
УДК 669.28:519/87

А. С. Петрищев

Национальный технический университет, г. Запорожье

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ОКАЛИНЫ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

Выполнена разработка и оптимизация многофункциональной системы зависимостей технико-экономических показателей металлизации окалины быстрорежущих сталей. Определены и исследованы оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов, в результате чего выявлена возможность повышения качества полученного материала с наиболее выгодным содержанием легирующих элементов в нем и снижение себестоимости выплавки стали с его использованием.

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

Введение

Известно, что более 80 % [1], а по данным работы [2], около 95 % тугоплавких редких металлов используется для легирования стали. С этой точки зрения наиболее материалоемким классом являются легированные инструментальные и быстрорежущие стали. Установлено, что степень использования легирующих элементов в порошковом производстве быстрорежу-

щих сталей не превышает 80 %, а в процессе выплавки быстрорежущей стали в открытых дуговых печах этот показатель значительно меньше, так как выход годного находится на уровне 36–42 %. Основную долю отходов составляют обреш, окалина, пыль силового шлифования товарных заготовок, циклонная пыль и некондиционный порошок. При введении в жидкую ванную мелкодисперсных отходов без предваритель-

ной подготовки угар редких металлов достигает 40 %, а с окалиной при производстве мелкосортных товарных заготовок в лучшем случае теряется 12 % от объемов производимой продукции [3]. Утилизация является резервом снижения их себестоимости [4, 5].

Украина не имеет собственной минерально-сырьевой базы для производства легирующих материалов на основе редких и тугоплавких элементов. Потребность у них удовлетворяется импортными поставками с ближнего и дальнего зарубежья. Особенно эта проблема обострилась в последние года в связи со стремительным ростом цен на них на мировом рынке потребления [6]. Поэтому разработка отечественных ресурсо- и энергосберегающих технологий молибден- и вольфрамсодержащих сплавов и лигатур, тем более с параллельной утилизацией немобильных отходов (окалина быстрорежущих сталей) представляет не только научный, но, прежде всего, практический промышленный интерес [7].

Комплекс исследований и результат внедрения технологий предварительной подготовки техногенных отходов с получением на их основе нетрадиционных легирующих и раскисляющих материалов [7, 8] и последующим использованием при выплавке инструментальных и быстрорежущих сталей позволили установить ряд закономерностей. Выявлено, что наибольшую сложность при возврате в сталеплавильное производство создает группа металлооксидных и мелкодисперсных отходов, отличающихся формой присутствия ведущих легирующих элементов, развитой поверхностью реагирования и высокой степенью загрязнения сопутствующими вредными примесями.

В случае использования мелкодисперсных оксидных отходов, не загрязненных сопутствующими примесями серы и фосфора, экономически целесообразна металлизация в гетерогенной системе без появления жидких фаз [1, 9].

Цель работы – разработка технологии получения металлизированной окалины быстрорежущих сталей и ее использование при выплавке стали, а конкретные задачи данного этапа исследований состояли в построении и оптимизации многофункциональной модели системы зависимостей технико-экономических показателей металлизации окалины быстрорежущих сталей.

Материалы и методика проведения исследований

В работе были использованы материалы активного промышленного эксперимента металлизации окалины быстрорежущих сталей и применение полученного материала для легирования специальных сталей.

Задача комплексного легирования с одновременной утилизацией металлургических отходов достигается тем, что шихта включает окалину быстрорежущих сталей (Р6АМ5, Р6М5К5, Р6М5Ф3) с углеродным восстановителем с добавлением молибденового, соответственно ТУ 14-5-88-77, и вольфрамового, соот-

ветственно ГОСТ 213-83, оксидных концентратов.

С целью достижения оптимальных свойств целевого продукта с учетом комплексного влияния состава шихты на экономико от использования металлизированного сырья для легирования сталей использовался регрессионный анализ [10].

Теория и анализ полученных результатов

Факторы, которые исследовались в работе, занесены в таблицу 1.

