

Григор'єв Станіслав Михайлович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3875-8880

Міщенко Андрій Григорович, аспірант, Запорізький національний університет

Яковлєв Дмитро Володимирович, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0002-0406-9868

Скачков Родіон Олексійович, магістрант, Національний університет «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИРОБНИЦТВА І ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛІЗОВАНОГО МОЛІБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТУ

В роботі проведено дослідження техніко-економічних показників активного промислового експерименту виплавки і використання металізованого молібденового концентрату (губчастого феромолібдену). У вітчизняній практиці отримала розвиток і довгий час експлуатувалась технологія виробництва нового легувального матеріалу на основі молібдену в шахтних електропечах і оптимізувалась. Розроблена математична модель техніко-економічних показників з урахуванням найбільшої кількості технологічних факторів. Результатом математичного моделювання є багатофункціональна система показників. Встановлені і оптимізовані межі виробничих показників та видаткових коефіцієнтів шихтових матеріалів, що дало можливість стабілізувати якість цільового продукту.

У виконаній оцінці наскрізної економічної ефективності при отриманні нового легувального матеріалу присутнє зниження собівартості технології виробництва і зниження видаткових коефіцієнтів. У методиці оцінки використовували не тільки загальні рекомендації співвідношення, а і оригінальні фактори, які набули розвиток в дійсній роботі. У розрахунках оцінки ефективності використовувалась удосконалена методика з конкретизацією відповідних коефіцієнтів і цін на такі матеріали як стандартний феромолібден ФМо52...ФМо60, молібденовий концентрат марок КМо1...КМо3, ФМоГ1...ФМоГ3 та сталі Р6М5.

Новий легувальний матеріал на основі молібдену ФМоГ відрізняється від традиційних феросплавів виплавлених рудно- або металотермічним способом вигідними техніко-економічними показниками: в 7-8 разів більшою швидкістю засвоєння молібдену розплавом сталі, зниженням окислювального потенціалу під час легування – засвоєння хрома, молібдену та ванадію підвищується на 4-10%.

На прикладі виробництва і використання губчастого феромолібдену для легування сталі виконана оцінка економічної ефективності, яка підтверджує доцільність і перспективність використання в металургії легувальних матеріалів на основі важкоплавких елементів.

Ключові слова: молібден, концентрат, феросплави, економічні показники, легувальний елемент, сталь.

Вступ. Серед чисельних проблем, які вирішуються за допомогою порошкової металургії, у цій роботі запропоновані два напрями, які отримали розвиток в наукових працях авторів і доведені до впровадження в промислове виробництво і довгострокової експлуатації. Одним з таких напрямів в роботі розглядаються результати розробки наукових і прикладних рішень отримання легувальних матеріалів і лігатур на основі важкоплавких і рідкісних елементів у гетерогенних системах і системах рідкофазних реакцій, альтернативних виробництву феросплавів і металевих елементів, які використовують в металургії спеціальних сталей. В якості вихідних матеріалів можуть

використовуватись руди, рудні концентрати і техногенні відходи металургійних і обробляючих переділів виробництва металопродукції. Розроблені технології відрізняються безвідходністю, гнучкістю, не складним апаратурним оснащенням, високою ефективністю виробництва і їх використанням. В цьому напрямку запропоновані наукові і практичні рішення дійсних досліджень.

Практичний промисловий інтерес представляють розроблені технології виробництва металургійних і карбідізованих легувальних матеріалів на основі молібдену, вольфраму, хрому, ванадію, кобальту та інших, які впроваджені і вироблялись у великих обсягах з високою економічною ефективністю.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження оптимальних техніко-економічних показників, проведення аналізу та розрахунків економічної ефективності виробництва з використанням нового легувального матеріалу при виплавці швидкорізної сталі.

Аналіз джерел інформації. В собівартості виробництва спеціальних сталей легувальних рідкісними та важкоплавкими елементами доля витрат на феросплави та металеві матеріали складає 40-50 %.

Найбільш розповсюдженим серед таких класів є інструментальні леговані і швидкорізальні сталі, отримані відкритою виправкою і методом порошкової металургії. Зрозуміло, що ресурсо- та енергозбереження виробництва та використання цих видів металопродукції є одним з джерел розвитку перспективних напрямків у металургії.

Високі темпи зростання виробництва спеціальних легованих сталей можуть бути забезпечені за умови одночасного підвищення виробництва необхідних легувальних матеріалів і підвищення їх якості. При цьому, для радикальної зміни структури на користь спеціальних сталей випереджаючими темпами повинно здійснюватися нарощування обсягів виробництва легувальних матеріалів [1].

