

О.С. ЛОГУНОВА, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

Е.Г. ФИЛИППОВ, канд. ф.-м. наук, доц., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

В.В. ПАВЛОВ, ведущий инженер электросталеплавильной лаборатории, ОАО Магнитогорский металлургический комбинат, Магнитогорск

И.В. ПАВЛОВ, аспирант, ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск

ПОСТАНОВКА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Приведена стратегия постановки взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых печей. Выбор оптимального состава шихты позволяет снизить затраты при получении сталеплавильной продукции на следующих переделах. Ил.: 1. Библиограф.: 9 назв.

Ключевые слова: задача многокритериальной оптимизации, взаимосвязанные задачи, состав шихты для дуговых электросталеплавильных печей.

Постановка проблемы и анализ литературы. Выплавка стали в дуговых электросталеплавильных печах (ДСП) переменного тока в настоящее время нашла широкое применение на Российских и зарубежных предприятиях. Производства стали, выплавляемой в таких печах, постоянно возрастает и в 2012 году достигнет 23215,0 тыс. т, а в 2013 году – 24247,2 тыс. т [1], что составляет примерно 4,5 и 9% прироста по сравнению с выпуском электростали в 2011 году.

Увеличение объемов производства требует разработки новых научно-обоснованных технологий загрузки исходных шихтовых материалов, ведения плавки, доводки и непрерывной разливки стали [2 – 4]. Комплексная схема автоматизации металлургического предприятия включает систему блоков, относящихся к каждому переделу [5]. Каждый блок содержит входные параметры, которые позволяют оказать управляющее воздействие на протекание не только выбранного металлургического процесса, но и всей технологической цепочки получения непрерывно-литой заготовки (выплавка – доводка – разливка). Принятие решения о выборе режимов работы металлургических агрегатов должно базироваться на использовании автоматизированной системы оценки качества заготовки, позволяющей повысить достоверность и объективность получаемой информации [6].

В условиях ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" (ОАО "ММК") для выплавки стали в ДСП используется два вида сырья – металлический лом и жидкий передельный чугун. Формирование химического состава получаемого полупродукта во многом определяется составом металлического лома. Экспериментальное исследование химического состава металлического лома позволяет выявлять его структуру и процентное содержание хрома, никеля и меди, приносимых с ним в шихту (см. табл. 1).

Для получаемой стали выдвигаются требования по содержанию остаточных элементов в стали таких как хром, никель и медь, в зависимости от марки стали. Пример рекомендуемых значений процентного содержания химических элементов в стали, входящих в сортмент ОПО "ММК", приведен в табл. 2.

Таблица 1

Процентное содержание химических элементов, приносимых в шихту с металлическим ломом

Вид металлолома	Содержание элементов		
	[Cr], %	[Ni], %	[Cu], %
Полосовой и сортовой лом	0,10	0,15	0,15
Металлические конструкции	0,15	0,20	0,20
Тонкие трубы	0,30	0,15	0,25
Рельсы, накладки	0,15	0,20	0,25
Лом автомобильный	0,10	0,15	0,15

Таблица 2

Рекомендуемое процентное содержание химических элементов в сталях различного назначения

Назначение стали	Содержание элементов		
	[Cr], %	[Ni], %	[Cu], %
08Ю ВОВБ ГОСТ 9045*	0,02	0,04	0,04
Корд	0,05	0,05	0,05
Катанка ТУ 14-1-5317	0,1	0,1	0,15
Сталь по ГОСТ 380	0,3	0,3	0,3

* ВОВБ – весьма особо сложная вытяжка.

Эффективность математического описания технологических процессов в различных отраслях во многом определяется полнотой и корректностью постановки задачи [7]. Для задач, определяющих состав шихтовых материалов, на первое место выносятся проблемы оценки теплового и материального баланса при заданных соотношениях шихтовых материалов. Практически в таких исследованиях отсутствуют работы по постановке задач оптимизации и принятия решений в

многокритериальной среде. Авторами исследования была определена проблема определения процентного соотношения металлического лома и чугуна в шихте ДСП, а также структурного состава лома, при которых может быть достигнуто минимальное значение остаточных элементов в стали в пределах рекомендуемых значений.