Исследована взаимосвязь процессов и экспериментально построена функциональная зависимость, что позволило с некоторой достоверностью использовать ее в планировании ожидаемых технико-экономических показателей. Общее снижение себестоимости, которое зависит от многих факторов, можно описать с помощью нелинейной множественной регрессии. Оценки коэффициентов регрессионной модели находим с помощью МНК (метода наименьших квадратов) в матричной форме. В результате была получена математическая модель, которая имеет следующий вид:

$$y = -26,3984 - 0,0011(x_1)^2 + 4,1362 \ln x_2 + 1,13 \cdot 10^{-9}(x_3)^3 - 0,2629 \ln x_4 + 0,2117 x_5, \quad (1)$$

где y – повышение степени усвоения легирующих элементов, %, x_1 – массовое соотношение окалины и концентратов Мо и W; x_2 – скорость нагрева шихты, °C/мин; x_3 – температура нагрева шихты, °C; x_4 – время выдержки шихты при температуре тепловой обработки, ч; x_5 – степень восстановления оксидов металлов, %.

При построении структуры регрессии, с одной стороны, нужно включить в регрессию все факторы, которые имеют существенное статистическое влияние на показатель, а с другой стороны, нужно, чтобы было выполнено условие линейной независимости между факторами, то есть отсутствие мультиколлинеарности для эффективного применения МНК. Методом Фаррара-Глобера исследуем в модели (1) присутствие мультиколлинеарности. Проверка по помощи теста χ^2 показала, что с надежностью $p = 0,95$ существует обшая мультиколлинеарность.

Из вида корреляционной матрицы был сделан вывод, при котором между факторами x_2 и x_4 существует тесная связь. Поскольку влияние на показатель y фактора x_2 более значительное ($r_{yx_2} = 0,70$, $r_{yx_4} = 0,68$), то из регрессии исключаем фактор x_4 для устранения мультиколлинеарности.

С учетом преобразований математическая модель приобретает следующий вид:

$$y = -25,6379 - 0,0007(x_1)^2 + 3,8723 \ln x_2 + 3,29 \cdot 10^{-10}(x_3)^3 + 0,2166 x_5, \quad (2)$$

Проверка при помощи теста χ^2 показала, что мультиколлинеарность осталась, но значительно уменьшилась: на 27,6 % в сравнении с предыдущим случаем.

Таблиця 1 – Исследуемые технико-экономические показатели производства металлизированной окалины быстрорежущих сталей

№ Номер шихты	Фактор					
	Массовое соотношение окалины и концентратов Мо и W	Скорость нагрева шихты, °C/мин	Температура нагрева шихты, °C	Время выдержки шихты при температуре тепловой обработки, ч	Степень восстановления оксидов металлов, %	Повышение степени усвоения легирующих элементов, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
1	36,5	6	1350	7	99,7	3
2	35,75	6	1335	7	99,7	3
3	35	6	1320	7	99,7	3
4	34,2	6,5	1305	6,8	99,55	3
5	33,4	7	1290	6,6	99,4	3
6	33,35	7,5	1285	6,55	99,2	3,25
7	33,3	8	1280	6,5	99	3,5
8	30,15	8	1250	6	98,8	4
9	27	8	1220	5,5	98,6	4,5
10	24,15	8,5	1185	5	98,5	4,5
11	21,3	9	1150	4,5	98,4	4,5
12	18,85	9	1125	3,75	98,35	4,5
13	16,4	9	1100	3	98,3	4,5
14	13,1	9,5	1075	2,75	98,15	4,5
15	9,8	10	1050	2,5	98	4,5
16	7,7	10,5	1025	2,25	97,85	4,5
17	5,6	11	1000	2	97,7	4,5
18	4,25	11,5	975	1,75	97,65	5,25
19	2,9	12	950	1,5	97,6	6
20	2,85	12,5	945	1,45	95,9	5,5
21	2,8	13	940	1,4	94,2	5
22	2,75	13,5	920	1,3	92,15	4,75
23	2,7	14	900	1,2	90,1	4,5
24	2,65	14	875	1,2	88,8	4
25	2,6	14	850	1,2	87,5	3,5

t-тест на значимость коэффициентов регрессии показал, что все параметры регрессии значимые, то есть ни один из факторов нельзя исключить из регрессии.