Вирішити поставлені задачі можливо тільки шляхом розробки та впровадження прогресивних технологій отримання легувальних матеріалів з особливими заданими споживчими властивостями, які задовольняють вимогам сталеплавильного виробництва [2].

Перспективні закордонні і відчинянні розробки свідчать про те, що перевага відається процесам отримання металізованих концентратів та губчастих феросплавів на основі важкотопких елементів у вигляді брикетів. В цьому сенсі порошкова металургія володіє великими потенціальними можливостями для утворення економічних і високоякісних матеріалів, її процеси, як правило, відбуваються при температурах на 20-80 % нижче температури плавлення, тим самим забезпечується можливість економії енергоресурсів [2]. В плануванні майбутніх виробництв, які спеціалізуються на виробництві легувальних матеріалів і виплавці сталей з їх використанням, ці фактори є вирішальними [3].

В найближчі 10-15 років найбільш перспективною є стратегія інвестування будівництва нових і реконструкція діючих виробничих потужностей, які спеціалізуються на виробництві важкоплавких легувальних матеріалів, освоєння виробництва достатньо випробувальних продуктів металізації рудної сировини. В залежності від складу вихідної сировини, її якості, технічних можливостей, переробки і призначення, а також сфер використання продуктів металізації можливі різні варіанти апаратурно-технічного оснащення виробництва і якості цільових продуктів металізації. Важливою умовою перспективності даного напрямку в металургії важкотопких легувальних матеріалів є достатньо висока економічна ефективність виробництва нових видів продукції із заданими властивостями і використання в сталеплавильному процесі, в порівнянні з традиційними рудно-металургійними методами виробництва феросплавів і рідкісних металів

Підтвердженням цього підходу у вирішенні стратегічних проблем ресурсозбереження може служити досвід технології виробництва металізованого молібденового концентрату (губчастого феромолібдену). Висока питома економічна ефективність використання губчастого феромолібдену і її довгострокового вдосконалення технології на обладнанні основного цеху підприємства металургії підтверджують доцільність вибраного напрямку.

Результати проведених досліджень. В процесі металізації молібденових матеріалів, які складаються із триоксиду молібдену і залізної окалини, склад шихт і цільового

продукту визначається співвідношенням основних компонентів, який дозволяє отримати продукти з масовою долею молібдену від 5 до 70%. Вихідні компоненти шихти подрібнюють, брикетують і відновлюють конвертованим природним газом. Отриману губку піддають розмолу і повторному брикетуванню для підвищення щільності металізованих матеріалів до 4,5 – 6,1 г на см³. До числа недоліків такого складу шихти (8-85% – MoO₃, решта – це залізо) необхідно віднести низьку швидкість металізації триоксиду молібдену газовою сумішшю в порівнянні з комбінованим відновленням твердим вуглецем і конвертованим природним газом.

У вітчизняній практиці отримала розвиток і довгий час використовувалась технологія виробництва металізованого молібденового концентрату в шахтних електропечах із брикетованої шихти [1, 2], параметри якої вдосконалювались і оптимізувались [2, 4 – 11].

Шихта для виробництва нового легувального матеріалу на основі молібдену, яка вміщує молібденовий концентрат, вуглецевий відновник і металевий порошок, додатково включає зволожувач, а в якості молібденового концентрату гідрометалургійний – і/або уротропіновий концентрат. Склад концентрату, % мас: 52-58 Mo; 0,01-0,02 P; 0,01-0,02 Cu; 0,01-0,08 Sb; 0,03-0,07 As; 0,03-0,07 Zn; 0,08-1,0 SiO₂; 0,01-0,03 Bi; 2,0-5,0 H₂O.

Зволожувач додають в шихту разом з гідрометалургійним концентратом, вологість якого складає 0,5-1,5% по рівням поставки. Інша частка зволожувача додається у вигляді парів води при 393-413K під тиском 200-400 кПа під час перемішування шихти в змішувачі з паровим обігрівом. Додавання зволожувача до складу шихти дозволяє практично виключити механічні втрати компонентів і що головне, зробити його реагентом комбінованого відновлення оксидів молібдену в пічних агрегатах. Взаємодія зволожувача проявляється через пароокислювальний механізм і має каталізаційну природу, прискорює процес відновлення оксидів молібдену і забезпечує підвищення продуктивності пічних агрегатів.

