
УДК 669.28:519/87

Д-р техн. наук С. М. Григорьев¹, А. С. Петрицев²,
канд. фіз.-мат. наук Г. А. Шишканова²

¹ Національний університет, ² Національний технічний університет, м. Запоріжжя

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СПЛАВУ «СИР»

Виконано розробку та оптимізацію багатофункціональної системи залежностей техніко-економічних показників виробництва сплаву для легування та розкиснення швидкорізальних сталей на основі техногенних відходів. Знайдено та досліджено оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів, у результаті чого виявлено можливість підвищення якості сплаву для легування та розкиснення сталі з найбільш вигідним вмістом легувальних елементів у ньому та зниження собівартості виплавки сталі з його використанням.

Ключові слова: *техніко-економічні показники, техногенні відходи, легування, сталь, математична модель, собівартість, легувальні елементи.*

Вступ

Україна не має власної мінерально-сировинної бази для виробництва легувальних матеріалів на основі рідкісних і тугоплавких елементів. Потреба в них задовольняється імпортними постачаннями з близького і далекого зарубіжжя. Особливо ця проблема загострилася останніми роками у зв'язку зі стрімким зростанням цін на них на світовому ринку споживання. Тому розробка вітчизняних ресурсозберігальних технологій молібден- і вольфрамвмісних сплавів і лігатур, тим більше з паралельною утилізацією немобільних відходів (окалина швидкорізальних сталей) являє собою не лише науковий, але, насамперед, практичний промисловий інтерес.

Дефіцит фінансових коштів для технічного розвитку і організації виробництва на більшості металургійних підприємств ускладнює впровадження технологій, що сприяють скороченню техногенних відходів і викидів шкідливих речовин [1, 2].

Орієнтація на переважно екстенсивне використання природних ресурсів економічно виправдана в недалекому минулому, в сучасних умовах не тільки недоцільна, але й неможлива. Доступність та порівняно дешевизна природних ресурсів, що мала місце в період екстенсивного економічного зростання, не стимулювала формування прогресивної з сучасних позицій технологічної структури металургії, комплексне використання сировини та матеріалів, що призвело до надмірної енерго- та матеріалоємності кінцевого продукту. Ці тенденції особливо проявилися в металургії рідкісних металів та легувальних матеріалів на їх основі. В нинішній період ця проблема посилюється відсутністю сировинних джерел для виробництва тугоплавких легувальних матеріалів, а їх дефіцит поповнюється імпортними поставками [3–5].

Ситуація, що склалася з утворюваними відходами та їх переробкою, характеризується низьким ступенем використання коштовних дефіцитних рідкісних та тугоплавких елементів, а також відсутністю на практиці надійних технологій їх утилізації з техногенних відходів. Це, в свою чергу, знижує ефективність виробництва металопродукції [6].

У разі використання дрібнодисперсних оксидних відходів, не забруднених супутніми домішками сірки і фосфору, економічно доцільна металізація в гетерогенній системі без появи рідких фаз [1, 7].

У випадку використання забруднених супутніми шкідливими домішками відходів, як правило, здійснюється рафінувальна плавка, як, наприклад, утилізація коштовних елементів та заліза з техногенних відходів (окалина, пилю, шламу та ін.) у рамках проекту ZEWA [8] та виробництво лігатур і сплавів на основі різних техногенних відходів та залізородної сировини методом відновлення оксидів металів у залізо-вуглецевому розплаві [9].

Основним способом одержання та використання забрудненої вторинної сировини з відходів є рафіну-

вальна плавка в системі рідкофазних реакцій з застосуванням шлакоутворювачів, інертних газів, вакууму та їх поєднання. Однак такі способи утилізації легувальних елементів не забезпечують очікуваної на практиці ефективності, що обумовило вирішення проблем підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження з техногенних відходів та покращення їх якості [10].