Согласно проверки при помощи критерия Фишера, полученная модель адекватна статистическим данным ($F = 31,709$, $F_{крит} = 2,87$).

Коэффициенты регрессии с надежностью $p = 0,95$ находятся в таких границах:

$$\begin{aligned} -39,6334 < \beta_0 < -11,6424, \\ -0,0040 < \beta_1 < 0,0027, \\ 0,2111 < \beta_2 < 7,5334, \\ -3,88 \cdot 10^{-9} < \beta_3 < 4,54 \cdot 10^{-9}, \\ 0,2100 < \beta_5 < 0,2231. \end{aligned}$$

Значение «*y*» и доверительные интервалы для регрессии указаны на рис. 1, из которого имеем графическое подтверждение расчетных значений, что полученная модель удовлетворительно соответствует практическим данным.

Для наглядного анализа полученной модели построены три наиболее значимых с практической точки зрения частичные зависимости в виде поверхностей на рис. 2–4 с закреплением некоторых параметров:

$$\begin{aligned} y_1 = f(x_1, x_2) - x_3 = 945 \text{ } ^\circ\text{C}, x_5 = 95,9 \text{ } \%; \\ y_2 = f(x_1, x_3) - x_2 = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}, x_5 = 95,9 \text{ } \%; \\ y_3 = f(x_3, x_5) - x_1 = 5,6, x_2 = 10 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{мин}. \end{aligned}$$

Проведенная работа позволяет выявить оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов исходных материалов с дальнейшей оптимизацией технологических параметров и состава шихты и снижением потерь легирующих элементов в процессе восстановления и при выплавке сталей с использованием металлизированного сырья с учетом уже достигнутых результатов данного направления. При этом одновременно учитывается влияние сразу четырех факторов на снижение себестоимости целевого продукта.



Рис. 1. Практические и расчетные значения общего снижения себестоимости с обозначением верхней и нижней границы 95 % доверительной зоны регрессии

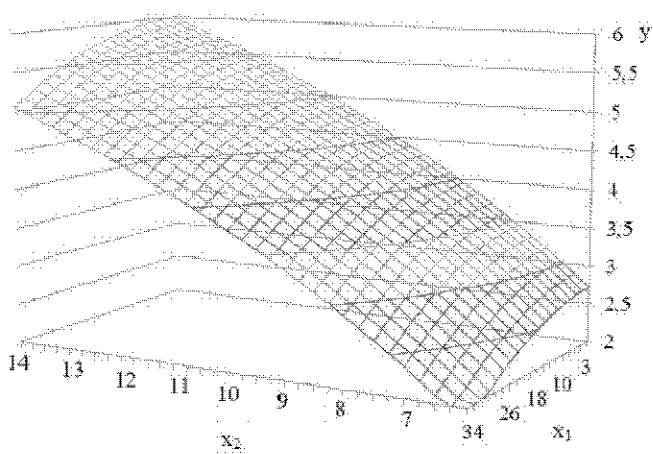


Рис. 2. Зависимость повышения степени усвоения легирующих элементов с использованием металлизированного вторичного сырья (y) от массового соотношения окалины и концентратов Мо и W в шихте (x_1) и скорости нагрева шихты (x_2)