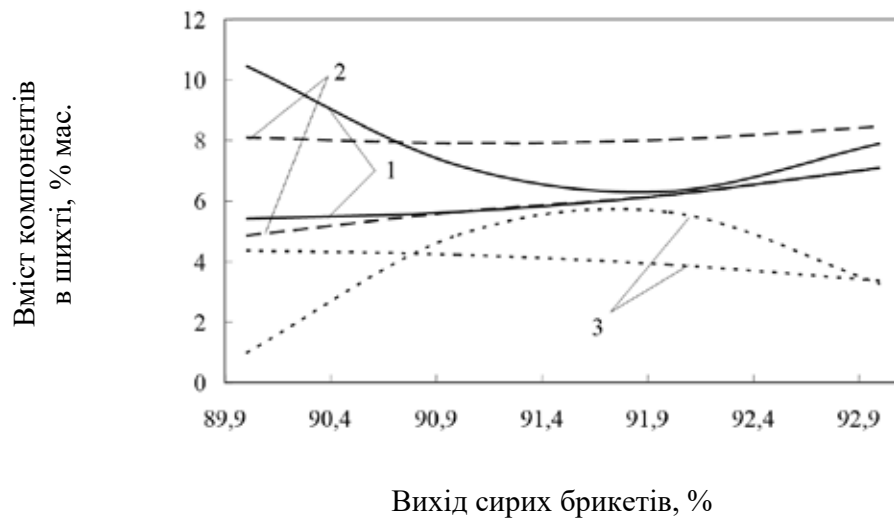
В промислових умовах був проведений експеримент зі зміною складу шихти і технологічних параметрів в широких межах для встановлення найбільш значимих закономірностей. Виконаний аналіз, а потім відібрані, оптимізовані і виділені в систему параметри, які визначають техніко-економічні показники технологічного процесу і склад цільового продукту. Виділена система кількісних показників (y_i , x_j) при $i=1...5$, $j=1...4$, де y_{i1} , y_{i2} , y_{i3} , y_{i4} , y_{i5} – масова доля в шихті, % молібденового концентрату, кам'яновуглецевого сполучного, вуглецевовмісткого відновника, металевого порошку, зволожувача відповідно, x_1 – вихід сирих брикетів, %; x_2 – ступінь відновлення, %; x_3 – продуктивність процесу, кг/год.; x_4 – щільність металізованих брикетів, г/см³.

Розрахунки виконані з точністю до 0,01%, що повністю задовольняє вимогам точності і техніко-економічних показників в промислових умовах.

На основі результатів аналізу попередніх робіт по удосконаленню технологічних параметрів виробництва губчастого феромолібдену [2, 10, 12] розроблені і визначені умови зміни інгредієнтів у складі шихти і виділені ті, які найбільш суттєво впливають на показники, що стосуються цільової задачі дійсних досліджень. Враховуючи це, в першій серії активного експерименту масові долі молібденового концентрату і металевого порошку у всіх випадках були однакові – 46,5% і 33,5% відповідно. Основні показники отриманого металізованого молібденового концентрату наведені на рисунках 1-4 і в таблицях 1-4.

На малюнках вміст кам'яновугільного сполучного, вуглецевмісного відновника і зволожувача представлені парами кривих, таким чином верхніми і нижніми межами, а крайні між ними відображають оптимальні значення показників. По технічній суттєвості і результату, що досягається вони найбільш переважні [2].

Встановлено рафінуючи дію конвертованого природного газу в процесі комбінованого відновлення обпаленого молібденового концентрату на концентрацію супутніх домішок сірки та фосфору. З метою покращення якості виробляемого губчастого феромолібдену випробувані і впровадженні технологічні показники відновлення молібденовмісної сировини, які забезпечили зниження вмісту сірки та фосфору в 4-6 разів кожного. Швидкість десульфурзації відновлювальних брикетів залежить від швидкості їх нагріву та швидкості руху газу в печі.

