

**Григор'єв Дмитро Станіславович**, аспірант, Класичний приватний університет  
**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

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

## МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ РІДКІСНИХ МЕТАЛІВ ІЗ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

У статті запропоновано один із напрямків оцінювання економічної ефективності з урахуванням нетрадиційних критеріїв, які набули розвитку при утилізації рідкісних металів в металургії спеціальних сталей. Показано значення питання раціонального використання сировинних та енергетичних ресурсів, використання техногенних відходів, вторинної сировини та утилізація цінних компонентів від їх переробки. Для підвищення ступеня утилізації використовували добавки легованого циклонного пилу, який осідає при диспергуванні рідкого металу. Оптимальні параметри металізації окалини в капсулах в нагрівальних печах разом з термообробленим металом дозволяють підвищити ступінь використання нагрівальних печей. Отриманий губчастий матеріал у капсулі використовується в якості легованої шихти при виробництві порошкових швидкорізальних сталей без будь-яких значимих змін до діючої технології, що дозволило істотно знизити витрати дорогих рідкісних елементів і феросплавів на їх основі. Виявлено чинники, які отримали розвиток і роблять визначальний вплив на економічну ефективність утилізації тугоплавких елементів при відносно низьких температурах (не більше 1200 °C) запропонованим способом. Визначені фактори, що впливають на ефективність вилучення рідкісних металів: концентрація тугоплавких елементів у використовуваних відходах, витратні коефіцієнти, ступінь їх наскрізної утилізації, зниження чаду всього комплексу тугоплавких і активних металів при веденні процесу в системах з надлишковим відновним потенціалом і інші чинники. Економічна доцільність утилізації рідкісних металів з окалини швидкорізальних сталей підтверджується розрахунками, виконаними на основі статистичної обробки даних обліку діючого промислового виробництва сталей.

Ключові слова: утилізація, техногенні відходи, економічна ефективність, витратні коефіцієнти, ступінь наскрізної утилізації

*Вступ.* В Україні не має власної мінерально-сировинної бази для виробництва легувальних матеріалів на основі рідкісних та важкотопких металів. Їх дефіцит поповнюється за рахунок імпорتنих поставок із-за кордону по світовим цінам. Це дає підставу для пошуку альтернативних рішень для підвищення конкурентоспроможності вітчизняної металопродукції. Одним із таких напрямків запропоновано ресурсо- та енергозбереження в металургії спеціальних сталей.

Для повноти та всебічної оцінки ефективності прогресивних науково-практичних рішень необхідно врахувати критерії та фактори, які набули розвитку в дійсній роботі на прикладі удосконалення методичних засад розрахунків економічної ефективності утилізації рідкісних та важкотопких металів із техногенних відходів виробництва товарної продукції швидкорізальних сталей [1].

Проблема підвищення ефективності матеріальних і енергетичних ресурсів в умовах кризових явищ в світовій економіці у державі набуває першорядного значення і ставить завдання комплексного підходу до її вирішення. Це означає необхідність посилення

орієнтації на кінцевого споживача усієї управлінської діяльності підвищення відповідальності працівників за ефективність праці. Особливого значення ці чинники набувають в металургійній галузі, яка являється базовою у вітчизняній промисловості [2]. До дефіцитних легувальних елементів варто віднести молібден, вольфрам, кобальт, ванадій та інші, відсутність яких в державі стримує нарощування обсягів виробництва спеціальної металопродукції і, як наслідок, всього народногосподарського комплексу [3; 4; 5].

Становище, що склалося з відходами, і наступною переробкою характеризується низьким ступенем використання коштовних дефіцитних рідкісних і тугоплавких елементів. Особливо ця проблема загострилась після розриву традиційних зв'язків внутрішньої і міжгалузевої кооперації, коли багато виробників легувальних матеріалів залишилися за межами вітчизняної промисловості [6].

Сучасний період стагнації національної економіки України та виникнення проблем розвитку, які потребують негайного вирішення, є розробка нових ефективних та удосконалення діючих механізмів та заходів підвищення якості металургійної продукції та скорочення браку на всіх стадіях виробництва. Сутність питань, які сприятимуть підвищенню матеріальної відповідальності виробниками – винуватцями неякісної продукції і невіправного браку полягає не в частковій компенсації, матеріальних збитків у вигляді штрафів, а в повному відшкодуванні збитків постраждалій стороні від браку. Це, у свою чергу, позитивно відіб'ється на зниженні повної собівартості виробництва металопродукції, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних виробництв на зовнішніх ринках та стануть запорукою економічного зростання та стабілізації господарських зв'язків.

