

Оптимизация себестоимости стали

Проанализированы основные составляющие конвертерного процесса, которые влияют на себестоимость стали. Задача оптимизации кислородно-конвертерной плавки начала решаться практически с момента освоения этого передела. В работе был применён итерационный метод решения задачи линейного программирования. Исследования проводились в НТУУ «Киевский политехнический институт».

Ключевые слова: сталь, оптимизация, себестоимость стали, кислородно-конвертерный процесс, температура металла

Введение. Н. Н. Перевалов и О. В. Травин [1] показали, что в плавках, проведённых по оптимальной технологии, обеспечивается минимальная себестоимость стали. Это возможно в случае, если оптимизация приводит к увеличению выхода годной стали.

Фирма British Steel Corporation использовала для выплавки наиболее рентабельной нержавеющей стали систему с ЭВМ, позволившую оптимизировать состав шихты с наименьшими затратами [2].

В работе [3] применён итерационный метод решения задачи линейного программирования – минимизация целевой функции стоимости шихты.

Украинским государственным проектным институтом «Металлургавтоматика» (г. Днепропетровск) разработана и внедрена на металлургическом заводе «Электросталь» система автоматизированного расчёта шихты рационального состава и стоимости с использованием метода линейного программирования [4]. Расчёт производится для 30 марок стали с учётом наличия запаса шихтовых материалов и технологических ограничений по ресурсосберегающему критерию, снижающему удельные расходы материалов и энергоносителей.

Для тандема сталеплавильный агрегат – установка внепечной обработки стали путём минимизации целевой функции (сумма общих затрат и потерь на плавку) решена задача, оптимизирующая технико-экономические показатели (ТЭП). Составленный алгоритм управления технологическим процессом позволяет улучшить качество кислородно-конвертерной стали и снизить затраты на её производство [5].

Однако многогранность технологий процесса не позволила до настоящего времени решить поставленную задачу с высокой точностью.

Исследования, представленные в статье, проводились в НТУУ «Киевский политехнический институт» по темам «Принципы создания математической модели системы управления кислородным конвертером» и «Математические модели и алгоритмы системы управления кислородным конвертером», Государственные регистрационные номера 0109U001838 и 0110U002880.

Постановка задачи. Целью исследований является повышение качества управления плавкой за счёт выбора рационального критерия оптимизации.

Результаты исследований. Себестоимость единицы продукции аддитивно отражает все виды затрат: материальные, энергетические, трудовые и др. Основная часть затрат состоит из расходов на сырьё и материалы (82-88 %). Расходы по переделу и общезаводские составляют 10-15 %. Наибольшие затраты – на металлошихту, особенно на передельный чугун. Это объясняется тем, что последний является основной составляющей металлозагрузки и стоит в 1,1-1,5 раза дороже лома. Поэтому возникает необходимость в выборе оптимального соотношения чугуна и лома в шихте. Наименьшая стоимость металлошихты соответствует содержанию в ней лома 24-28 % от массы чугуна [6].

Как правило, для сведения теплового баланса используют охлаждающие добавки известняка или железной руды. При этом снижают массу перерабатываемого лома, что вызывает увеличение себестоимости стали. При избыточной массе загружаемого лома продувка протекает с отрицательным тепловым балансом. Дополнительный нагрев ванны осуществляют продувкой с увеличенным расстоянием торца фурмы над уровнем спокойной ванны, что приводит к возрастанию потери железа со шлаком и, следовательно, удорожанию стали.

Нами на Енакиевском металлургическом заводе исследовано влияние химсостава чугуна и металла на себестоимость стали, выплавленной в 160-тонном конвертере со смолодоломитомagneзитовой футеровкой. Выявлен оптимальный характер этих зависимостей и область их минимальных значений.

Малым массовым долям серы в чугуне (рис. 1), как правило, сопутствуют большие доли кремния, что сказывается на снижении выхода годного и, следовательно, отражается на повышении себестоимости стали (левая ветвь кривой). Минимум функции соответствует диапазону изменения аргумента 0,035-0,037 %. Восходящая правая ветвь кривой отражает увеличение затрат на шлакообразующие материалы.