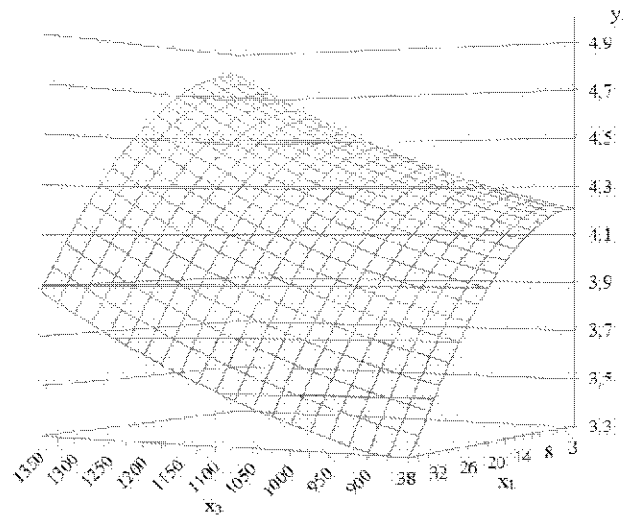


Рис. 3. Зависимость повышения степени усвоения легирующих элементов с использованием металлизированного вторичного сырья (y) от массового соотношения окалины и концентратов Мо и W в шихте (x_1) и температуры нагрева шихты (x_3)

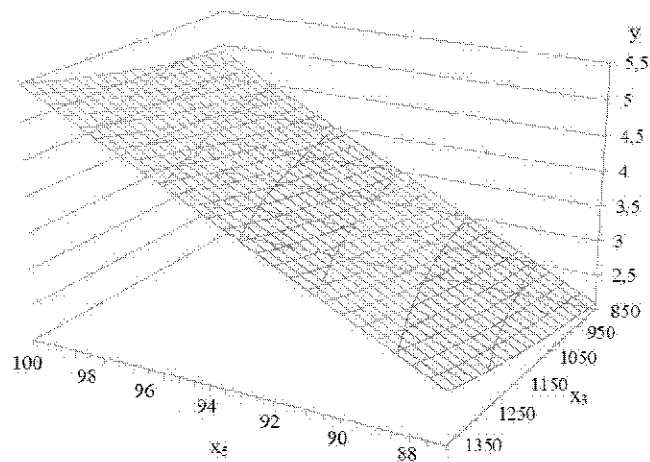


Рис. 4. Зависимость повышения степени усвоения легирующих элементов с использованием металлизированного вторичного сырья (y) от температуры нагрева шихты (x_3) и степени восстановления оксидов металлов (x_2)

С помощью поверхностей, изображенных на рис. 2–4, возможно визуально проследить комплексное влияние факторов и высчитать оптимальные условия для повышения экономии при выплавке стали. Исходя из анализа построенной модели, для обеспечения высокого качества металлизированной окалины с наиболее выгодным содержанием легирующих элементов в ней, что дает значительное снижение себестоимости выплавки стали, оптимальные области технико-экономических показателей принимают следующие значения (табл. 2).

Установленная высокая технико-экономическая эффективность использования исследуемого легирующего материала при выплавке быстрорежущих сталей.

Таблица 2 – Оптимальные области исследуемых технико-экономических показателей получения и использования металлизированной окалины быстрорежущих сталей с добавлением молибденового и вольфрамового оксидных концентратов (x_1, x_2, x_3, x_5)

Границы оптимальных значений факторов	Массовое соотношение окалины и концентратов Мо и W	Скорость нагрева шихты, °С/мин	Температура нагрева шихты, °С	Степень восстановления оксидов металлов, %
	x_1	x_2	x_3	x_5
Min	2,7	9	1100	94
Max	9,8	13	1280	98

Выводы

Построенная математическая модель позволила установить и исследовать оптимальные области технико-экономических показателей и расходных коэффициентов, в результате чего выявлена возможность повышения качества металлизированной окалины быстрорежущих сталей с наиболее выгодным содержанием легирующих элементов в ней и повышения степени усвоения легирующих элементов с использованием металлизированного вторичного сырья. Оптимальное массовое соотношение окалины и концентратов Мо и W в шихте находится в пределах 2,7... 9,8, скорость нагрева шихты – 9... 13 °С/мин, температура нагрева шихты – 1100... 1280 °С, степень восстановления оксидов металлов – 94–98 %, что позволило оптимизировать параметры расходных коэффициентов. Значительная экономия ценных легирующих элементов при выплавке быстрорежущих сталей с применением исследуемого металлизированного сырья подтверждает инновационную целесообразность производства нового легирующего материала в Украине и его использование в металлургии специальных сталей.