Цель работы. Снижение затрат на получение стали заданной марки на основе выбора оптимального состава шихтовых материалов.

Особенности и допущения задачи многокритериальной оптимизации состава шихты. Сформулированную проблему можно определить как многокритериальную задачу оптимизации о смесях. Стратегия постановки задачи включает рассмотрение двух взаимосвязанных частей:

задача 1: определение массы металлического лома, подаваемого в ДСП, при которой будет достигнуто минимальное значение для процентного содержания хрома, никеля и меди в расплаве при наличии ограничений на суммарную массу лома и чугуна, определенную производственными возможностями ДСП;

задача 2: определение массовой структуры металлического лома (см. табл. 1), позволяющего получить минимальное содержание хрома, никеля и меди в общей массе лома при наличии ограничений на исходный и получаемый химический состав стали.

В качестве отличительных особенностей задачи можно указать, что:

– задачи являются многокритериальными, в которых в качестве целевой функции выступают: задача 1 – значения процентного содержания остаточных элементов в стали; задача 2 – значения массы вносимых остаточных элементов;

– определение параметров целевой функции выполняется на основе экспериментального исследования;

– выявление технологических параметров для записи уравнений и неравенств выполняется на основе проведения корреляционного анализа выбранных величин;

– система ограничений образует систему взаимосвязанных уравнений и неравенств, в которые зависимая величина может входить и как независимый фактор, и как зависимый признак.

Для решения указанных оптимизационных задач введем допущения:

– в постановке задачи рассматривается три остаточных элемента – хром, никель, медь, которые определяют наиболее важные потребительские свойства стали;

– в ходе экспериментального исследования зависимостей получены линейные формы для выбранных целевых функций и уравнений, и неравенств системы ограничений.

Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации состава шихты. Рассмотрим пример постановки задачи многокритериальной оптимизации для определения структурного состава металлического лома. Выполним все шаги постановки задачи согласно предлагаемой стратегии.

Этап 1 – постановка задачи по определению массы металлического лома и чугуна; процентного содержания серы, фосфора и кислорода в готовой стали; температуры металла на выпуске из ДСП, при которой возможно получение минимального процентного содержания остаточных элементов – хрома, никеля и меди.

Шаг 1.1. Введем обозначения независимых переменных и функций (см. табл. 3).

Таблица 3

Математические обозначения переменных и функций, принятые для задачи 1

Искомые переменные		Целевые функции	
Масса металлического лома, т	$m_{л}$	Содержание никеля, %	S_{Ni}
Масса чугуна, т	$m_{ч}$	Содержание хрома, %	S_{Cr}
Температура металла на выпуске, °C	T	Содержание меди, %	S_{Cu}
Содержание серы, %	S_S		
Содержание фосфора, %	S_P		
Содержание фосфора, %	S_{O_2}		

Шаг 1.2. Устанавливаем эмпирические зависимости для выбранных величин, образующих систему взаимозависимых уравнений:

$$\begin{cases} S_{Ni} = a_{11}m_{л} + a_{12}m_{ч} + \xi_1, \\ S_{Cu} = a_{21}m_{л} + a_{22}m_{ч} + \xi_2, \\ S_{O_2} = b_{31}S_{Ni} + a_{33}T + \xi_3, \\ S_S = b_{42}S_{Cu} + b_{45}S_P + b_{46}S_{Cr} + \xi_4, \\ S_P = b_{55}S_S + b_{56}S_{Cr} + \xi_5, \\ S_{Cr} = b_{62}S_{Cu} + b_{64}S_S + b_{65}S_P + \xi_6, \end{cases} \quad (1)$$

где $\{S_{Ni}, S_{Cu}, S_{O_2}, S_S, S_P, S_{Cr}\}$ – множество эндогенных переменных; $\{m_{л}, m_{ч}, T\}$ – множество экзогенных переменных; a_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) – эмпирические коэффициенты для экзогенных переменных; b_{nm} ($n = 3, 6; m = 1, 2, 4, 5, 6$) – эмпирические коэффициенты для эндогенных

переменных; ξ_i ($\xi_k = \overline{1, 6}$) – эмпирический показатель, оценивающий влияние неучтенных факторов.