У даній роботі, присвяченій підвищенню ступеня використання тугоплавких елементів у металургії, їх отриманню і використанню у виробництві спеціальних сталей і сплавів, перевага віддана переробці металовмісних легованих відходів методом рафінувальної плавки в середовищі з надлишковим вмістом розкиснювача [11–14]. Це пов'язано, перш за все, з тим, що технологічно процеси промислового виробництва і переробки металопродукції на сучасному етапі розвитку не виключають забруднення техногенних відходів супутніми неметалічними домішками. Такі відходи без попередньої рафінувальної обробки за чинними технологічними інструкціями не можуть повертатися як шихтові матеріали [10].

Інша важлива проблема підвищення ефективності використання металлооксидних легованих відходів – це ступінь наскрізного вилучення коштовних рідкісних і тугоплавких елементів з метою зменшення окиснювального потенціалу розплаву сталі при використанні сплаву для легування і розкиснення швидкорізальних сталей типу СіР, що випускається по ТУ 14-437-87-90.

Матеріали та методика проведення досліджень

У роботі було використано матеріали промислових результатів виплавки та застосування сплаву типу СіР для легування та розкиснення сталі [12].

Завдання комплексного легування з одночасною утилізацією металургійних відходів досягається тим, що шихта включає металевий порошок і матеріал, що містить оксиди легувальних елементів, подрібнений феросиліцій і/або металевий кремній, а також додатково містить окалину і/або стружку сталей, високолегованих хромом, а як матеріал, що містить оксиди легувальних елементів, – окалину швидкорізальних сталей.

З метою досягнення оптимальних властивостей цільового продукту з урахуванням комплексного впливу складу шихти на економію від використання сплаву для легування та розкиснення сталей використовувався регресійний аналіз [15].

Теорія та аналіз отриманих результатів

Фактори, що досліджувалися в роботі, занесені в таблицю 1.

Дослідивши взаємозв'язок процесів експериментально, можна побудувати функціональний зв'язок між ними і з деякою вірогідністю планувати майбутні події. Загальне зниження собівартості, яке залежить від багатьох факторів, можна описати за допомогою нелінійної множинної регресії. Оцінки коефіцієнтів регресійної моделі знаходимо за допомогою МНК (методу найменших квадратів) у матричній формі.

У результаті було одержано математичну модель, що має такий вигляд:

$$y = 63,4631 - 10,2418 \ln x_1 - 0,1719x_2 - 0,0805x_3 + 0,0007(x_4)^2 + 0,0176x_5, \quad (1)$$

де y – загальне зниження собівартості переділу виплавки сталі з використанням сплаву, %, x_1 – окалина швидкорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 (суміш), x_2 – окалина сталей, високолегованих хромом 95Х18 та Х23 (суміш); x_3 – стружка сталей, високолегованих хромом 95Х18 та Х23 (суміш); x_4 – металевий порошок (шліфувальний пил силової обробки сталі Р6М5 та Р6М5Ф3); x_5 – витрати ферохрому при виплавці сталі з використанням сплаву, кг/т.

При побудові структури регресії, з одного боку, потрібно включити в регресію всі фактори, які мають суттєвий статистичний вплив на показник, а з іншого

боку, потрібно, щоб була виконана умова лінійної незалежності між факторами, тобто відсутність мультиколінеарності для ефективного застосування МНК. Методом Фаррара-Глобера досліджуємо в моделі (1) присутність мультиколінеарності. Перевірка за допомогою тесту χ^2 показала, що з надійністю $p = 0,95$ існує загальна мультиколінеарність.

При побудові структури регресії, з одного боку, потрібно включити в регресію всі фактори, які мають суттєвий статистичний вплив на показник, а з іншого боку, потрібно, щоб була виконана умова лінійної незалежності між факторами, тобто відсутність мультиколінеарності для ефективного застосування МНК. Методом Фаррара-Глобера досліджуємо в моделі (1) присутність мультиколінеарності. Перевірка за допомогою тесту χ^2 показала, що з надійністю $p = 0,95$ існує загальна мультиколінеарність.

