маршрутом, що включає етапи:

➔ доменної плавки на шлаках зниженої до $1,10$ основності (CaO/SiO_2) із використанням безмарганцовистої залізомісткої шихти. У такому режимі роботи забезпечується виплавка чавуну зменшеної собівартості із концентраціями Mn $0,11-0,27\%$, Si $0,40-0,45\%$ та підвищеним вмістом сірки ($0,040-0,065\%$);

➔ попередньої десульфурації чавуну у заливальному ковші вдуванням диспергованого магнію через сопла обертової заглибної фурми [1, 2];

➔ переділу десульфурованого чавуну ($0,003-0,005\%$ S) у конвертерах із верхнім [3] або комбінованим продуванням ванни із використанням двоярусних кисневих фурми з частковим допалюванням газів, що відходять [4];

➔ нанесення, після випуску залізобудівного розплаву з конвертера, шлакового гарнісажу на футерівку шляхом роздування кінцевого конвертерного шлаку газопорошковими струменями, що переміщуються, сформованими за допомогою газоохолоджуваних гарнісажних фурм [5].

Впровадження запропонованого технологічного маршруту вимагає оцінки ресурсо- та енергоефективності переведення доменної плавки на роботу із шлаками зниженої основності, інтенсифікації ковшової десульфурації чавуну із використанням обертової фурми, конвертерної плавки та маршруту в цілому.

4. Результати досліджень ресурсо- та енергоефективності впровадження удосконаленого технологічного маршруту в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

У відповідності із результатами виконаних розрахунків при роботі доменної печі на шлаках зниженої основності забезпечується зменшення питомих витрат коксу на 17 кг/т , вапняку на 8 кг/т , виходу шлаку на 35 кг/т чавуну із підвищенням продуктивності печі на 4% . Собівартість чавуну зменшується на $0,75\%$, скорочення енерговитрат складає 390 МДж/т чавуну.

Відповідно із розробками інтенсивну ковшову десульфурацію передільного чавуну пропонується здійснювати на модернізованій установці десульфурації у заливальних ковшах [1, 2] вдуванням диспергованого магнію ($0,17-0,19\text{ кг/(т}\cdot\text{хвил.)}$) у потоці азоту ($0,015-0,018\text{ м}^3\text{(т}\cdot\text{хвил.)}$) через двосоплову фурму, що обертається навколо вісі із швидкістю $100-180\text{ об./хвил.}$ Для забезпечення сталих результатів десульфурації, виключення можливості ресульфурації та поліпшення умов видалення сірчистих шлаків, що утворюються по ходу обробки, передбачено коректування складу ковшових шлаків шляхом добавки фракціонованих матеріалів ($1,5-2,0\text{ кг/т}$ чавуну) на основі дешевих відходів вогнетривко-металургійних підприємств.

Очікуваним технічним результатом використання запропонованої конструкції установки [1] та технології інтенсивної десульфурації [2] є:

➔ забезпечення стійкого і рівномірного введення диспергованого магнію з інтенсивністю більш ніж 24 кг/хвил. за рахунок збільшення міжфазної поверхні контакту газо-магнієвих пузирів із розплавом;

➔ зменшення втрат магнію, що інжектуються у розплав, за рахунок покращення диспергування та розподілу пузирів, підвищення ступеня засвоєння

реагенту та попередження прориву газо-магнієвих потоків на поверхню ванни;

➔ забезпечення технологічних та безпечних умов обробки чавуну у ковші без викидів розплаву при висоті вільного простору над поверхнею ванни не більше ніж 300–350 мм;

➔ питома витрата магнію, у порівнянні із [6] зменшується на 0,08–0,15 кг/т чавуну, а тривалість безпосереднього вдування магнію — на 0,5–1,8 хвил. відповідно. Ступінь використання магнію на сірку підвищується на 10–19 %.

Порівняння розрахункових показників запропонованої технології [1] інтенсивної десульфурації чавуну із заглибною фурмою, що обертається, з показниками української технології «ІЧМ-Desmag» [6] приведене на **рис. 1**.