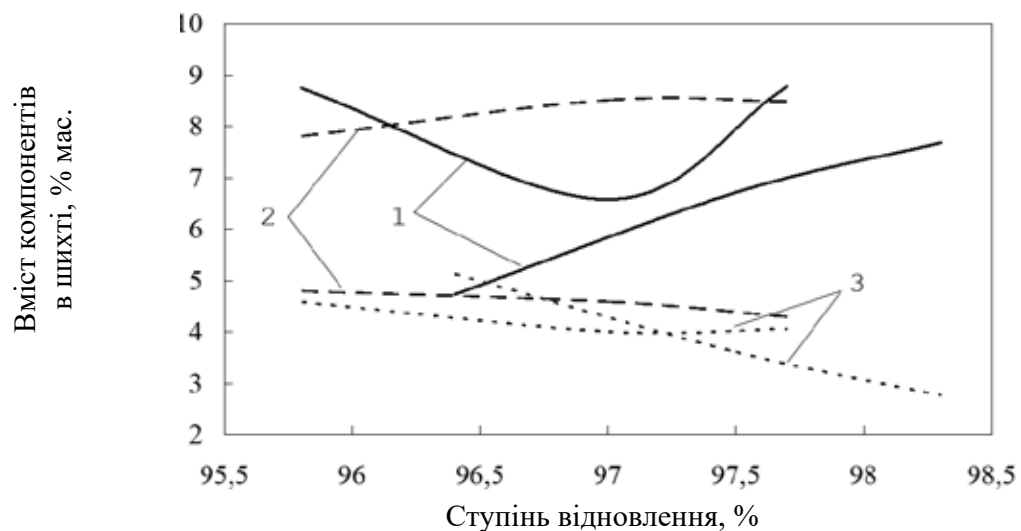


1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1].

Рисунок 1 – Вплив вмісту компонентів на вихід сирих брикетів

Таблиця 1 – Коефіцієнти функціональних закономірностей між показниками технологічного процесу

y_i	x_j	Інтервал		$a_{\bar{j}}^{(k)}$	$b_{\bar{j}}^{(k)}$	$c_{\bar{j}}^{(k)}$
		$m_{\bar{j}1}^{(k)}$	$m_{\bar{j}2}^{(k)}$			
y_2	x_1	90	93	1,2157	-223,33	10263
		90	93	0,1667	-29,944	1350,1
y_3		90	93	0,1556	-28,354	1299,6
		90	93	0,0056	-1,1796	65,663
y_5		90	93	-1,5652	287,19	-13168
		90	93	-0,1	17,967	-802,67

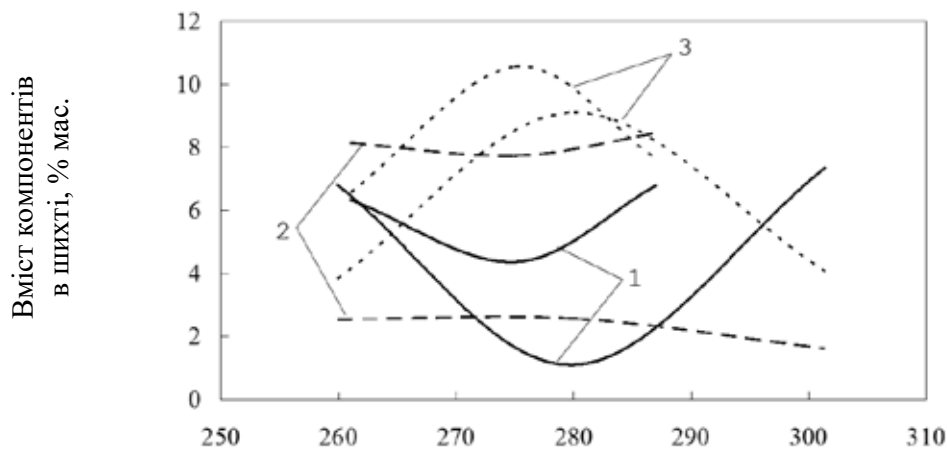


1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1].

Рисунок 2 – Вплив складу компонентів шихти на ступінь відновлення

Таблиця 2 – Коефіцієнт функціональних залежностей між показниками технологічного процесу відповідно рисунку 2.

y_i	x_j	Інтервал		$a_j^{(k)}$	$b_j^{(k)}$	$c_j^{(k)}$
		$m_{j1}^{(k)}$	$m_{j2}^{(k)}$			
y_2	x_2	95,8	97,7	2,6063	-504,3	24401
		96,4	98,3	-0,3148	62,847	-3128,3
y_3		95,8	97,7	-0,3313	64,462	-3127,1
		96,4	98,3	-0,0993	19,072	-910,96
y_5		95,8	97,7	0,2977	-57,881	2817,4
		96,4	98,3	0,1722	-34,772	1756,9