Список литературы

1. Гасик М. И. Теория и технология производства ферросплавов / Гасик М. И., Лякишев Н. П., Емлин Б. И. – М. : Металлургия. – 1988. – 784 с.
2. Рысс М. А. Производство ферросплавов. – М. : Металлургия, 1975. – 272 с.
3. Григорьев С. М. Извлечение тугоплавких элементов из

При завалке брикетов из металлизированной окалины россыпью и в капсулах в количестве 150–320 кг/т усвоение легирующих элементов было (в среднем, % масс.): Cr – 95,3; W – 97,9; Mo – 96,7 соответственно. Наблюдалось некоторое повышенное шлакообразование для переплавленного способа получения порошковой быстрорежущей стали, однако в пределах требований технологической инструкции. Повышенное относительно завалки брикетов россыпью усвоение легирующих элементов при введении их в капсулах связано со снижением окислительного потенциала в связи с понижением прямого контакта брикетов с окислительной средой печи [7].

- окалины быстрорежущей стали / Григорьев С. М. // Сталь. – 1994. – № 3. – С. 63–66.
4. Пивень А. Н. Экономическая эффективность утилизации редких металлов из окалины быстрорежущих сталей / А. Н. Пивень, С. М. Григорьев // Цветные металлы. – 1993. – № 3. – С. 10–11.
5. Григор'єв С. М. Оптимізація показників економіко-математичної моделі виробництва сплаву для легування та розкиснення швидкорізальних сталей / Григор'єв С. М., Петрищев А. С. // Держава та регіони. – Запоріжжя : КПУ. – 2011. – № 1. – С. 39–43.
6. Керкхофф Х. Ю. Взрыв цен на сырье – угроза экономическому подъему / Х. Ю. Керкхофф // Черные металлы. – 2010. – № 10. – С. 61–66.
7. Григорьев С. М. Особенности фазовых и структурных превращений при металлизации окалины быстрорежущей стали / Григорьев С. М., Петрищев А. С. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
8. Григорьев С. М. Оптимизация технологических параметров получения и использования сплавов для легирования и раскисления быстрорежущих сталей / Григорьев С. М., Петрищев А. С. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 61–66.
9. Восстановление железа из железоуглеродистых брикетов при плавке стали в дуговых электропечах / [Ахметов А. Б., Байсанов С. О., Ахтанова Р. Ш. и др.] // Сталь. – 2007. – № 8. – С. 39–42.
10. Лук'яненко І. Г. Економетрика / Лук'яненко І. Г., Краснікова Л. І. – К. : Товариство «Знання», КОО, 1998. – 494 с.

Одержано 29.09.2011

Петрищев А.С. Оптимізація техніко-економічних показників технології металізації окалини швидкорізальних сталей

Виконано розробку та оптимізацію багатofункціональної системи залежностей техніко-економічних показників металізації окалини швидкорізальних сталей. Знайдено та досліджено оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів, у результаті чого виявлено можливість підвищення якості одержаної сировини з найбільш вигідним вмістом легувальних елементів у ній та зниження собівартості виплавки сталі з його використанням.

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

Petryshchev A. Optimization of technical and economic indexes of fast-cutting steels scale metallization technologies

Development and optimisation of multipurpose system dependences of technical-and-economic indexes of scale of fast-cutting steels metallization was made. Optimum areas of technical-and-economic indexes and account factors and therefore possibility of improvement in quality of the received raw materials with the most favourable contents of alloying elements in it and lowerings steel smelting cost price with its use was discovered and examined.

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