Таблиця 1 – Досліджувані техніко-економічні показники виробництва сплаву для легування та розкиснення швидкорізальних сталей

№ пихти	Фактор					
	Окалина швидкорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 (суміш), % мас.	Окалина сталей, високолегованих хромом 95Х18 та Х23 (суміш), % мас.	Стружка сталей, високолегованих хромом 95Х18 та Х23 (суміш), % мас.	Металевий порошок (шліфувальний пил силової обробки) сталі Р6М5 та Р6М5Ф3), % мас.	Витрати ферохрому при виплавці сталі з використанням сплаву, кг/т сталі	Загальне зниження собівартості переділу виплавки сталі з використанням сплаву, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	15	0	44	32	13,2	32,6
2	15,5	0	44	30	13,2	32,5
3	16	0	44	28	13,2	32,4
4	16,5	0	43,5	27,5	13,35	32,1
5	17	0	43	27	13,5	31,8
6	17,5	0	42,5	26,5	13,6	31,5
7	18	0	42	26	13,7	31,3
8	19	0	41,5	25	13,8	31,05
9	20	0	41	24	13,9	30,8
10	21,5	0	40	22	13,95	29,4
11	23	0	39	20	14	28
12	24,5	2	38,5	20	13,95	27,65
13	26	4	38	20	13,9	27,3
14	27	5	37	16	13,9	26,4
15	28	6	36	12	13,9	25,5
16	29	8,5	34,5	10,5	13,75	24,9
17	30	11	33	9	13,6	24,3
18	33	12	29	3	14,4	23,6
19	38	13	20	2	15,5	22,6
20	49	12	0	8	17,8	22,1
21	52	10	0	5	18,1	21,5
22	55	8	0	2	18,2	21,3
23	56	7,5	0	0,5	0	21,2
24	56	7,3	0	0,2	0	21
25	56	6,3	0	0,7	0	20,9

З вигляду кореляційної матриці було зроблено висновки, що між факторами x_1 та x_3 існує тісний зв'язок. Оскільки вплив на показник y фактора x_1 більш значущий ($r_{yx3} = 0,89$, $r_{yx1} = 0,98$), то із регресії вилучаємо фактор x_3 для усунення мультиколінеарності.

Нова математична модель набула вигляду:

$$\ln y = 4,0426 - 0,2366 \ln x_1 - 0,0064 x_2 + 0,0001(x_4)^2 + 0,0014 x_5. \quad (2)$$

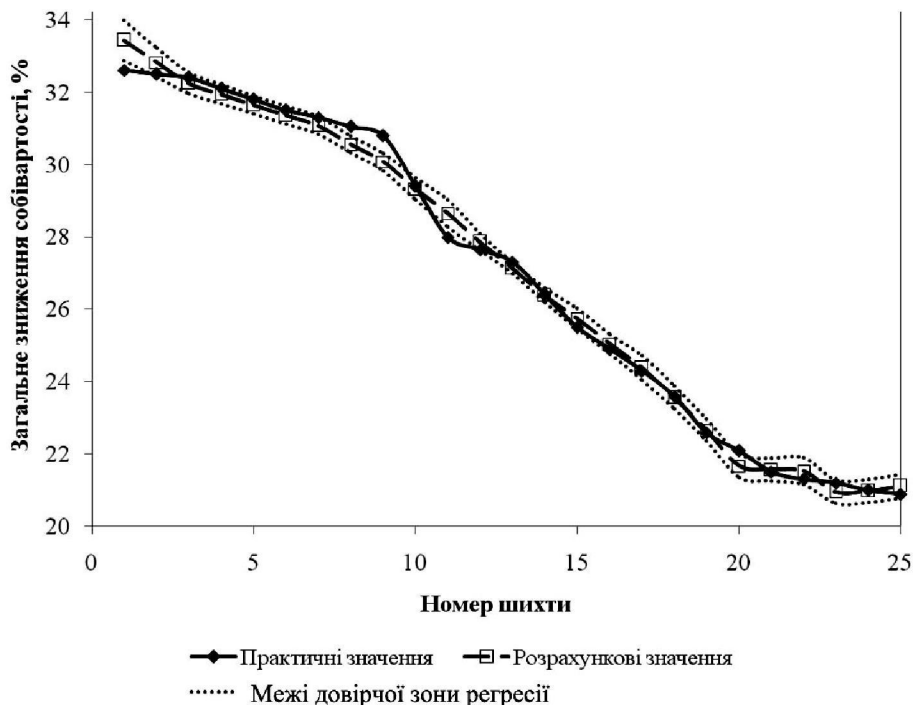


Рис. 1. Практичні та розраховані значення загального зниження собівартості з зазначенням верхньої та нижньої межі 95 % довірчої зони регресії