На рис. 2 левая часть кривой характеризует повышение себестоимости стали вследствие уменьшения выхода годного и увеличения затрат на производство (на кислород и шлакообразующие). Увеличение себестоимости продукции для высокоуглеродистых сталей, объясняется, по-видимому, возрастанием

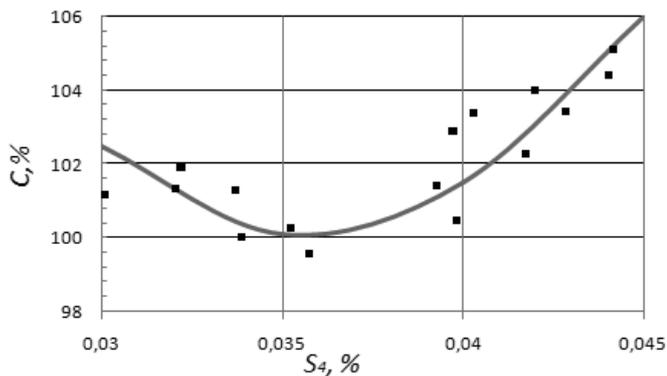


Рис. 1. Зависимость себестоимости стали от массовой доли серы в чугуне (коэффициент корреляционного отношения $\eta = 0,82$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,6 \%$, достоверность коэффициента $P > 0,95$)

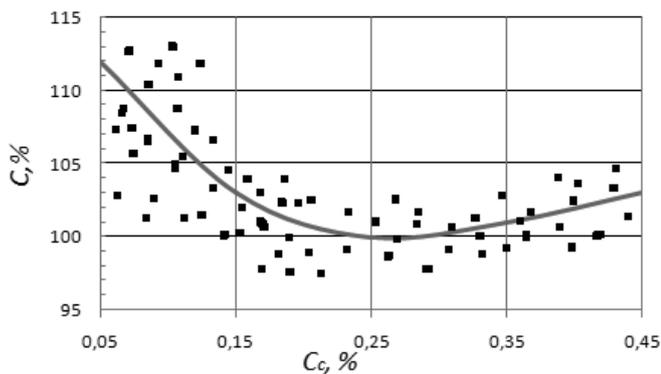


Рис. 2. Изменение себестоимости стали от массовой доли в ней углерода ($\eta = 0,73$, $\sigma = 1,85 \%$, $P > 0,95$)

трудоемкости производства (увеличивается число промежуточных повалок), что сказывается на снижении выхода годного. Наименьшая себестоимость стали наблюдается при выплавке среднеуглеродистых марок.

При увеличении производительности кислородно-конвертерного цеха на 1 % себестоимость стали снижается на 0,62 % [6]. Однако производительность процесса вступает в противоречие с качеством жидкой стали, определяемым её химсоставом и температурой. Передувка по углероду на 0,1 % вызывает повышение массовой доли кислорода на 0,008 % и дополнительный расход ферромарганца на 0,27 кг/т годной стали, что приводит к увеличению себестоимости продукции [7].

Более точное ведение процесса в результате автоматизации увеличивает число плавов, попадающих в заданные пределы по углероду и температуре. Это исключает корректировочные действия оператора, уменьшает расход сырья и улучшает качество металла.

К числу важнейших показателей, влияющих на себестоимость стали, относится стойкость футеровки конвертера, в сильной степени зависящая от температуры ванны, состава шлака, продолжительности продувки и простоя агрегата. Перегретые плавки приводят к увеличению износа футеровки за счёт повышения активности конечного шлака, что в итоге приводит к увеличению себестоимости стали (рис. 3). Холодные плавки также увеличивают себесто-

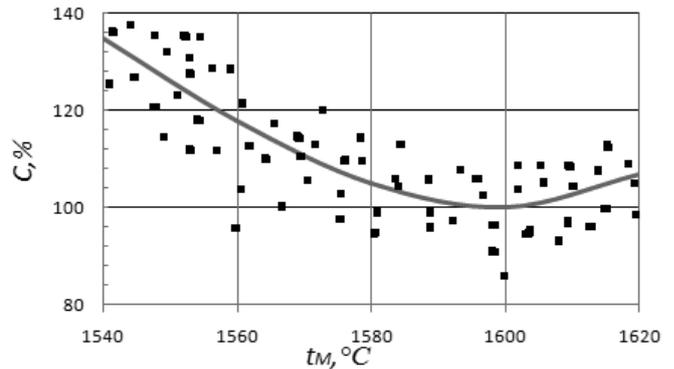


Рис. 3. Изменение себестоимости стали от температуры металла на первой повалке вследствие изменения стойкости футеровки конвертера ($\eta = 0,58$, $\sigma = 7,6 \%$, $P > 0,95$)

имость готового продукта, так как они, как правило, корректируются додувками при высоком положении фурменного наконечника над ванной с образованием большой массы железистых шлаков, снижающих стойкость футеровки конвертера.

Исследование влияния основности конечного шлака на себестоимость стали позволило нам установить наличие также оптимальной зависимости [8].

С повышением температуры металла уменьшается расход ферромарганца на плавку и его угар, что связано с падением сродства марганца к кислороду. Затраты на ферромарганец в себестоимости стали при этом снижаются (рис. 4). Однако уменьшение приращения себестоимости стали перекрывается более сильным возрастанием вследствие увеличения затрат на футеровку конвертера (рис. 3). Результирующий минимум себестоимости продукции при совместном рассмотрении этих факторов находится в районе 1600 °C.

