

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Григор'єв Дмитро Станіславович, аспірант, Класичний приватний університет

Карпенко Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ГУБЧАСТОГО ФЕРОВОЛЬФРАМУ У ВІТЧИЗНЯНІЙ МЕТАЛУРГІЇ

У роботі досліджено одержання нового легуючого матеріалу на основі вольфраму методами порошкової металургії, Проведені розрахунки та економічні оцінки виробництва та використання губчастого феровольфраму для легування спеціальних сталей. Розроблений технологічний регламент виробництва губчастого феровольфраму дозволяє його використання у якості легуючого матеріалу. Проведена оцінка економічної ефективності та визначені основні фактори які впливають на неї. До факторів, які чинять вплив на економічну ефективність, слід віднести: виключення використання в якості відновника кошовних порошоків кремнію та алюмінію та заміни їх вуглецевмісними відходами; виключення операції поділення плавлених злитків, які знижують собівартість переділу відновлення рідких концентратів. При використанні губчастого вольфраму в якості легуючого матеріалу скорочується час розчинення вольфраму в розплаві, що знижує втрати вольфраму та інших легуючих елементів і розкислювачів та підвищує продуктивність основних металургійних агрегатів. Всі ці фактори знижують собівартість плавильного переділу. У роботі виконана оцінка економічної ефективності при одержанні губчастого феровольфраму і його використанні при виплавці швидкоріжучої сталі Р6М5 у дуговій електропечі ДСВ-25. При використанні нового легуючого матеріалу як легуючої добавки в розплав сталі одержують розвиток такі фактори як зниження видаткових коефіцієнтів на переділ плавки по вольфраму, хрому, молібдену й ванадію за рахунок зниження окисного потенціалу розплаву сталі, питомої витрати технологічної енергії при підвищенні швидкості засвоєння вольфраму розплавом сталі в 5–7 разів у порівнянні зі стандартним плавленням феровольфрамом й ін.

Ключові слова: губчастий феровольфрам, ступінь засвоєння елементів, собівартість, ціна, ефективність, економія.

Вступ. Існуючі технології вуглецевої та алюмотермічної плавки отримання металів на основі молібдену й вольфраму трансформуються у вітчизняні методи порошкової металургії й отримують свій подальший розвиток [1–3]. Одержувані продукти того ж призначення володіють якісно новими, наперед заданими, технологічними властивостями, що підтверджують передові наукові розробки у вітчизняній і закордонній практиці [2; 4; 5]. Удосконалюються технологічні параметри одержання губчастих легуючих матеріалів й їхні якісні характеристики [6]. Підтверджена їх висока економічна ефективність одержання й використання в сталеплавильному виробництві спеціальних сталей [7; 8]. Це свідчить про необхідність розвитку даного напрямку в металургії рідких і тугоплавких легуючих матеріалів, що безсумнівно вплине на підвищенні ефективності сталеплавильного виробництва [9].

Постановка завдання. У даній роботі ставиться завдання поглиблення досліджень у напрямку одержання нового легуючого матеріалу на основі вольфраму методами порошкової металургії, а конкретні задачі даної частини роботи полягають в аналізі,

розрахунках та економічній оцінці виробництва та використання губчастого феровольфраму для легування спеціальних сталей.

Результати дослідження. Розроблений технологічний регламент виробництва губчастого феровольфраму з наперед завданими споживчими властивостями, його використання, у якості легуючого матеріалу виявили ряд факторів, котрі не враховувались при оцінці економічної ефективності, як при виробництві, так і в області використання. До числа таких факторів, які отримали розвиток у технічному рішенні ресурсо- та енергозбереження і які чинять вплив на її ефективність, слід віднести: виключення використання в якості відновника кошовних порошків кремнію та алюмінію та заміни їх вуглицевовмісними відходами; виключення операції поділення плавлених злитків на більш дрібні шматки й інше, які знижують собівартість переділу відновлення рідких концентратів. При використанні губчастого вольфраму в якості легуючого матеріалу різко скорочується час розчинення вольфраму в розплаві, що суттєво знижує вигар вольфраму та інших легуючих елементів і розкислювачів та суттєво підвищує продуктивність основних металургійних агрегатів, що в кінцевому рахунку знижує собівартість плавильного переділу. У дійсній роботі виконана оцінка наскрізної економічної ефективності при одержанні губчастого феровольфраму і його використанні при виплавці швидкоріжучої сталі Р6М5 у дуговій електропечі ДСВ-25.