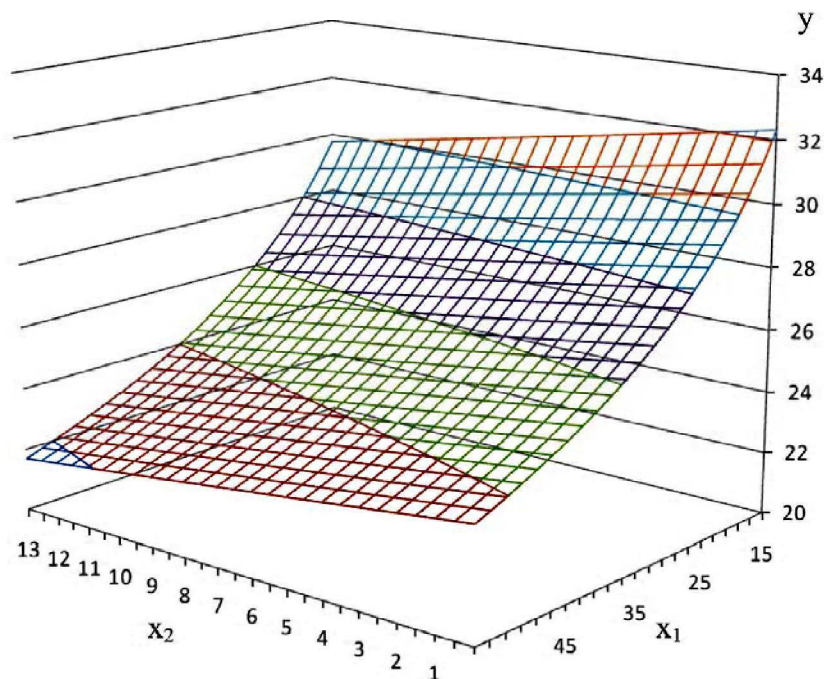


Рис. 2. Залежність загального зниження собівартості переділу виплавки сталі з використанням сплаву для легування та розкиснення (y) від вмісту у складі шихти суміші окалини швидкорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 (x_1) та суміші окалини сталей, високолегованих хромом, 95Х18 та Х23 (x_2)

Перевірка за допомогою тесту χ^2 показала, що мультиколінеарність залишилася, але значно зменшилася: на 51,7 % порівняно з попереднім випадком.

t -тест на значимість коефіцієнтів регресії показав, що всі параметри регресії значимі, тобто жодний із факторів не можна вилучати з регресії.

Згідно з перевіркою за допомогою критерію Фішера одержана модель адекватна статистичним даним ($F = 1003,66$, $F_{крит} = 2,87$).

Коефіцієнти регресії при надійності $p = 0,95$ знаходяться в таких межах:

$$\begin{aligned} 3,9101 < \beta_0 < 4,1751, \\ -0,2703 < \beta_1 < -0,2029, \\ -0,0090 < \beta_2 < -0,0037, \\ 0,00005 < \beta_4 < 0,00013, \\ 0,0014 < \beta_5 < 0,0014. \end{aligned}$$

Значення Y та довірчі інтервали для регресії зазначені на рис. 1, з якого маємо графічне підтвердження розрахункових значень, що одержана модель задовільно відповідає практичним даним.

Для наочного аналізу одержаної моделі зображено у вигляді поверхонь на рис. 2–4 відповідно три найбільш вагомні з практичної точки зору частинні залежності з закріпленням інших параметрів: $y_1 = f(x_1, x_2) - x_4 = 25$ % мас., $x_3 = 13,95$ кг/т; $y_2 = f(x_1, x_4) - x_2 = 12$ % мас., $x_3 = 13,95$ кг/т; $y_3 = f(x_4, x_5) - x_1 = 26$ % мас., $x_2 = 12$ % мас.