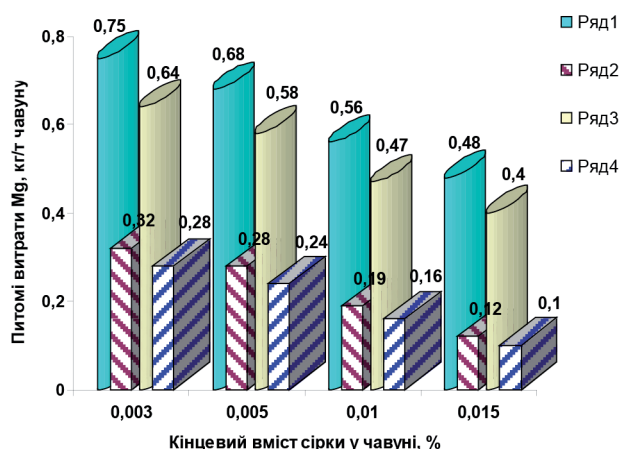


Рис. 1. Питомі витрати магнію у залежності від заданої глибини видалення сірки та способу введення реагенту (при $[S]_н = 0,065$ %): 1, 3 — спосіб «ІЧМ-Desmag» [6]; 2, 4 — обертова фурма [1] для $[S]_{поч.} = 0,065$ та 0,020 % відповідно

Для визначення необхідної для досягнення заданої глибини видалення сірки при використанні фурми, що обертається, тривалості вдування магнію, (τ) рекомендується використовувати емпіричні вирази:

➔ у межах $[S]_{поч.} = 0,020–0,025$ %

$$\tau = 2,29 \cdot e^{-0,18[S]_{нач}};$$

➔ у межах $[S]_{поч.} = 0,025–0,065$ %

$$\tau = 4,91 \cdot e^{-0,15[S]_{нач}}.$$

На наступному етапі, при використанні у конвертерній плавці десульфованого чавуну очікується скорочення витрат вапна на 8–16 кг/т сталі у порівнянні зі штатною технологією. Часткове допалювання газів (3–5 %), що відходять у струменях з сопел верхнього соплового блоку двоярусної кисневої фурми [4], здатне забезпечити підвищення витрат лому у шихту на 15,1 кг/т та відповідне зменшення витрат передельного чавуну на 16,2 кг/т сталі без погіршення теплового балансу плавки.

Наявні результати десульфурації чавуну у заливальних ковшах різної місткості вдуванням гранульованого магнію за технологією «ІЧМ-Desmag» (Україна) [6], вдуванням сумішей на основі порошкоподібного вапна із магнієм за технологією «Krupp Polysius» (Німеччина) [7] та шляхом присадження вапна у ківш із перемішуванням розплаву імперелером («KR-процес», Японія) [8] дозволили виконати порівняльну оцінку ресурсо- та енергоефективності технології десульфурації із використанням обертової фурми [1, 2] (**табл. 1, 2**).

Таблиця 1

Техніко-економічні показники десульфурації чавуну у заливальному ковші

Показники	Обробка 130 т передельного чавуну		
	Вдування суміші CaO та Mg [7]	KR-процес [8]	Вдування Mg (обертова фурма) [1]
Витрата реагентів, кг/т чавуну:			
– вапно	2,82	8,40	–
– плавиковий шпат	–	1,10	–
– магній	0,69	–	0,50
– усього реагентів	3,51	9,50	0,50
Вміст [S] (до/після обробки), %:	0,045/0,005	0,045/0,005	0,045/0,005
Кількість утвореного у ковші шлаку, кг/т чавуну	7,80	18,0	1,20
Втрати чавуну із утвореним шлаком, кг/т чавуну	3,96	10,85	1,84
Зниження температури чавуну, °C	10	42	4
Витрати, €/т чавуну:			
а) на реагенти	2,84	1,93	1,22
б) на втрати чавуну зі шлаком та утилізацію шлаку	1,64	3,46	0,34
в) на втрати температури чавуну	1,63	0,68	0,07
г) на фурму (імперелер)	1,51	(0,065)	0,14
Сумарні витрати на обробку (по п.п. «а-г»), €/т чавуну	4,79	6,13	1,76