Влияние параметров дутьевого режима и момента ввода шлакообразующих и охлаждающих материалов на ТЭП процесса рассмотрено в [9], характер целевой функции задачи оптимизации в [10], а связь параметров отходящих газов с ходом технологического процесса в [11].

Изменение себестоимости стали от различных параметров конвертерного процесса показывают, что все связи имеют нелинейный характер, однако в узком диапазоне изменения переменных, который

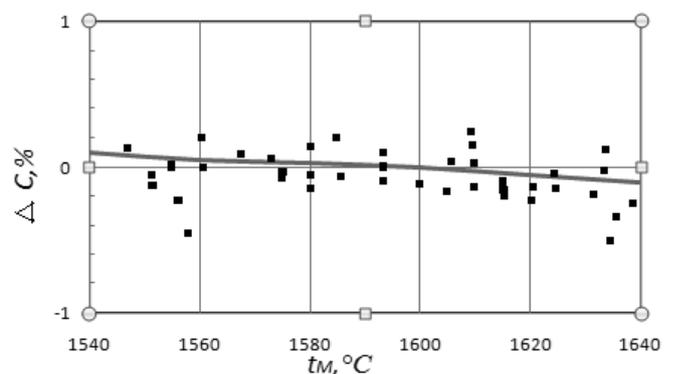


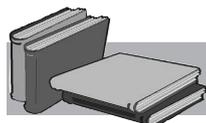
Рис. 4. Изменение приращения себестоимости стали от температуры металла первой повалке вследствие изменения массы ферромарганца на плавку (коэффициент корреляции $\rho = 0,687$, $\sigma = 0,17 \%$, $P > 0,95$)

имеет место в реальном процессе, данные зависимости можно представить в линейной форме. Это даёт возможность использовать аппарат линейного программирования для расчёта плавки в экстремальной постановке.

Выводы

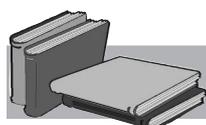
За последние годы наблюдается устойчивая тенденция к снижению себестоимости стали, что является следствием освоения проектной мощности агрегатов, дальнейшего совершенствования технологи-

ческого процесса, повышения стойкости футеровки конвертеров, применения средств механизации, автоматизации технологического процесса и управления им. АСУ ТП конвертерной плавки обеспечивает высокопроизводительную работу агрегатов, получение стали заданного состава и температуры, экономное расходование материалов и кислорода. Поэтому в качестве обобщенного критерия эффективности функционирования объекта с АСУ ТП принята себестоимость единицы продукции (целевая функция) требуемого качества при заданной производственной программе (ограничения).