У розрахунках враховані такі фактори як зниження собівартості одержання нового матеріалу за зниженням енергетичних витрат на технологію відновлення вольфрамового концентрату, використання технології дешевих і розповсюджених відновлювачей, зменшення витрат за рахунок сублімації вищих оксидних з'єднань і підвищення виходу придатного. При використанні нового легуючого матеріалу як легуючої добавки в розплав сталі одержують розвиток такі фактори як зниження видаткових коефіцієнтів на переділ плавки по вольфраму, хрому, молібдену й ванадію за рахунок зниження окисного потенціалу розплаву сталі, питомої витрати технологічної енергії при підвищенні швидкості засвоєння вольфраму розплавом сталі в 5–7 разів у порівнянні зі стандартним плавленим феровольфрамом й ін.

Таким чином, дане конкретне технічне рішення по використанню губчастого феровольфраму як легуючого матеріалу по визначенню його економічної доцільності вимагає використання не тільки загальних рекомендацій, але й обліку оригінальних критеріїв зіставлення. До числа таких критеріїв ставиться розрахунок балансів по елементах, внесеним й засвоюваним при виплавці сталі, і порівняння витрати елемента заданого шихтою з вмістом його в готовому металі (величина, зворотна коефіцієнту засвоєння).

У цих умовах кращим є розрахунок з використанням вище названих коефіцієнтів для визначення балансу шихтових матеріалів по плавкам, проведеним по базовій і по технологіях. При виконанні розрахунків використовувалася методика, яка описана в роботі [7], з конкретизацією відповідних коефіцієнтів. За результатами впровадження технологій виробництва й використання губчастого феровольфраму ФВГ його рекомендується застосовувати замість плавленого феровольфраму марок ФВ70, ФВ75, ФВ65 за ДСТ 17293-82 і вольфрамового концентрату за ДСТ 213-73 марок КШ, КШ1, КМШ1–КМШ3.

Ціна оксидного молібденового (вольфрамового) концентрату (вихідна сировина для виробництва ФВГ), по даним Лондонської біржі металів і досвіду маркетингових операцій на вітчизняних заводах спеціальної сталей на червень 2022 р., з урахуванням ПДВ, становила 22,42–22,84 дол. США за 1 кг вольфраму у концентраті. Для розрахунку прийнята ціна 22,63 дол./кг (середнє значення). Видатковий коефіцієнт вольфрамового концентрату КШ1 дорівнює 1,07–1,09 кг на 1 кг W у ФВГ. Умовно ціни ФВ70 і ФВГ дорівняли до ціни 40,92 дол./г (ціна на червень 2022 р.). Собівартість переділу

металізації в процесі виробництва губчастого феровольфраму прийнято 550 дол. на 1 т ФВГ з вмістом 60% W.

Тоді на базовий вміст 100% W буде витрачено $\frac{550}{60} \cdot 100 = 916,67$ дол./т.

З урахуванням видаткового коефіцієнта $916,67 \cdot (1,07 - 1,09) = 980,83 - 999,17 =$
 $= 1000 - 1050$ дол./т.

Повна собівартість виробництва губчастого феровольфраму у ФВГ в перерахуванні на базовий вміст 100% W складе $22,63 + \frac{1050}{1000} = 23,68$ дол./т.

Прибуток від виробництва й реалізації нового легуючого матеріалу на основі вольфраму складе:

$$П = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i) \cdot Q_i, \quad (1)$$

де C_i – ціна 1 кг вольфраму в стандартному й губчастому феровольфрамі по курсу LME; C_i – повна собівартість виробництва губчастого феровольфраму в перерахунку на базовий вміст 100% W; Q_i – обсяг виробництва на 1000 кг.

$$П = (40,92 - 23,68) \cdot 1000 = 17240 \text{ дол./т.}$$

Узагальнені показники виплавки швидкоріжучої сталі із застосуванням обпаленого вольфрамового концентрату (КШИ), стандартного плавленого феровольфраму ФВ70 і губчастого феровольфраму ФВГ, узяті з використанням 66,3 т ФВГ і видаткових коефіцієнтів до й після впровадження нової технології.