Проблемам оцінки і аналізу ефективності міжнародної конкурентоспроможності вітчизняних та зарубіжних підприємств, формування можливих шляхів подолання кризових явищ присвячені наукові праці таких вчених, як Б. Губський, Ф. Павленко, С. Салига, Г. Семенов, П. Супрун, Ю. Іванов, В. Білоус, В. Александрова та інші. Також у цьому напрямку свій вклад внесли і досягли економічно значних результатів такі науковці: М. Лейтман, Х. Крогерус. Вони розробили та оптимізували зниження показників браку та підвищення якості продукції методами порошкової металургії [7; 8].

Важливого значення на сучасному етапі розвитку економіки набувають питання раціонального використання сировинних та енергетичних ресурсів, використання техногенних відходів, вторинної сировини та утилізація цінних компонентів від їх переробки. Цьому аспекту присвячено багато наукових праць таких фахівців, як Є. Волинкіна, Т. Хансман, Р. Бредехефт, І. Дорошев, А. Шварц [2; 9; 11].

Заслуговують на увагу наукові та практичні досягнення в напрямку підвищення ефективності ресурсо- та енергозберігання вітчизняних авторів Ревуна М.П., Півень А.М., Григор'єва С.М. та ін.

У роботах С. Грищенко та С. Григор'єва знайшли спотворення питання цінової ситуації на світовому ринку сировинних матеріалів та феросплавів для спеціальної металургії та пошук внутрішніх резервів і альтернатив джерел підвищення показників придатності [12–15].

Методичні оцінювання економічної ефективності природоохоронних технічних рішень, які використовуються на даний час, як правило пропонують економічну оцінку збитків від забруднення навколишнього середовища. В більшості випадків не враховують вигоди, які отримуються від утилізації цінних компонентів із техногенних відходів. Це приводить до встановлення більш довгих строків окупності капітальних вкладень в охоронні заходи, і як наслідок, до спотворенню нормативних термінів окупності капітальних вкладень в розроблені технології [1; 12].

Метою досліджень є удосконалення методики та оцінка економічної ефективності ресурсо- та енергозбереження в металургії спеціальних сплавів на прикладі утилізації рідкісних та тугоплавких легувальних елементів із техногенних відходів виробництва товарної продукції швидкорізальних сталей.

Вивчення процесу металізації окалини швидкорізальної сталі в гетерогенній системі здійснювалося у напрямі зниження і виключення вмісту в складі шихти «свіжих» компонентів – молібденового і вольфрамового ангідридів, що поставляються по ТУ 48-18-134-85 і ТУ 48-18-480-85. Найбільш бажані з техніко-економічної точки зору результати отримані з використанням у складі шихти в якості відновника циклонного пилу вуглеграфітового виробництва, а в якості сполучного – відходів нафтоперегонки (важких фракцій смоли).

Для підвищення ступеня утилізації використовувалися добавки в шихту легованого циклонного пилу, який осідає в очисних пристроях при диспергуванні рідкого металу. Оптимальні параметри металізації окалини в капсулах в нагрівальних печах разом з термообробленим металом дозволяють підвищити ступінь використання нагрівальних печей. Отриманий губчастий матеріал у капсулі використовується в якості легової шихти при виробництві порошкових швидкорізальних сталей без будь-яких значимих змін до діючої технології, що дозволило істотно знизити витрати дорогих рідкісних елементів і феросплавів на їх основі.

У розробленій технології застосовуються в якості всіх вихідних компонентів відходи різних джерел утворення. У випадку використання «забруднених» шкідливими домішками відходів найбільш ефективним способом переробки може бути рафінувальне плавлення в системі рідкофазних реакцій з надмірним відновлювачем та отриманням сплавів для легування і розкиснення розплаву металу. Це корінним чином дозволяє змінити структуру собівартості виробництва порошкових швидкорізальних сталей і істотно знизити витрати на шихтові матеріали за рахунок утилізації тугоплавких елементів з відходів. Однак для більш широкого впровадження вкрай необхідна методика визначення об'єктивної оцінки нового технічного рішення, всебічної економічної вигоди від його використання. З цієї метою кількісно виявлено чинники, які отримали розвиток і роблять визначальний вплив на економічну ефективність утилізації тугоплавких елементів при відносно низьких температурах (не більше 1200 °С) запропонованим способом. До числа таких факторів слід віднести концентрацію тугоплавких елементів у використуваних відходах, витратні коефіцієнти, ступінь їх наскрізної утилізації, зниження чаду всього комплексу тугоплавких і активних металів при веденні процесу в системах з надлишковим відновним потенціалом і інші чинники, які не враховуються відомими методиками оцінки ефективності нової техніки і прямого ефекту від заходів природоохоронного значення. Економічна доцільність утилізації рідкісних металів з окалини швидкорізальних сталей підтверджується розрахунками, виконаними на основі статистичної обробки даних обліку діючого промислового виробництва сталей. Сума економічного ефекту ( $E$ ) виконана наступним чином: витрати з виготовлення 1 т паспортних брикетів  $z$ -того варіанта та, в тому числі і за традиційним, визначаються за формулою:

$$E_z = (a_i C_i + r_i) + \sum_{i=1}^n Y_i C_i + \sum_{i=1}^n t_i (a_i C_i + r_i), \quad (1)$$

де  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – кількість варіантів,  $a_i$  – витрата компонентів шихти на 1 т брикетів, т/т;  $C_i$  – ціна  $i$ -того компонента шихти грош. од/т;  $r_i$  – витрати на утилізацію 1 т брикетів, грош. од/т;  $Y_i$  – втрати легуючих елементів за рахунок чаду, т/т;  $C_i$  – вартість окалини або дрібнодисперсного порошку за ціною провідних елементів, грош. од/т;  $t_i$  – втрати металізованого продукту при транспортуванні, частки од.

На основі виконаного розрахунку ( $E_z$ ) визначається ціна сплаву ( $U_{cz}$ ) і сума економії по різним способам виплавки сталі – за традиційним і пропонованому. Розрахунок суми економічного ефекту  $E_z$  виконується по кожній марці сталі окремо.

$$E_z = \left[ \frac{U_{\phi 1}}{K_{\phi 1}} (\Pi - \Pi_c) + \frac{U_{c1}}{K_{c1}} \Pi_c \right] - \left[ \frac{U_{\phi 2}}{K_{\phi 2}} + \frac{U_{c2}}{K_{c2}} \Pi_c \right], \quad (2)$$

де  $U_{\phi 1}$  – сума витрат на легуючі матеріали в шихті за відповідною маркою сталі грош. од/т;  $U_{c1}$  – сума витрат на шихту зі сплавом по відповідній марці сталі грош. од/т;  $U_{\phi 2}$  – сума витрат на легуючі матеріали в шихті при використанні пропонованого сплаву, грош. од. плавка;  $U_{c2}$  – ціна пропонованого сплаву, грош. од/т;  $\Pi$  – маса плавки, т;  $\Pi_c$  – маса використання сплаву в шихті на плавку, т;  $K_{\phi 1}$ ,  $K_{\phi 2}$  – коефіцієнт засвоєння легуючих матеріалів відповідно за традиційним і пропонованому варіантами.

В наведеній формулі (3) сума витрат на легуючі матеріали в шихті  $U_{\phi 1}$  та сума витрат на шихту  $U_{c1}$  за відповідною маркою сталі визначається:

$$U_{\phi 1} = \sum_{e=1}^m U_e \Phi_e, \quad U_{c1} = \sum_{e=1}^m U_{oe} O_e, \quad (3)$$

де  $U_e$  – ціна чистого елемента в легуючому матеріалі грош. од/т;  $\Phi_e$  – вміст чистого елемента в легуючому матеріалі т/т;  $e = 1, 2, 3, \dots, m$  – види елементів у легуючих матеріалах шихтових елементів,  $U_{oe}$  – ціна чистого елемента в сплаві, прийнятого за аналог, грош. од. за 1%;  $O_e$  – вміст чистого елемента в сплаві%.

Сума витрат на легуючі матеріали в шихті при використанні пропонованого сплаву розраховується за формулою:

$$U_{\phi 2} = \sum_{i=1}^y \frac{U}{100} b_i, \quad (4)$$

де  $b_i$  – кількість чистого елемента в феросплавах, що витрачаються на плавку, %.

Сума економічного ефекту визначається за формулою:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{Y} \cdot A - E_n K, \quad (5)$$

де  $i = 1, 2, 3, n$  – кількість марок сталей;  $E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності;  $K$  – сума витрат на використання по отриманню сплаву грош. од.;  $A$  – обсяг виробництва сталі, т.