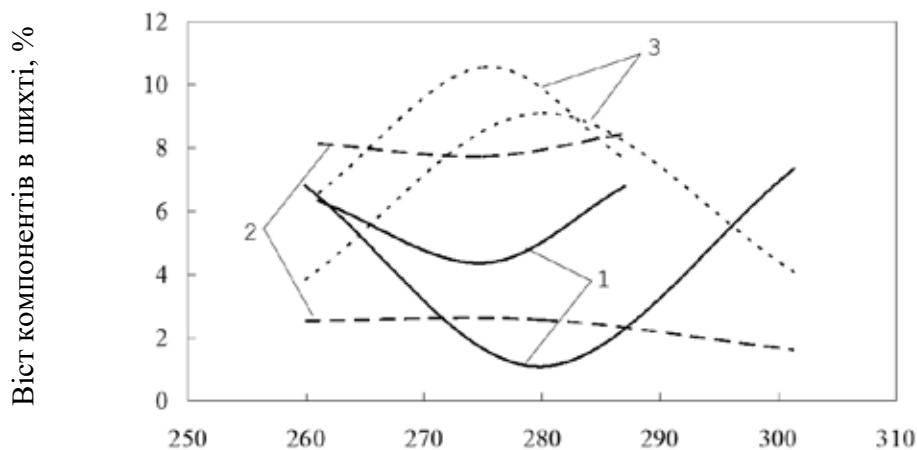
Продуктивність процесу, кг/год.

1 - кам'яновугільний пек; 2 - вуглецьвмісний відновник; 3 - зволожувач [1]

Рисунок 3 – Вплив складу компонентів шихти на продуктивність процесу відновлення молібдену із концентрату в шахтовій печі

Таблиця 3 – Коефіцієнти функціональних залежностей між параметрами технологічного процесу відновлювання рисунок 3 та 4

y_i	x_j	Інтервал		$a_{\bar{j}}^{(k)}$	$b_{\bar{j}}^{(k)}$	$c_{\bar{j}}^{(k)}$
		$m_{\bar{j}1}^{(k)}$	$m_{\bar{j}2}^{(k)}$			
y_2	x_3	261	287	0,0132	-7,2162	990,57
		259,9	301,4	0,0139	-7,7888	1092,2
y_3		261	287	0,0034	-1,8513	259,72
		259,9	301,4	-0,0011	0,5951	-77,818
y_5		261	287	-0,0203	11,166	-1524,9
		259,9	301,4	-0,012	6,7411	-937,6
y_2	x_4	3,61	3,92	-167,84	1268,9	-2388,9
		3,37	3,83	-109,34	782,91	-1392,7
y_3		3,61	3,92	-23,044	175,12	-324,17
		3,37	3,83	13,371	-94,798	171,96
y_5		3,61	3,92	116,2	-884,033	1685,8
		3,37	3,83	92,708	-664,27	1191,3



Щільність металізованих брикетів, г/см³.

1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1]

Рисунок 4 – Вплив складу компонентів в шихті на вихар молібдену при виплавці сталі в ДСП-18

Наступний етап технічних досліджень полягає в аналізі розрахунку і економічній оцінці виробництва та використання губчатого феромолібдену для легування швидкорізальної сталі.

Традиційно розрахунок економії виконується співвідношенням ціни визначеної кількості шихти до і після впровадження розробленого заходу. При цьому сума економії може бути отримана не за рахунок скорочення витрат окремого елемента, який входить в склад даного матеріалу, а за рахунок зміни співвідношення матеріалів які мають різну ціну [1].

У виконаній оцінці наскрізні вигоди при отриманні нового легувального матеріалу на основі молібдену присутнє зниження собівартості технології його отримання і зниження вихідних коефіцієнтів основних легувальних елементів в розплаві за рахунок молібдену із заданими властивостями. З цієї точки зору конкретні технічні рішення по використанню губчатого феромолібдену в якості легувального матеріалу по визначенню його економічної доцільності потребує використання не тільки загальних рекомендацій, а і врахування оригінальних критеріїв співставлення. До частки таких критеріїв відносяться розрахунок балансів по елементам, які вносяться і застосовуються при виплавці сталі і порівняння витрат елемента, заданого шихтою, з вмістом його в готовому металі (кількість зволоження, коефіцієнти засвоєння).

В цих умовах доцільним є розрахунок вище названих коефіцієнтів для визначення балансу шихтових матеріалів по плавкам проведених по базовій і новій технологіям. В розрахунках використовувались методики з конкретизації відповідних коефіцієнтів.

По результатам впровадження нової технології виробництва і використання губчатого феромолібдену ФМоГ по ТУ 48-5-224-81 його рекомендовано використовувати замість плавленого феромолібдену марок ФМо52...ФМл60 по ДСТУ 4755-79 і обпаленого молібденового концентрату марок КМо1...КМо3 по ТУ 14-5-88-77.