Таблица 2

Енерговитрати (E) на десульфурацію чавуну у заливальному ковші

Показник	Обробка 130 т передільного чавуну					
	Вдування суміші CaO та Mg [7]		KR-процес [8]		Вдування Mg (обертова фурма) [1]	
	од./т	E, МДж/т	од./т	E, МДж/т	од./т	Э, МДж/т
Витрата реагентів, кг/т чавуну, у т. ч.:						
– вапно	2,82	23,38	8,40	69,64	–	0
– плавиковий шпат	–	0	1,10	1,10	–	0
– магній	0,69	129,87	–	0	0,50	87,75
Вміст [S] (до/після обробки), %:	0,045/ 0,005	–	0,045/ 0,005	–	0,045/ 0,005	–
Витрати газу-носію, м ³ /т чавуну	0,45	1,50	0	0	0,12	0,40
Витрати електроенергії, кВт/г·т	1,33	0,12	0,72	0,08	0,46	0,05
ΔT _{чав.} , °C	10	14,0	42	58,80	4	5,60
Витрати футерівки фурми (імпелеру), кг/т чавуну	1,51	24,92	(0,65)	10,73	1,40	23,10
Загальні енерговитрати, МДж/т	185,01		140,35		116,90	

У відповідності із розрахунками, у варіанті підвищення інтенсивності обробки чавуну шляхом використання обертової фурми, за найменших витрат на десульфурацію (1,76 €/т чавуну), скороченні витрат чавуну із шлаком, що скачують після проведення операції, мінімальних втратах тепла розплаву та тривалості обробки, енерговитрати на десульфурацію чавуну для забезпечення вмісту до 0,005 % S на 67,99 МДж/т чавуну менш ніж витрати за технологією «Krupp Polysius» (Німеччина) та на 23,45 МДж/т за технологією «KR-процес» (Японія) (табл. 2).

Для подальшого підвищення стійкості футеровки конвертерів, після продувки розплаву та випуску залізобуглецевого напівпродукту у сталерозливальний ківш, проводиться нанесення шлакового гарнісажу на футеровку шляхом роздування кінцевого конвертерного шлаку (із вмістом 4–5 % MgO) газопорошковими струменями, що несуть дешеві магнезійномісткі матеріали (необпалений доломіт, тощо) та переміщуються у просторі. Використання гарнісажної фурми, що обертається навколо вісі [5] забезпечує утворення рівномірного гарнісажного покриття на поверхні футерівки, а коригування вмісту MgO (з доведенням до 9–11 % MgO) у шлаковій ванні по ходу роздування – підвищення стійкості гарнісажу.

Порівняння матеріально-енергетичних балансів за умов використання штатної та запропонованої технології конвертерної плавки наведено у табл. 3.

Сумарне зменшення енерговитрат на виробництво якісного залізобуглецевого напівпродукту за умов використання пропозицій складає 461,0 МДж/т металу. У випадку використання технології нанесення шлакового гарнісажу роздуванням шлаку газопорошковими струменями зменшення енерговитрат на 239,11 МДж/т забезпечується за рахунок: використання менш енергоємних

магнезійних добавок, виключенням витрат води на охолодження гарнісажної газоохолоджуваної фурми [5], зменшенням необхідної тривалості операції.

Таблица 3

Матеріально-енергетичний баланс виплавки сталі у конвертері за штатною (ШТ) та запропонованою (ПТ) технологіями

Стаття витрат	Питома витрати, од./т		Δ пит. витрати, од./т	Δ пит. енерговитрати, МДж/т
	ШТ	ПТ		
Чавуну, кг/т	852,50	836,30	–16,20	+400,10
Лом та скрап, кг/т	260,0	285,10	+15,10	–107,20
Вугілля (АС), кг/т	1,91	1,07	–0,84	–26,04
Вапно, кг/т	65,10	52,60	–12,50	+67,50
MgO флюс, кг/т	2,75	0	–2,75	+7,84
Розкислювачі, кг/т	8,83	8,10	–0,73	+40,15
Кисень, м ³ /т	46,10	44,10	–2,0	+13,60
Δ ступеня допалювання {CO}	0	5,0	+5,0	+35,60
T _{чав.} , °C	1328	1320	–8,0	–11,20
Вогнетривкі матеріали, кг/т	2,62	1,14	–1,48	+24,42
τ продування, хвил.	18-30	18-00	–0,5	+1,43
Вихід шлаку, кг/т	100,0	81,25	–18,75	+21,38
Вміст (FeO) _к , %	20,0	18,0	–2,0	–6,76
Загальний енерго-ефект, МДж/т	+461,0			