Проведена робота дозволяє виявити оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів вихідних матеріалів з подальшою оптимізацією складу шихти і зниженням собівартості цільового продукту з урахуванням вже досягнутих результатів даного напрямку. При цьому одночасно враховується вплив одразу чотирьох факторів на зниження собівартості цільового продукту. За допомогою поверхонь, зображених на рис. 2–4, можливо візуально прослідкувати комплексний вплив факторів і вирахувати оптимальні умови для підвищення економії при виплавці сталі. Виходячи з аналізу побудованої моделі, для забезпечення високої якості сплаву для легування та розкиснення сталі з найбільш вигідним вмістом легувальних елементів у ньому, що дає значне зниження собівартості виплавки сталі, оптимальні області техніко-економічних показників набувають таких значень (табл. 2).

Встановлена висока техніко-економічна ефективність використання досліджуваного легувального матеріалу при виплавці швидкорізальних сталей, де витрати хрому та хрому металічного знизилися з 18,5–28,1 та 13,2–20,3 до 13,7–18,2 та 8,9–12,5 кг на 1 тону виплавленої сталі відповідно. При виплавці сталі Р6М5К5-МП у результаті присадки 45...70 кг/т сплаву масова витрата хрому знизилася на 2...3 %, молібдену – на 3...4 %, вольфраму – на 30...36 % і ванадію – на 7...8 %.

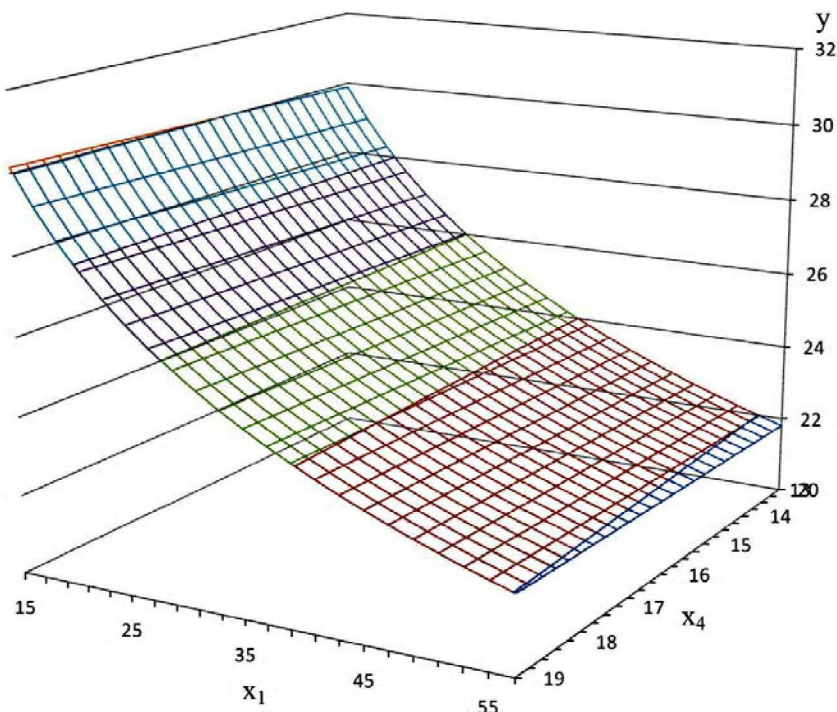


Рис. 3. Залежність загального зниження собівартості переділу виплавки сталі з використанням сплаву для легування та розкиснення (y) від вмісту у складі шихти суміші окалини швидкорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 (x_1) та металевого порошку (шліфувального пилу силової обробки) сталі Р6М5 та Р6М5Ф3 (x_4)