1. Економія коштів за рахунок зниження витрати легуючих елементів на 1 т сталі Р6М5К5 при виплавці в дуговій печі ДСВ – 25 розрахована по формулі:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\beta_1} \cdot \gamma_1 \cdot C_1 + \frac{z_1 - z_2}{\beta_2} \cdot \gamma_2 \cdot C_2 + \frac{l_1 - l_2}{\beta_3} \cdot \gamma_3 \cdot C_3 + \frac{\xi_1 - \xi_2}{\beta_4} \cdot \gamma_4 \cdot C_4 + \frac{m_1 - m_2}{\beta_5} \cdot \gamma_5 \cdot C_5, \quad (2)$$

де $\eta_1, z_1, l_1, \xi_1, m_1$ – витрати хрому, молібдену й ванадію на тону рідкої сталі при виплавці із КШИ, кг; $\eta_2, z_2, l_2, \xi_2, m_2$ – витрати хрому, молібдену й ванадію на тону рідкої сталі при виплавці із ФВГ, кг; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ – частка хрому, молібдену й ванадію відповідно у феросплавах; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ – засвоєння хрому, молібдену, ванадію, вольфраму й кобальту з феросплавів; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – вартість ферохрому, феромолібдену, ферованадію, феровольфраму й кобальту металевого відповідно дол./кг.

$$\mathcal{E} = \frac{53,41 - 45,88}{0,74} \cdot 0,94 \cdot 1,40 + \frac{64,33 - 58,67}{0,63} \cdot 0,96 \cdot 87,00 + \frac{29,33 - 25,84}{0,36} \cdot 0,82 \cdot 45,00 +$$

$$+ \frac{64,31 - 58,20}{0,74} \cdot 0,98 \cdot 40,50 + \frac{66,72 - 65,39}{0,99} \cdot 0,99 \cdot 6,95 = 1544,48 \text{ дол./т сталі.}$$

2. Витрати по збільшенню вартості ФВГ по відношенню із КШИ:

$$Z_1 = Z_2 \cdot (C_2 - C_3), \quad (3)$$

де Z_2 – витрати вольфраму, кг/т; C_2 – вартість ФВГ, дол./кг W; C_3 – вартість КШ1, дол./кг W.

$$Z_1 = 23,44 \cdot (40,92 - 22,63) = 428,72 \text{ дол./т сталі.}$$

3. Витрати по збільшенню вартості ФВГ стосовно феровольфраму:

$$Z_2 = (Z_2 - Z_4) \cdot (C_2 - C_4), \quad (4)$$

де Z_2 – витрати ФВГ, кг/т; Z_4 – витрати КШ1, кг/т; C_2, C_4 – вартість ФВГ і ФВ70, дол./кг W.

$$Z_2 = (24,04 - 23,44) \cdot (40,92 - 40,92) = 0.$$

4. Сумарна ефективність при використанні ФВГ разом із КШ1 й ФВ70 становить $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2 = 1544,48 - 428,72 - 0 = 1115,76$ дол./м сталі.

Округлено 1100 дол./т сталі.

5. Економічний ефект від використання 1000т губчастого феровольфраму становить $\mathcal{E}_3 = (1100 \cdot 1000) / 24,04 = 45757$ дол.

Висновки. Розроблено технологію одержання й використання губчастого феровольфраму методом порошкової металургії, що відрізняється від традиційних феросплавів на основі вольфраму металокерамічної плавки гнучкістю й економічністю. Розрахована на використання відносно дешевих і розповсюджених відновлювачів, і одержанням продукту з якісно новими технологічними властивостями: швидкістю засвоєння вольфраму в розплаві сталі в 5–7 разів вище чим зі стандартного аналога. Це дозволяє знизити вигар інших елементів з розплаву сталі на 4–7% (молібдену, хрому, ванадію). Виконані розрахунки економічної ефективності використання нового легуючого підтверджують високу ефективність і перспективність розширення обсягів впровадження.

Бібліографічний перелік

1. Острик П.Н., Гасик М.М., Пирог В.Д. Металлургия губчатых и порошковых лигатур. Киев : Техника, 1992. 128 с.
2. Григорьев С.М., Акименко В.Б., Попов А.Н. [и др.]. Получение металлизированного молибденового концентрата брикетированной шихты и его использование при выплавке стали. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 1983. № 8. С. 79–81.
3. Авторское свидетельство № 977510. Способ получения металлизированных молибден и/или вольфрамсодержащих концентратов / П.Н. Острик, А.Н. Попов, С.М. Григорьев [и др.]. № 3312571 / 22-02. Заявл. 30.11.82. Бюл. № 49. С. 102.
4. Карпунина М.С., Москаленко А.С., Григорьев С.М. [и др.]. Термодинамический анализ и математическое моделирование применительно к технологии получения губчатого вольфрама. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 1999. № 11. С. 33–36.
5. Карпунина М.С., Москаленко А.С., Григорьев С.М. [и др.]. Математическая модель термодинамического равновесия в системе W O - C применительно к технологии губчатого вольфрама. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 1999. № 12. С. 31–34.
6. Григорьев С.М., Григорьев Д.С. Снижение примесей в металлизированном вольфрамовом концентрате. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг 2002. № 10. С. 43–46.
7. Пивень А.Н., Григорьев С.М. Эффективность ресурсосбережения при использовании молибденсодержащих материалов. *Цветные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 1992. № 11. С. 10–12.
8. Григорьев С.М. Техничко-економічні показателі розвитку металургії губчатих н порошковых лигатур На примере металлизированного молибденового концентрата. *Черные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2005. № 3. С. 26–29.
9. Григор'єв С.М. Економічна стратегія й тактика ресурсо- і енергозбереження в металургії тугоплавких матеріалів. *Металургія*. Запоріжжя : ЗГІА, 1998. Вип. 1. С. 17–23.