Ціна оксидного молібденового концентрату (вихідна сировина для виробництва ФМоГ) по даним Лондонської біржі металів і досвід маркетингу на 21.03.2024 року з урахуванням НДС складала 9,4 – 10,21 доларів США на 1 кг Мо в концентраті. Для розрахунку прийнята ціна 73,48 дол./кг (середнє значення). Видатковий коефіцієнт молібденового концентрату КМо дорівнює 1,05 на 1 кг Мо в ФМо. Умовна ціна ФМо і ФМоГ прирівняна до дол./кг (ціна на 21.03.2024р.). Собівартість переділу металізації у виробництві концентрату прийняли 0,450 дол. на 1 т КМо з вмістом 55% Мо.

Тоді на базовий вміст 100% Мо буде витрачено:

$$0,45/60 \cdot 100 = 0,75 \cdot 100 = 750 \text{ дол./т}$$

З урахуванням видаткового коефіцієнту:

$$75,0 \cdot (1,05 - 1,03) = 78,75 - 77,45 = 1,5 \text{ дол./кг} = 78,0 \text{ дол./т}$$

Повна собівартість виробництва губчастого феромолібдену ФМоГ В перерахунку на базовий вміст 100% Мо складає:

$$1,5 + 78,0 \cdot 1600 = 781,5 \text{ дол./т}$$

Прибуток від виробництва і реалізації нового легувального на основі молібдену складе:

$$П = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i) Q_2$$

де C_i – ціна 1 кг молібдену в стандартному і губчастому феромолібдену по курсу ЛМЕ; C_i – повна собівартість виробництва губчастого феромолібдену в перерахунку на базовий вміст 100% Мо; Q_2 – обсяг виробництва (на 1000 кг).

$$П = (78,0 - 75,0) \cdot 349,3 = 1047,9 \text{ дол./т}$$

Узагальнені показники виплавки швидко різальних сталей з використанням обпаленого молібденового концентрату стандартного плавленого феромолібдену і губчастого феромолібдену взяті з використанням і видаткових коефіцієнтів до і після впровадження нової технології.

1. Економія коштів за рахунок зниження витрат легувальних елементів на 1 тону сталі Р6М5 при виплавці в дуговій печі ДСВ-18 розрахована по формулі:

$$\mathcal{E}_1 \frac{n_1 - n_2}{B_1} y_1 \cdot C_1 + \frac{Z_1 - Z_2}{B_2} y_2 \cdot C_2 + \frac{L_1 - L_2}{B_3} y_3 \cdot C_3,$$

де n_1, Z_1, L_1 – це витрати хрому, молібдену і ванадію на тону рідкої сталі при виплавці з КМо, кг; n_2, Z_2, L_2 – це витрати хрому, молібдену і ванадію на тону сталі при виплавці з ФМоГ, кг; B_1, B_2, B_3 – доля хрому, молібдену і ванадію відповідно у феросплавах, %; y_1, y_2, y_3 – засвоєння хрому, молібдену і ванадію із феросплавів; C_1, C_2, C_3 – вартість хрому, феромолібдену і ферованадію, дол./кг.

$$\mathcal{E}_1 \frac{52,21 - 46,3}{0,70} \cdot 0,95 \cdot 1,776 + \frac{63,24 + 59,4}{0,60} \cdot 0,97 \cdot 17,63 + \frac{28,79 - 24,85}{0,35} \cdot 0,90 \cdot 26,52 = 392,376 \text{ дол.}$$

2. Витрати по підвищенню ФМоГ по відношенню до КМо:

$$Z_1 = Z_2' \cdot (C_2 - C_2'),$$

де Z_2' – витрати молібдену, кг/т; C_2 – ціна ФМоГ, дол./кг Мо; C_2' – вартість КМо, дол./кг Мо.

$$Z_1 = 22,37(7801,5 - 73,48) = 101,45 \text{ дол./т сталі}$$

3. Витрати по підвищенню вартості ФМоГ по відношенню до феромолібдену (ФМо):

$$Z_2 = (Z_2'' - Z_2') \cdot (C_2 - C_2')$$

де Z_2'' – витрати ФМо, кг/т; Z_2' – витрати КМо кг/т; C_2, C_2' – вартість ФМоГ та ФМо, дол./кг Мо.

$$Z_2 = (24,04 - 22,37) \cdot (78,5 - 75) = 5,01 \text{ дол./кг сталі}$$

4. Сумарна ефективність при використанні ФМоГ разом з КМо і ФМо складає:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 - Z_1 - Z_2 = 285,42 \text{ дол./т. сталі}$$

3. Економічний ефект від використання 1т губчастого феромолібдену складає:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{285,42 \cdot 1000}{24,04} = 11872,71 \text{ дол.}$$

6. Економічний ефект від використання 1000 т губчастого феромолібдену дорівнює:

$$\Xi_4 = 11872,71 \cdot 1000 = 11872710.$$

Висновки. Розроблена і впроваджена технологія виробництва губчастого феромолібдену методом порошкової металургії. Вироблений матеріал відрізняється від традиційних феросплавів на основі молібдену виплавлених рудно- або металотермічним способами, вигідними заданими технологічними властивостями: в 7-8 раз більше високою швидкістю засвоєння молібдену розплавом сталі, зниження окислювального потенціалу під час легування засвоєння хрому, молібдену і ванадію підвищується на 4 – 10%.