Шаг 1.3. Определяем вектор целевых функций на основании (1) и направление улучшения их значений:

$$\begin{aligned} S_{Ni} &= a_{11}m_{л} + a_{12}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cu} &= a_{21}m_{л} + a_{22}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cr} &= b_{62}S_{Cu} + b_{64}S_S + b_{65}S_P \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (2)$$

Шаг 1.4. Определяем ограничения для искомым переменных на основании существующих рекомендаций для каждого параметра:

$$\begin{cases} m^{\min} \leq m_{л} + m_{ч} \leq m^{\max}, & m_{л}^{\min} \leq m_{л} \leq m_{л}^{\max}, \\ m_{ч}^{\min} \leq m_{ч} \leq m_{ч}^{\max}, & T^{\min} \leq T \leq T^{\max}, \\ S_{O2}^{\min} \leq S_{O2} \leq S_{O2}^{\max}, & S_S^{\min} \leq S_S \leq S_S^{\max}, \\ S_P^{\min} \leq S_P \leq S_P^{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где для параметров $\{S_{O2}, S_S, S_P\}$ – используются выражения из (1).

Таким образом, математическая постановка задачи 1 включает: три целевые функции (2) и систему ограничений (3).

Этап 2 – постановка задачи по определению структуры металлического лома для массы, определенной в задаче 1, позволяющей получить минимальную массу хрома, никеля и меди в заданном объеме расплава.

Шаг 2.1. Введем обозначения независимых переменных и функций. Пусть общий объем металлического лома $m_{л}$, определенный в задаче 1, формируется на основе n структурных частей, каждая из которых имеет массу m_j , где $j = 1, 2, \dots, n$. Каждая структурная часть вносит соответствующую долю (a_{ij}), где $i = 1, 2, 3$ и $j = 1, 2, \dots, n$, хрома ($i = 1$), никеля ($i = 2$) и меди ($i = 3$) в общую массу остаточных элементов. Масса остаточных элементов определяется переменными $m_{[Cr]}$, $m_{[Ni]}$, $m_{[Cu]}$.

Шаг 2.2. Определяем форму целевых функций:

$$\begin{aligned} m_{Cr} &= a_{11}m_1 + a_{12}m_2 + \dots + a_{1n}m_n \rightarrow \min, \\ m_{Ni} &= a_{21}m_1 + a_{22}m_2 + \dots + a_{2n}m_n \rightarrow \min, \\ m_{Cu} &= a_{31}m_{л} + a_{32}m_{ч} + \dots + a_{3n}m_n \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4)$$

Шаг 2.3. Выстраиваем систему ограничений для независимых переменных:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n m_j = m_{\text{л}}, \\ m_j \geq 0, j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, для определения массовой структуры металлического лома получили каноническую многокритериальную задачу на минимум. Общую стратегию постановки и решения задачи оптимизации состава шихтовых материалов для ДСП можно отобразить в графическом виде, представленном на рис.

Пример постановки задачи для стали марки 08Ю ВОВВ по ГОСТ 9045. Приведем формальную постановку задачи согласно приведенной стратегии для экспериментальных данных, полученных в условиях ОАО "ММК" для ДСП 1 в период исследований, проведенных в 2011 году. Для записи системы ограничений использованы практические рекомендации и технологические инструкции, принятые на указанном предприятии. Результаты постановки задачи для стали марки 08Ю ВОВВ по ГОСТ 9045 (см. табл. 2) при условии использования пяти видов шихтовых материалов (см. табл. 1) имеют следующий вид.

Задача 1.

Требуется определить кортеж $(m_{\text{л}}, m_{\text{ч}}, T, S_{O_2}, S_S, S_P)$ такой, чтобы

$$\begin{aligned} S_{Ni} &= 0,000048m_{\text{л}} - 0,000519m_{\text{ч}} + 0,1102 \rightarrow \min, \\ S_{Cu} &= 0,000175m_{\text{л}} - 0,001m_{\text{ч}} + 0,19804 \rightarrow \min, \\ S_{Cr} &= -0007994S_{Cu} + 0,9592S_S + 1,6385S_P + 0,0018 \rightarrow \min \end{aligned}$$