5. Висновки

Впровадження запропонованої технологічної маршруту в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий

Ріг» є доцільним. Згідно із розрахунками очікуване сумарне скорочення енергетичних витрат на виплавку чавуну в доменній печі на шлаках зниженої основності, інтенсивну ківшову десульфура-

цію чавуну, отримання якісного залізовуглецевого напівпродукту в конвертері та ошлакування футеровки агрегату із використанням запропонованих технологій та пристроїв складає 0,973 ГДж/т сталі.

Література

1. Патент України на винахід № 104946. Спосіб десульфурації чавуну диспергованим магнієм у заливальному ковші та пристрій для його здійснення [Текст] / Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Чубіна О. А., Зарандія С. О. — Опубл. 25.03.2014 р. — Бюл. № 6, 2014 р. — Режим доступа: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=198268&chapter=biblio>
2. Sigarev, E. N. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating [Text] / E. N. Sigarev, A. G. Chernyatevich, K. I. Chubin et. al. // *Steel in Translation*. — 2011. — Issue 6. — P. 487–491. doi:10.3103/S0967091211060155.
3. Чернятевич, И. В. Современное состояние и направления совершенствования конструкций кислородных фурм для продувки конвертерной ванны [Текст] / И. В. Чернятевич, Е. Н. Сигарев, А. Г. Чернятевич // ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». — 2008. — № 12. — С. 23–27.
4. Величко, А. Г. Перспективные направления в применении двухъярусных кислородных фурм [Текст] / А. Г. Величко, А. Г. Чернятевич, Е. Н. Сигарев и др. // ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». — 2012. — № 10. — С. 17–21. — Режим доступа: http://www.chermetinfo.com/archives/archives.php?mode=issue_content&issue_id=964
5. Chernyatevich, A. G. Application of slag coating to the converter lining by means of moving gas-powder jets [Text] / A. G. Chernyatevich, E. N. Sigarev, E. V. Protopopov et. al. // *Steel in Translation*. — 2011. — Vol. 41, Issue 2. — P. 94–98. doi: 10.3103/S0967091211020070.
6. Большаков, В. И. Создание и промышленное применение современных аппаратно-технологических комплексов десульфурации чугуна на металлургических комбинатах Китая [Текст] / В. И. Большаков, А. Ф. Шевченко, В. А. Александров и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2004. — № 4. — С. 6–11.
7. Зборщик, А. М. Десульфурация чугуна в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Алчевский металлургический комбинат» [Текст] / А. М. Зборщик, С. В. Куберский, Г. Я. Довгалоук и др. // *Металл и литье Украины*. — 2010. — № 7. — С. 9–12.
8. Gardsdon, B. Hot metal desulphurization: benefits of magnesium lime co-injection [Text] / B. Gardsdon, X. Han. — *Millenium Steel*, 2010. — P. 31–36.

Abstract. The evaluation results of resource- and energy-saving efficiency of improved technological route «blast furnace — oxygen steel-making converter» for the conditions of PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih» with the application of innovative technologies and devices for the pig iron desulphurization intensification in the ladle, converter melting using dual-flow oxygen lance, slag scull application on the converter lining were presented.

The proposed method for sulfur removal from the pig iron before casting to converter provides secure insertion of dispersed magnesium deep into the melt with an intensity of more than 24 kg/min by increasing the interfacial contact surface of gas-magnesium bubbles with the melt at the movement of the lance nozzles, reduction of the specific reactant consumption and treatment duration by 20–25 %, and increase in the degree of magnesium recovery to sulfur by 15–19 % in comparison with the stationary lance. Using the proposed dual-flow lance design in converter melting improves the thermal balance and prevents process equipment metallization without reducing the unit lining resistance. Blowing of the final slag on the lining by moving gaspowder jets provides the regulation of physicochemical properties of the slag bath and formation of a skull protective layer of increased resistance.

Expected cumulative reduction of energy costs in comparison with the standard technologies is 0,973 GJ/t of steel.

Keywords: cast iron, ladle desulfurization, rotating lance, converter.