Отримана залежність параметрів, яка забезпечує підвищення і оптимізацію техніко-економічних показників виробництва губчастого феромолібдену: склад шихти і технологічних режимів комбінованого відновлення молібденового концентрату в шахтних печах.

Вміст кам'яновугільного пеку, вуглевмісного відновника і зволожувача представлені верхніми і нижніми межами, а крайні між ними – представлені оптимальними значеннями показників. По технічній суттєвості і досяжному економічному результату вони найбільш переважні.

Подальший науковий розвиток і практика використання для легування сталі цей напрямок отримав в роботах з вольфрамом і хромом. Удосконалювався склад і якість цільових легувальних матеріалів.

На прикладі виробництва і використання губчастого феромолібдену для легування сталі Р6М5 виконана кількісна оцінка економічної ефективності в цінах Лондонської біржі металів станом на 21.03.2024 рік. Представлені результати підтверджують доцільність і перспективність напрямку в металургії легувальних матеріалів на основі рідкісних і важкотопких елементів.

Бібліографічний перелік

1. Григор'єв С. М., Скачков В. А., Бережна О. Р. Порошкова металургія легуючих та композиційних матеріалів : монографія. Запоріжжя : ЗНУ, 2017. 737 с.
2. Григор'єв С. М., Петрищев А. С. Сучасне ресурсозбереження в металургії спеціальних сталей (техніко-економічна версія) : монографія. Запоріжжя : ЗНУ, 2016. 532 с.
3. Тарасов О.В. Мінеральна сировина, нові технології та розвиток виробництва тугоплавких металів у Росії та країнах СНД. *Кольорові метали*, 2011. № 6. С. 12-24.
4. Jung, W.-G. (2014). Recovery of tungsten carbide from hard material sludge by oxidation and carbothermal reduction process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4), 2384–2388. doi: 10.1016/j.jiec.2013.10.017.
5. Pashkeev K. Y., Pashkeev I. Y., Mikhailov G. G., Sudarikov M.V. Tarasov P. A. Investigation of aluminothermic reduction of wolframite concentrates. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2015. V. 15, №. 2. P. 13-19.
6. Leont'ev L. I., Grigorovich K. V., Kostina M. V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. Steel in Translation. 2016. Vol. 46, Issue I.P. 6-15. doi: 10.3103/s 096709121601006x.
7. Kozyrev N. A., Bendre Y. V., Goryushkin V. F., Shurupov V. M., Kozyreva O. Y. Thermodynamics of WO₃ Reduction by Carbon. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2016. № 2(16). Pp. 15-17.
8. Ryabchikov I. V., Belov B. F, Mizin V. G. Reactions of metal oxides with carbon. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44, Issue 5. P. 368-373. doi: 10.3103/s 0967091214030206.
9. Shveikin G. P., Kedin N. A. Products carbothermal reduction of tungsten oxides in argon flow. *Russian journal of inorganic chemistry*. 2014. Vol. 59, Issue 3. P. 153-158. doi: 10.1134/s 0036023614030206.
10. Kuzmichev E. N., Nikolenko S. V., Balakhonov D. I. Obtaining tungsten carbide from scheelite concentrate by concentrated energy flows. *Chemical Technology*. 2017. No. 3. P. 113-118.
11. Grigoriev D.S. Some kinetic regularities of the carbon-thermal reduction of a mixture of high-speed steel scale with additions of scheelite concentrate. *Metals and casting of Ukraine*. 2010. № 9-10. Pp. 57-61.
12. Tsvirko E.I., Grigoriev D.S. Some phase and structural transformations in the carbon-thermal reduction of a mixture of dross of high-speed steels with additions of scheelite concentrate. *New materials and technologies in the metal industry and machine-based machines*. 2010. № 2. P. 90-94.