при наличии системы ограничений:

$$\begin{cases} 150 \leq m_{\text{л}} + m_{\text{ч}} \leq 210, & 90 \leq m_{\text{л}} \leq 200, \\ 10 \leq m_{\text{ч}} \leq 150, & 1590 \leq T \leq 1670, \\ 0,355 \leq S_{O_2} \leq 2,827, & 0,019 \leq S_S \leq 0,055, \\ 0,003 \leq S_P \leq 0,021, \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} S_{O_2} &= 0,736S_{Ni} + 0,001443T - 2,3108, \\ S_S &= 0,1174S_{Cu} + 1,4977S_P + 0,197S_{Cr} + 0,00154, \\ S_P &= 0,1717S_S + 0,08559S_{Cr} - 0,00302. \end{aligned}$$

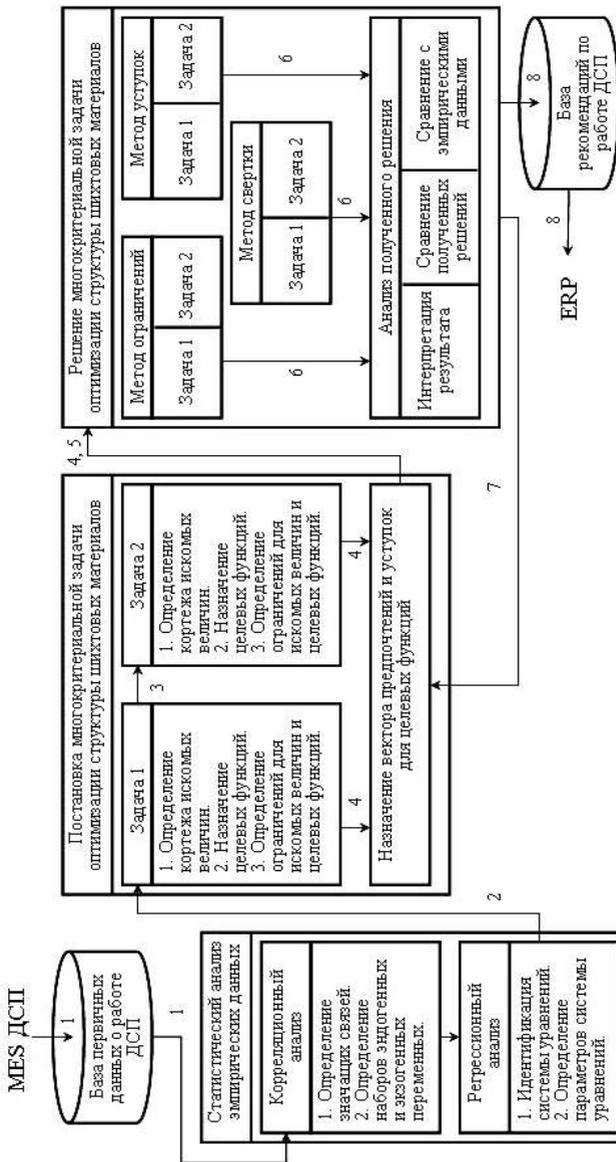


Рис. Стратегия постановки задачи для оптимизации состава шихты в ДСП: 1 – поток первичных эмпирических данных; 4 – поступающих с полевой шины; 2 – система эмпирических взаимосвязанных уравнений; 3 – кортеж уступок и весовых коэффициентов; 6 – значения исходных параметров и целевых функций; 7 – кортеж рассогласований; MES – система управления технологическим процессом; ERP – система планирования производства

Задача 2.

Требуется определить кортеж $(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$ такой, чтобы

$$\begin{aligned}m_{Cr} &= \frac{0,1}{100} m_1 + \frac{0,15}{100} m_2 + \frac{0,3}{100} m_3 + \frac{0,15}{100} m_4 + \frac{0,1}{100} m_5 \rightarrow \min, \\m_{Ni} &= \frac{0,15}{100} m_1 + \frac{0,2}{100} m_2 + \frac{0,25}{100} m_3 + \frac{0,25}{100} m_4 + \frac{0,15}{100} m_5 \rightarrow \min, \\m_{Cu} &= \frac{0,15}{100} m_1 + \frac{0,2}{100} m_2 + \frac{0,15}{100} m_3 + \frac{0,2}{100} m_4 + \frac{0,15}{100} m_5 \rightarrow \min\end{aligned}$$

при наличии системы ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 m_j = m_{л}, \\ m_j \geq 0, j = \overline{1, n}, \end{cases}$$

где $m_{л}$ является решением предыдущей задачи 1.