**Висновки.** У промислових умовах встановлена практична цінність утилізації тугоплавких елементів з оксидних відходів виробництва спеціальних сталей на основі розробленої технології металізації окалини швидкорізальних сталей на діючому термічному і плавильному обладнанні, що дозволяє скоротити споживання молібдену, вольфраму, ванадію, кобальту і хрому на 6,9%. Розроблена методика оцінки економічної ефективності наскрізної утилізації кольорових металів з урахуванням нетрадиційних чинників дозволила встановити реальну економічну вигоду від використання нового технічного рішення і в комплексі виконати розрахунки по утилізації рідкісних металів з окалини швидкорізальних сталей. Цю методику можна використовувати в аналогічних розрахунках. Фактична економія за рахунок утилізації легувальних елементів склала від 450 до 970 дол. США на 1 т металізованої окалини швидкорізальних сталей в заощадженні від виробничих коефіцієнтів в межах 250–660 кг/т сталі (в цінах Лондонської біржі металів LME).

### Бібліографічний перелік

1. Григорьев С.М., Пивень А.Н. Эффективность утилизации никеля и молибдена из отходов прецизионных сплавов на никелевой основе. *Цветные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 1994. № 1. С. 10–12.

2. Керкхофф Х.Ю. Взрыв цен на сырьё – угроза экономическому подъёму. *Чёрные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2010. № 10. С. 61–66.
3. Грищенко С.Г. Мировой финансово-экономический кризис в металлургии. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 2009. № 2. С. 68–71.
4. Грищенко С.Г. Рынок металлопродукции Украины в странах СНГ: проблемы и задачи. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 2008. № 9. С. 88–90.
5. Григорьев С.М., Геллер А.В. Утилизация техногенных отходов при получении порошков хромоникелевых сталей. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг 1999. № 8. С. 72–74.
6. Григорьев С.М., Петрищева И.В. Экономическая целесообразность альтернативных источников ресурсо-энергосбережения в металлургической промышленности. *Вісник Запорізького національного університету. Серія: Економічні науки*. Запоріжжя : ЗНУ, 2012. № 2. С. 15–20.
7. Крогерус Х., Ойкаринсн П. Технология производства феррохрома фирмы Outokumpu: экономическая эффективность и высокая производительность. *Чёрные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2003. № 12. С. 23–31.
8. Лейтман М.С. Тугоплавкие металлы: состояние рынка и перспективы применения в России. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 2008. № 3. С. 47–50.
9. Волынкина Е.П., Протопопов Е.В. Отходы металлургического предприятия: от анализа потерь к управлению. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. Москва : МИСИС, 2005. № 6. С. 72–76.
10. Хансман Т., Фонтана П., Чиапперо А. Технология оптимального рынка отходов черной металлургии. *Чёрные металлы*. Москва : Интермет Инжиниринг, 2008. № 10. С. 32–37.
11. Черепков К.А. Переработка и утилизация отходов – один из путей рационального использования природных ресурсов. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. Москва : МИСИС, 2004. № 12. С. 73–77.
12. Грищенко С.Г. Мировой финансово-экономический кризис в металлургии. *Сталь*. Москва : Интермет Инжиниринг, 2009. № 2. С. 68–71.
13. Григор'єв С.М., Зубрицька Я.О. Стратегічні й практичні напрями ресурсо- та енергозбереження в металургії важкотопких легувальних матеріалів і спеціальних сталей. *Держава та регіони*. Запоріжжя : КПУ, 2009, № 6. С. 70–76.
14. Григор'єв С.М., Зубрицька Я.О. Ресурсо- та енергозбереження в регіональній економічній політиці на прикладі утилізації легувальних елементів з техногенних відходів виробництва прицензійних сплавів. *Держава та регіони*. Запоріжжя : КПУ, 2009. № 5. С. 61–65.
15. Григорьев С.М. Технично-экономические показатели развития металлургии губчатых и порошковых лигатур на примере металлизированного молибденового концентрата. *Чёрные металлы*. Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2005. № 3. С. 26–29.
16. Григор'єв С.М. Удосконалення регіонального планування в металургії тугоплавких легувальних матеріалів на прикладі впровадження у виробництво хромовмісних брикетів. *Держава та регіони*. Запоріжжя : КПУ, 2009. № 7. С. 72–76.