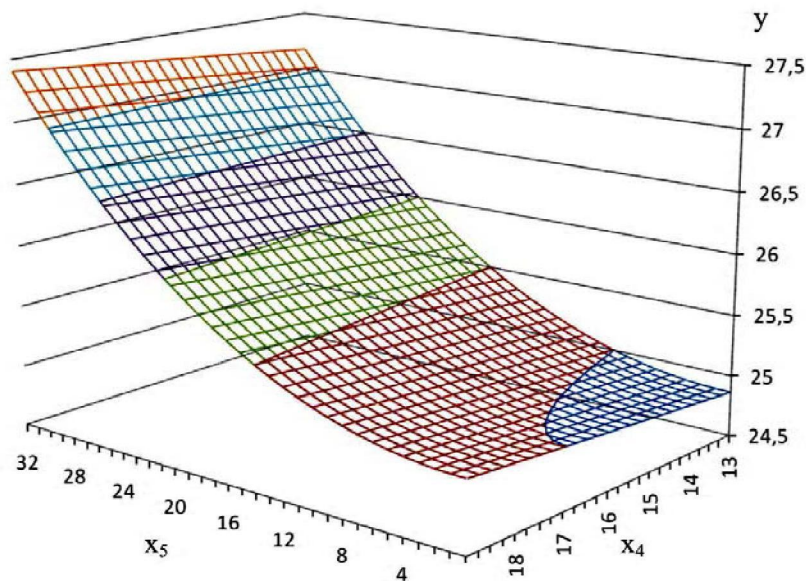


Рис. 4. Залежність загального зниження собівартості переділу виплавки сталі з використанням сплаву для легування та розкиснення (y) від вмісту у складі шихти суміші металевого порошку (шліфувального пилу силової обробки) сталі Р6М5 та Р6М5Ф3 (x_4) та витрат феррохрому (x_5), кг/т сталі

Таблиця 2 – Оптимальні області вмісту досліджуваних складників шихти для виплавки сплаву для легування та розкиснення сталей (x_1, x_2, x_4) та витрат феррохрому при виплавці сталі (x_5)

Межі оптимальних значень факторів	Окалина швидкокорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 (суміш), % мас.	Окалина сталей, високолегованих хромом 95Х18 та Х23 (суміш), % мас.	Металевий порошок (шліфувальний пил силової обробки) сталі Р6М5 та Р6М5Ф3, % мас.	Витрати феррохрому при виплавці сталі з використанням сплаву, кг/т сталі
	x_1	x_2	x_4	x_5
Min	26	4	2	13,9
Max	38	13	20	15,5

Висновки

Проведена робота з побудови математичної моделі дозволила виявити та дослідити оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів, в результаті чого виявлено можливість підвищення якості сплаву для легування та розкиснення сталі з найбільш вигідним вмістом легувальних елементів у ньому та зниження собівартості виплавки сталі з його використанням. Оптимальний вміст суміші окалини швидкокорізальних сталей Р6М5 та Р6М5Ф3 знаходиться в межах 26...38 % мас., вміст суміші окалини сталей, високолегованих хромом, 95Х18 та Х23 – 4...13 % мас., вміст металевого порошку (шліфувального пилу силової обробки) сталі Р6М5 та Р6М5Ф3 – 2...20 % мас., витрат феррохрому при виплавці сталі з використанням сплаву – 13,9...15,9 кг/т сталі, що дозволило оптимізувати межі витратних коефіцієнтів. Значна економія коштовних легувальних елементів при виплавці швидкокорізальних сталей з застосуванням досліджуваного сплаву підтверджує інноваційну доцільність виробництва нового легувального матері-

алу в Україні та його використання в металургії спеціальних сталей.

Список літератури

1. Острик П. Н. Металлургия губчатых и порошковых лигатур / П. Н. Острик, М. М. Гасик, В. Д. Пирог. – К. : Техника, 1992. – 128 с.
2. Григорьев С. М., Пивень А. Н., Архипенкова Е. Н. Совершенствование методики экономической оценки технических решений по получению материалов из вторичного сырья. – Цветные металлы. – 1992. – № 4. – С. 7–9.
3. Гриценко С. Г. Состояние ферросплавной промышленности Украины в 2003–2006 гг. / С. Г. Гриценко // Сталь. – 2007. – № 11. – С. 96–99.
4. Производство ферросплавов в мире и России / [Леонтьев Л. И., Жучков В. И., Смирнов Л. А. и др.] // Сталь. – 2007. – № 3. – С. 43–47.
5. Лейтман М. С. Тугоплавкие металлы : состояние рынка и перспективы применения в России / Лейтман М. С. // Сталь. – 2008. – № 3. – С. 47–50.
6. Ковалев А. М. Некоторые физико-химические закономерности восстановления окалины прецизионного сплава 79МН / А. М. Ковалев, С. М. Григорьев //