ЛИТЕРАТУРА

1. *Перевалов Н. Н., Травин О. В.* О возможности оптимального управления конвертерным переделом // Теория металлургических процессов: Труды ЦНИИЧМ. – М.: Металлургия, 1965. – Вып. 40. – С. 5-26.
2. *Sutton D. W., Coates P.A.* Outline mixture calculation system for Stainless steel production by BSC stainless // Journal Operation Research Society. – 1981. – Vol. 32, № 3. – P. 165-172.
3. Автоматизация расчёта шихты оптимальной стоимости / А. И. Косырев, А. М. Дмитриев, А. И. Потехин и др. // Автоматизация и алгоритмизация сталеплавильных процессов: Труды МГМИ. – Магнитогорск: МГМИ, 1973. – Вып. 1. – С. 78-85.
4. Автоматизированный расчёт шихты рационального состава и стоимости / М. Е. Альперович, Ю. М. Белан, Н. Д. Комарова и др. // Чёрная металлургия: Бюл. НТИ. – 1986. – № 4. – С. 34-36.
5. А.с. 1258835 СССР, МКИ4 С 21 С 5/00. Способ управления технологическим процессом на участке сталеплавильные агрегаты – установки внепечной обработки стали.
6. Снижение себестоимости кислородно-конвертерной стали / Л. Г. Кацен, С. М. Буйневич, И. Д. Подопригора и др. – Донецк: Донбасс, 1972. – 93 с.
7. *Звагельский М. В.* Технично-экономическая эффективность системы автоматического управления кислородными конвертерами с применением УВМ / М. В. Звагельский, А. И. Никитин // Автоматизация в чёрной металлургии. – М.: Металлургия, 1971. – С. 210-215.
8. *Соболев С. К.* Влияние основности конечного шлака на себестоимость конвертерной стали / С. К. Соболев, В. С. Богушевский, Н. А. Сорокин // Экономическая эффективность автоматизации производственных процессов: Тр. Ин-та автоматизации. – К.: Ин-т автоматизации, 1975. – Вып. 3 – С. 134-138.
9. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
10. Керування киснево-конвертерною плавкою в замкнутому режимі / В. С. Богушевський, С. В. Жук, Є. К. Бондаренко, О. О. Капусняк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 5. – С. 76-83.
11. *Bogyshevskiy V. S.* Investigation of electrophysical properties of smelting products and their connection with engineering process / V. S. Bogyshevskiy, K. V. Egorov. – Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 109-114.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Perevalov N. N., Travin O. V.* (1965). O vozmozhnosti optimal'nogo upravlenija konvertjernym peredelom [Oh Opportunity optimal control converter control metallurgical processes]. Moskow: Metallurgija, no 40, pp. 5-26. [in Russian].
2. *Sutton D. W., Coates P.A.* (1981). [Outline mixture calculation system for Stainless steel production by BSC stainless]. Journal Operation Research Society, Vol. 32, no 3, pp. 165-172. [in English].
3. *Kosyrev A. I., Dmitriev A. M., Potehin A. I. et al.* (1973). Avtomatizacija raschjota shihty optimal'noj stoimosti [Automation and algorithmic processes steel: Proceedings MHMY]. Magnitogorok: MGMI, no 1, pp. 78-85. [in Russian].
4. *Al'perovich M. E., Belan Ju. M., Komarova N. D. et al.* (1986). Avtomatizirovannyi raschet shihty racional'nogo sostava i stoimosti. [Automated calculation of the charge management structure and cost]. Moskow: Chjornaja metallurgija: Bjul. NTI, no 4, pp. 34-36. [in Russian].
5. А.с. 1258835 СССР, МКИ4 С 21 С 5/00. Способ управления технологическим процессом на участке сталеплавильные агрегаты – установки внепечной обработки стали. [The method of process control at the site steelmaking units – installation of steel ladle treatment]. [in Russian].
6. *Kacen L. G., Bujnevich S. M., Podoprigora I. D. et al.* (1972). Snizhenie sebestoimosti kislorodno-konvertornej stali [Reducing the cost of basic oxygen steel]. Doneck: Donbass, pp. 93. [in Russian].
7. *Zvageľ'skij M. V., Nikitin A. I.* (1971). Tehniko-jekonomičeskaja jeffektivnost' sistemy avtomatičeskogo upravlenija kislorodnymi konvertalami s primeneniem UVM. [Technical and economic efficiency of the automatic control system of oxygen converters using UVM]. Moskow: Metallurgija, pp. 210-215. [in Russian].

8. Sobolev S. K., Bogushevskij V. S., Sorokin N. A. (1975). Vliianie osnovnosti konechnogo shlaka na sebestoimost' konverternoj stali. [The impact of the final slag basicity on the cost of converter steel]. Kiev: Institut avtomatiki, no 3, pp. 134-138. [in Russian].
9. Chernega D. F., Bogushevs'kij V. S., Gotvjans'kij Ju. Ja. et al. (2006). Osnovy metalurgijnogo virobnitstva metaliv i splaviv: Pidruchnik. [Basics of metalurgijnogo virobnitstva metaliv i splaviv]. Kiev: Vishha shkola, pp. 503. [in Ukraine].
10. Bogushevs'kij V. S., Zhuk S. V., Bon-darenko Є. K., Kapusnjak O. O. (2014). Keruvannja kisnevo-konverternoju plavkoju v zamknenomu rezhimi [Keruvannya kisnevo-converter process in zamknenomu rezhimi]. Kiev: Naukovi visti NTUU «KPI», no 5, pp. 76-83. [in Ukraine].
11. Bogushevskiy V. S., Egorov K. V. (2015). [Investigation of electrophysical properties of smelting products and their connection with engineering process]. Metallurgical and Mining Industry, no 1, pp. 109-114. [in English].

Анотація

Богусhevський В. С., Сирбу Ю. И.
Оптимізація собівартості сталі

Проаналізовано основні складові конвертерного процесу, які впливають на собівартість сталі. Завдання оптимізації киснево-конвертерної плавки почали вирішувати практично з моменту освоєння цього переділу. У роботі був застосований ітераційний метод розв'язання задачі лінійного програмування. Дослідження проводилися в НТУУ «Київський політехнічний інститут».

Ключові слова

сталь, оптимізація, собівартість сталі, киснево-конвертерний процес, температура металу

Summary

Bohushevskii V. Sirbu Yu.
Optimization of the cost of steel

The main components of the converter process, affecting the cost of steel are analyzed. The problem of optimizing BOF melting began to be solved almost since the development of this process. The paper applied iterative method for solving linear programming problems. Studies were conducted in NTU «Kiev Polytechnic Institute».

Keywords

steel, optimization, the oxygen-converter process, melt temperature

Поступила 05.03.2016