Деление коэффициентов системы на 100 необходимо для перевода процентов в массовую долю элементов.

Предложенная цепочка задач многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов может быть решена методами, приводящими многокритериальную задачу к однокритериальной, такими как метод ограничений, метод уступок и метод свертки. Каждый из приведенных методов преобразования задачи приводит к назначению вектора весовых коэффициентов или уступок на основе экспертных оценок [8, 9]. Такое априорное назначение этих векторов приводит к необходимости проведения исследования полученных решений на соответствие эмпирической информации.

Заключение. Таким образом, в представленной работе авторами

– разработана стратегия математической постановки задачи многокритериальной оптимизации формирования структуры шихтовых материалов для выплавки стали в ДСП, отличающаяся от ранее известных подходов гибкостью, универсальностью и общностью расширения списка целевых функций и системы ограничений;

– представлено комплексное использование эмпирической и аналитической информации для задачи многокритериальной оптимизации, которое делает возможным автоматизировать постановку многокритериальных задач при разработке имитационных программных продуктов;

– продемонстрировано применение стратегии постановки задачи для одной из наиболее часто выплавляемой марки стали в сортаменте ОАО "ММК".

Список литературы: 1. Черная металлургия России // Анализ и прогноз производства товарных групп, 2010. – Вып. 1. – С. 34 – 39. 2. Тулуевский Ю.Н. Анализ базовых концепций и пути повышения эффективности работы ДСП с непрерывной загрузкой лома / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 24 – 29. 3. Родионова И.Г. Влияние примесей на степень твердорастворного упрочнения проката из низкоуглеродистой стали / И.Г. Родионова, П.А. Мишнев, Ю.С. Быкова, Р.Р. Адигамов, Т.М. Ефимова // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 62 – 67. 4. Носов С.К. Теоретическая база, современные технологии и инновации черной металлургии / С.К. Носов, А.В. Роцин, В.Е. Роцин, Б.П. Черняховский // Электрометаллургия. – 2012. – № 4. – С. 2 – 11. 5. Matsko I.I. Forecasting of image processing time using deterministic methods / I.I. Matsko, O.S. Logunova // International Journal of Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, No. 3, May 2012. – P. 172 – 174. 6. Логунова О.С. Автоматизированная оценка качества непрерывно-литой заготовки / Логунова О.С., Б.Н. Парсункин, В.Г. Суспицын // Сталь. – 2004. – № 12. – С. 101 – 104. 7. Логунова О.С. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации теплового состояния непрерывно-литой заготовки / О.С. Логунова, И.В. Осипов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 9. – С. 39 – 42. 8. Исследование операций в экономике: Учебн. пособие для вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путько, И.М. Тришин, М.Н. Фридман. Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. – 407 с. 9. Кузнецов Ю.Н. Математическое программирование / Ю.Н. Кузнецов, В.И. Кузубов, А.Б. Волощенко. – М.: Высшая школа, 1985. – 302 с.

УДК 681.142.2:621.746

Постановка взаємопов'язаних завдань багатокритеріальної оптимізації складу шихти для дугових електросталеплавильних печей / Логунова О.С., Филиппов Е.Г., Павлов В.В., Павлов І.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 62 (968). – С. 121 – 129.

Наведено стратегія постановки взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації складу шихти для дугових печей. Вибір оптимального складу шихти дозволяє знизити витрати при отриманні сталеплавильної продукції на наступних переділах. Л.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: задача багатокритеріальної оптимізації, взаємопов'язані завдання, склад шихти для дугових електросталеплавильних печей.

UDC 681.142.2:621.746

Statement of related problems of the charge multiobjective optimization for electric arc furnace / Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov V.V., Pavlov I.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 121 – 129.

Shows the strategy formulation of related problems of multiobjective optimization of the charge for electric arc furnaces. Selection of the optimal composition of the charge reduces the cost in obtaining the steel products in the following stages. Figs.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: problem of multiobjective optimization, related problems, the strategy formulation of the problem of optimization materials for electric arc furnace.

Поступила в редакцію 15.07.12