- Черные металлы. – 2007. – № 10. – С. 8–10.
7. Восстановление железа из железоуглеродистых брикетов при плавке стали в дуговых электропечах / [А. Б. Ахметов, С. О. Байсанов, Р. Ш. Ахтанова и др.] // *Сталь*. – 2007. – № 8. – С. 39–42.
 8. ZEWA – Новый металлургический процесс для производства ценных материалов из промышленных отходов / [А. Фляйшандерль, У. Женнари, Ж. Борле и др.] // *Черные металлы*. – 2005. – № 6. – С. 33–40.
 9. Технология получения лигатур и сплавов из железорудного сырья и оксидсодержащих материалов // [В. Л. Найдек, В. Н. Костяков, Е. Б. Полетаев и др.] // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2003. – № 3. – С. 84–85.
 10. Григорьев С. М. Экономическая стратегия и тактика ресурсо- и энергосбережения в металлургии тугоплавких материалов // Сб. «Металлургия». Вып. 1. – Запорожье : ЗГИА. – 1998. – С. 17–23.
 11. Григорьев С. М. Оптимизация технологических параметров получения и использования сплавов для легирования и раскисления быстрорежущих сталей / С. М. Григорьев, А. С. Петрищев // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2008. – № 1. – С. 61–66.
 12. Пат. 19114 Украина. Шихта для получения сплава для легирования и раскисления стали / [С. М. Григорьев, М. П. Ревун, А. Н. Пивень и др.]. – № 4807379/SU ; заявл. 22.09.93 ; опубл. 1997 г., Открытия. Изобретения. – № 6. – С. 14–15.
 13. Пат. 18705 Украина. Шлакообразующая смесь / [С. М. Григорьев, М. П. Ревун, А. Н. Пивень и др.]. – № 4924938/SU ; заявл. 14.01.91 ; опубл. 1997 г., Открытия. Изобретения. – № 6. – 3 с.
 14. Григор'єв С. М. Рентгеноструктурний фазовий аналіз та мікроскопічне дослідження при одержанні сплаву для легування та розкислення швидкокорізальної сталі / Григор'єв С. М., Петрищев А. С. // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2009. – № 1. – С. 42–45.
 15. Лук'яненко І. Г. Економетрика / Лук'яненко І. Г., Краснікова Л. І. – К. : Товариство «Знання», КОО, 1998. – 494 с.

Одержано 02.02.2011

Григорьев С.М., Петрищев А.С., Шишканова А.А. Оптимизация технико-экономических показателей технологии производства сплава «СИР»

Выполнена разработка и оптимизация многофункциональной системы зависимостей технико-экономических показателей производства сплава для легирования и раскисления быстрорежущих сталей на основе техногенных отходов. Найдены и исследованы оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов, в результате чего обнаружена возможность повышения качества сплава для легирования и раскисления стали с наиболее выгодным содержанием легирующих элементов в нем и снижения себестоимости выплавки стали с его использованием.

Ключевые слова: *технико-экономические показатели, техногенные отходы, легирование, сталь, математическая модель, себестоимость, легирующие элементы.*

Grigor'ev S., Petryshchev A., Shyshkanova G. Optimization of technical and economic indexes of the alloy «SIR» production technology

The development and optimization of multifunctional system of technical and economical indexes dependencies alloy production for rapid steels based on technogenic waste alloying and deoxidation was made.

Technical and economical indexes and discharge coefficient optimum areas were found and researched, as a result the possibility of quality increasing for steel alloying and deoxidation with most advantageous content of alloying elements and steel melting cost decreasing was found.

Key words: *technical-and-economical indexes, a technogenic waste, alloying, steel, mathematical model, cost price, alloying elements.*