References

1. Hryhor'ev S. M., Skachkov V. A., Berezhna O. R. Powder metallurgy of alloying and composite materials: monograph. Zaporizhzhia: ZNU, 2017. 737 p.
2. Hryhor'ev S. M., Petrishchev A. S. Modern resource conservation in the metallurgy of special steels (technical and economic version): monograph. Zaporizhzhia: ZNU, 2016. 532 p.
3. Tarasov O.V. Mineral raw materials, new technologies and the development of the production of refractory metals in Russia and the CIS countries. Non-ferrous metals, 2011. No. 6. P. 12-24.
4. Jung, W.-G. (2014). Recovery of tungsten carbide from hard material sludge by oxidation and carbothermal reduction process. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20 (4), 2384–2388. doi: 10.1016/j.jiec.2013.10.017.
5. Pashkeev K. Y., Pashkeev I. Y., Mikhailov G. G., Sudarikov M.V. Tarasov P. A. Investigation of aluminothermic reduction of wolframite concentrates. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2015. V. 15, №. 2. P. 13-19.
6. Leont'ev L. I., Grigorovich K. V., Kostina M. V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. Steel in Translation. 2016. Vol. 46, Issue I.P. 6-15. doi: 10.3103/s 096709121601006x.
7. Kozyrev N. A., Bendre Y. V., Goryushkin V. F., Shurupov V. M., Kozyreva O. Y. Thermodynamics of WO₃ Reduction by Carbon. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2016. № 2(16). Pp. 15-17.
8. Ryabchikov I. V., Belov B. F., Mizin V. G. Reactions of metal oxides with carbon. Steel in Translation. 2014. Vol. 44, Issue 5. P. 368-373. doi: 10.3103/s 0967091214030206.
9. Shveikin G. P., Kedin N. A. Products carbothermal reduction of tungsten oxides in argon flow. Russian journal of inorganic chemistry. 2014. Vol. 59, Issue 3. P. 153-158. doi: 10.1134/s 0036023614030206.
10. Kuzmichev E. N., Nikolenko S. V., Balakhonov D. I. Obtaining tungsten carbide from scheelite concentrate by concentrated energy flows. Chemical Technology. 2017. No. 3. P. 113-118.
11. Grigoriev D.S. Some kinetic regularities of the carbon-thermal reduction of a mixture of high-speed steel scale with additions of scheelite concentrate. Metals and casting of Ukraine. 2010. № 9-10. Pp. 57-61.
12. Tsivirko E.I., Grigoriev D.S. Some phase and structural transformations in the carbon-thermal reduction of a mixture of dross of high-speed steels with additions of scheelite concentrate. New materials and technologies in the metal industry and machine-based machines. 2010. № 2. P. 90-94.

Hrigoriev Stanislav, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3875-8880

Myshchenko Andriy, PhD student, Zaporizhzhia National University

Yakovlev Dmytro, PhD student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0002-0406-9868

Skachkov Rodion, master's student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF PRODUCTION AND USE OF METALLISED MOLYBDENUM CONCENTRATE

In the work, a study of technical and economic indicators of an active industrial experiment of smelting and using metallized molybdenum concentrate (spongy ferromolybdenum) was carried out. In domestic practice, the technology for the production of a new alloying material based on molybdenum in mine electric furnaces was developed and exploited for a long time and was optimized. A mathematical model of technical and economic indicators was developed, taking into account the largest number of technological factors. The result of mathematical modeling is a multifunctional indicator system. The limits of production indicators and expenditure coefficients of bulk materials were established and optimized, which made it possible to stabilize the quality of the target product.

In the performed assessment of end-to-end economic efficiency when obtaining a new alloying material, there is a reduction in the cost of production technology and a reduction in expenditure ratios. In the assessment methodology, not only the general recommendations of the ratio were used, but also the original factors that were developed in actual work. In the

efficiency assessment calculations, an improved technique was used with the specification of the relevant coefficients and prices for such materials as standard ferromolybdenum FMo52...FMo60, molybdenum concentrate of grades KMo1...KMo3, FMoG1...FMoG3 and steel P6M5.

The new alloying material based on molybdenum FMoG differs from traditional ferroalloys smelted by ore or metalothermic methods by favorable technical and economic indicators: 7-8 times higher rate of assimilation of molybdenum by molten steel, reduction of oxidation potential during alloying – assimilation of chromium, molybdenum and vanadium increases by 4-10%.

On the example of the production and use of spongy ferromolybdenum for steel alloying, an economic efficiency assessment was performed, which confirms the expediency and perspective of using alloying materials based on refractory elements in metallurgy.

Keywords: molybdenum, concentrate, ferroalloys, economic indicators, alloying element, steel.