References

1. Ostriuk P.N., Gasik M.M., Pirog V.D. Metallurgy of spongy and powder ligatures. Kyiv : Technique, 1992. 128 p.
2. Hrigoriev S.M., Akimenko V.B., Popov A.N. [and etc.]. Obtaining metallized molybdenum concentrate of briquetted charge and its use in steel smelting. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 1983. No. 8. P. 79–81.
3. Author's certificate No. 977510. Method for obtaining metallized molybdenum and/or tungsten-containing concentrates / P.N. Ostryk, A.N. Popov, S.M. Hrigoriev [and ect.]. No. 3312571 / 22-02. Appl. 11/30/82. Bull. No. 49. P. 102.
4. Karpunina M.C., Moskalenko A.S., Hrigoriev S.M. [and etc.]. Thermodynamic analysis and mathematical modeling in relation to the technology of obtaining spongy tungsten. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 1999. No. 11. P. 33–36.

5. Karpunina M.S., Moskalenko A.S., Hrigoriev S.M. [and etc.]. Mathematical model of thermodynamic equilibrium in the system WO - C in relation to the technology of spongy tungsten. *Steel*. Moscow : Intermet Engineering, 1999. No. 12. P. 31–34.
6. Hrigoriev S.M., Hrigoriev D.S. Reduction of impurities in metallized tungsten concentrate. *Steel*. Moscow : Intermet Engineering, 2002. No. 10. P. 43–46.
7. Piven A.N., Hrigoriev S.M. Efficiency of resource saving when using molybdenum-containing materials. *Nonferrous metals*. Moscow : Publishing House “Ore and Metals”, 1992. No. 11. P. 10–12.
8. Hrigoriev C.M. Technical and economic indicators of the development of metallurgy of spongy and powder ligatures On the example of metallized molybdenum concentrate. *Black metals*. Moscow : Publishing House “Ore and Metals”, 2005. No. 3. P. 26–29.
9. Hrigoriev S.M. Economic strategy and tactics of resource and energy saving in the metallurgy of refractory materials. *Metallurgy*. Zaporizhzhya : ZGIA, 1998. № 1. P. 17–23.

Skachkov Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhya National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Hrigoriev Dmytro, graduate student, Classical Private University

Karpenko Anna, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

ECONOMIC ASSESSMENT OF THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SPONGE FERROTUNGSTEN PRODUCTION IN DOMESTIC METALLURGY

The paper examines the production of a new alloying material based on tungsten by powder metallurgy methods. Calculations and economic evaluations of the production and use of spongy ferrotungsten for alloying special steels are carried out. The developed technological regulations for the production of spongy ferrotungsten allow its use as an alloying material. An assessment of economic efficiency was carried out and the main factors influencing it were determined. To the factors that influence economic efficiency, it should be attributed: the exclusion of the use of precious silicon and aluminum powders as a reducing agent and their replacement with carbon-containing waste; elimination of the operation of dividing molten ingots, which reduces the cost of redistribution of recovery of liquid concentrates. When spongy tungsten is used as an alloying material, the dissolution time of tungsten in the melt is reduced, which reduces losses of tungsten and other alloying elements and deoxidizers and increases the productivity of the main metallurgical units. All these factors reduce the cost of smelting redistribution. The work evaluates the economic efficiency of obtaining spongy ferrotungsten and its use in the smelting of high-speed steel P6M5 in an electric arc furnace DSV-25. When using a new alloying material as an alloying additive in the steel melt, such factors as a decrease in the expenditure coefficients for the redistribution of the melt into tungsten, chromium, molybdenum, and vanadium due to a decrease in the oxidation potential of the steel melt, the specific consumption of technological energy with an increase in the absorption rate of tungsten by the steel melt in 5–7 times compared to standard fused ferrotungsten, etc.

Keywords: spongy ferrotungsten, degree of assimilation of elements, cost, price, efficiency, economy

Стаття надійшла до редакції 15.02.2022 р.