## References

1. Hrigoriev S.M., Pyven A.N. Efficiency of utilization of nickel and molybdenum from waste of nickel-based precision alloys. *Non-ferrous metals*. Moscow : Publishing House “Ruda and Metals”, 1994. No. 1. P. 10–12.
2. Kerkhoff H.Yu. The explosion of prices for raw materials is a threat to economic growth. *Black metals*. Moscow : Publishing House “Ruda and Metals”, 2010. No. 10. P. 61–66.
3. Hryshchenko S.G. World financial and economic crisis in metallurgy. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 2009. No. 2. P. 68–71.
4. Hryshchenko S.G. Market of metal products of Ukraine in the CIS countries: problems and tasks. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 2008. No. 9. P. 88–90.
5. Hrigoriev S.M., Heller A.V. Utilization of man-made waste in the production of chrome-nickel steel powders. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 1999. No. 8. P. 72–74.
6. Hrigoriev S.M., Petrishcheva I.V. Economic feasibility of alternative sources of resource-energy saving in the metallurgical industry. *Bulletin of Zaporizhzhya National University. Series: Economic sciences*. Zaporizhzhia : ZNU, 2012. No. 2. P. 15–20.
7. Krogerus X., Oikarinsn P. Ferrochrome production technology of the Outokumpu firm: economic efficiency and high productivity. *Black metals*. Moscow : Publishing House “Ruda and Metals”, 2003. No. 12. P. 23–31.
8. Leitman M.S. Refractory metals: the state of the market and prospects for application in Russia. *Steel*. Moscow : Internet Engineering, 2008. No. 3. P. 47–50.

9. Volynkina E.P., Protopopov E.V. Waste of a metallurgical enterprise: from analysis of losses to management. *Izvestiya universities. Ferrous metallurgy*. Moscow : MYSIS, 2005. No. 6. P. 72–76.
10. Hansman T., Fontana P., Chiappero A. Technology of the optimal market of ferrous metallurgy waste. *Black metals*. Moscow : Intermet Engineering, 2008. No. 10. P. 32–37.
11. Cherepkov K.A. Processing and utilization of waste is one of the ways of rational use of natural resources. *Izvestiya universities. Ferrous metallurgy*. Moscow : MYSIS, 2004. No. 12. P. 73–77.
12. Hryshchenko S.G. World financial and economic crisis in metallurgy. *Steel*. Moscow : Intermet Engineering, 2009. No. 2. P. 68–71.
13. Hrigoriev S.M., Zubrytska Y.O. Strategic and practical directions of resource and energy saving in the metallurgy of refractory alloying materials and special steels. *State and regions. Zaporizhzhia : KPU*, 2009. No. 6. P. 70–76.
14. Hryhoriev S.M., Zubrytska Y.O. Resource and energy conservation in regional economic policy on the example of utilization of alloying elements from man-made byproducts of the production of premium alloys. *State and regions. Zaporizhzhia : KPU*, 2009. No. 5. P. 61–65.
15. Hryhoriev S.M. Technical and economic indicators of the development of metallurgy of spongy and powder ligatures using the example of metallized molybdenum concentrate. *Black metals*. Moscow : Publishing house “Ore and metals”, 2005. No. 3. P. 26–29.
16. Hrigoriev S.M. Improvement of regional planning in the metallurgy of refractory alloying materials on the example of introduction into the production of chromium-containing briquettes. *State and regions. Zaporizhzhia : KPU*, 2009. No. 7. P. 72–76.

**Hrigoriev Dmytro**, Graduate Student, Classical Private University

**Skachkov Viktor**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhya National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Karpenko Anna**, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

#### **METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR EVALUATING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF DISPOSAL OF RARE METALS FROM TECHNOLOGICAL WASTE OF SPECIAL STEEL**

The article proposes one of the directions for evaluating economic efficiency, taking into account non-traditional criteria that have developed during the utilization of rare metals in the metallurgy of special steels. The importance of the rational use of raw and energy resources, the use of man-made waste, secondary raw materials and the disposal of valuable components from their processing is shown. To increase the degree of utilization, additives of alloyed cyclone dust, which settles during the dispersion of liquid metal, were used. Optimum parameters of metallization of scale in capsules in heating furnaces together with heat-treated metal allow increase the degree of use of heating furnaces. The obtained spongy material in the capsule is used as an alloyed charge in the production of powder high-speed steels without any significant changes to the current technology, which made it possible to significantly reduce the costs of expensive rare elements and ferroalloys based on them. The factors that have been developed and have a decisive influence on the economic efficiency of the disposal of refractory elements at relatively low temperatures (no more than 1200 °C) by the proposed method have been identified. Determined factors affecting the efficiency of extraction of rare metals: the concentration of refractory elements in the used waste, consumption coefficients, the degree of their end-to-end utilization, reduction of the carbon content of the entire complex of refractory and active metals when conducting the process in systems with excess recovery potential and other factors. The economic expediency of recycling rare metals from the slag of high-speed steels is confirmed by calculations made on the basis of statistical processing of accounting data of active industrial steel production.

Keywords: utilization, man-made waste, economic efficiency, consumption coefficients, degree of end-to-end utilization

Стаття надійшла до редакції 12.08.2022 р.