

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 681.142.2 + 621.746

О.С. Логунова, Е.Г. Филиппов, И.В. Павлов, В.В. Павлов

Магнитогорский государственный технический университет

СТРАТЕГИЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Аннотация. В статье рассмотрена стратегия постановки задачи оптимизации состава шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи. Предлагается задачи представить в виде композиции двух подзадач. В первой задаче оптимизируется соотношение металлического лома и чугуна. Во второй задаче выполняется оптимизация состава металлического лома по химическому составу для хрома, никеля и меди. Приведен пример постановки задачи для условий ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» по требованиям каждой марки стали. Приведена обобщающая схема для реализации предлагаемой стратегии.

ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACE CHARGE MATERIALS MIXTURE OPTIMIZED CODE TASK MANAGEMENT STATEMENT STRATEGY

Abstract. The article describes the strategy formulation of the problem of optimizing charge materials for electric arc furnace. Invited to present the problem as a composite of the two subtasks. In the first problem is optimized ratio of scrap and pig iron. In the second problem is optimized composition of scrap metal on the chemical composition of chromium, nickel, and copper. An example of the formulation of the problem for the conditions of “ММК” on the requirements of each steel grade. See generalizing scheme to implement the proposed strategy.

Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) переменного тока в настоящее время нашла широкое применение на российских и зарубежных предприятиях. Производство стали, выплавляемой в таких печах, постоянно возрастает и в 2012 г. достигнет 23 215,0 тыс. т, а в 2013 г. – 24 247,2 тыс. т [1], что составляет около 4,5 и 9 % прироста по сравнению с выпуском электростали в 2011 г.

Увеличение объемов производства требует разработки новых научно-обоснованных технологий загрузки исходных шихтовых материалов, ведения выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. Комплексная схема автоматизации металлургического предприятия включает систему блоков, относящихся к каждому переделу [2]. Каждый блок содержит входные параметры, которые позволяют оказать управляющее воздействие на протекание не только выбранного металлургического процесса, но и всей технологической цепочки получения непрерывнолитой 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 [3].

В условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) для выплавки стали в ДСП

используется два вида сырья – металлический лом и жидкий предельный чугун. Формирование химического состава получаемого полупродукта во многом определяется составом металлического лома. Экспериментальное исследование химического состава металлического лома позволило выявить его структуру и процентное содержание остаточных элементов (хром, никель и медь), привносимых с ним в шихту (табл. 1). Результаты обработки полученных экспериментальных данных приведены в работе [4].

Для получаемой стали выдвигаются требования по содержанию остаточных элементов, таких как хром,

Таблица 1

Процентное содержание химических элементов, привносимых в шихту с металлическим ломом

Вид металлолома	Содержание химических элементов, % (по массе)		
	[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

никель и медь, в зависимости от марки стали. Пример рекомендуемых значений процентного содержания остаточных элементов в стали приведен в табл. 2.

Таблица 2

Рекомендуемое процентное содержание остаточных элементов в сталях различного назначения

Назначение стали	Содержание остаточных элементов в стали, не более, % (по массе)		
	[Cr]	[Ni]	[Cu]
08Ю ВОВС 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

* ВОВС – весьма особо сложная вытяжка.

Эффективность математического описания технологических процессов в различных отраслях во многом определяется полнотой и корректностью постановки задачи [5]. 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 сформулирована 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.

Данную 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 оста-

точных 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 рассматриваются три остаточных элемента – хром, никель и 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.

Рассмотрим пример постановки задач 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 которых возможно получение минимального процентного содержания остаточных элементов – хрома, никеля и меди.

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

Таблица 3

Математические обозначения переменных и функций, принятые для задачи 1

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

Шаг 1.2. Устанавливаем эмпирические зависимости для выбранных величин, образующих систему взаимозависимых уравнений [4]:

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

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} – эмпирические коэффициенты для экзогенных переменных; b_{ij} – эмпирические коэффициенты для эндогенных переменных; ξ_i – эмпирический показатель, оценивающий влияние неучтенных факторов.

Шаг 1.3. Определяем вектор целевых функций на основании уравнения (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 искоемых переменных на основании существующих рекомендаций для каждого параметра:

$$\begin{cases} m^{\min} \leq m_{л} + m_{ч} \leq m^{\max}; \\ m_{л}^{\min} \leq m_{л} \leq m_{л}^{\max}; \\ m_{ч}^{\min} \leq m_{ч} \leq m_{ч}^{\max}; \\ T^{\min} \leq T \leq T^{\max}; \\ S_{O_2}^{\min} \leq S_{O_2} \leq S_{O_2}^{\max}; \\ S_S^{\min} \leq S_S \leq S_S^{\max}; \\ S_P^{\min} \leq S_P \leq S_P^{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где для параметров $\{S_{O_2}, S_S, S_P\}$ используются выражения из системы (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:

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

Шаг 2.3. Выстраиваем систему ограничений для независимых переменных:

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

где d_j – минимальная доля металлического лома j -го вида, поступившего в подготовительное отделение цеха.

Таким образом, для определения массовой структуры металлического лома получили каноническую многокритериальную задачу на минимум.

Приведем формальную постановку задачи согласно приведенной стратегии для экспериментальных данных, полученных в условиях ММК для ДСП № 1 в период исследований, проведенных в 2011 г. Для записи системы ограничений использованы практические рекомендации и технологические инструкции, принятые на указанном предприятии. Результаты постановки задачи для стали 08Ю ВОВВ по ГОСТ 9045 (см. табл. 2) при условии использования пяти видов шихтовых материалов (см. табл. 1) приведены в табл. 4.

Предложенная цепочка задач многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов может быть решена методами ограничений, уступок и свертки, приводящими многокритериальную задачу к однокритериальной [6]. Суть алгоритмов каждого метода изложена в табл. 5. Каждый из приведенных методов преобразования задачи приводит к назначению вектора весовых коэффициентов или уступок на основе экспертных оценок. Такое априорное назначение этих векторов приводит к необходимости проведения исследования полученных решений на соответствие эмпирической информации. Предварительная оценка результатов, полученных разными методами, для определения соотношения шихтовых материалов показала расхождение не более 1 %.

Общую стратегию постановки и решения задачи оптимизации состава шихтовых материалов для ДСП можно отобразить в графическом виде, представленном на рисунке.

Таблица 4

Реализация стратегии постановки задачи для оптимизации структуры шихтовых материалов для ДСП №1 ММК

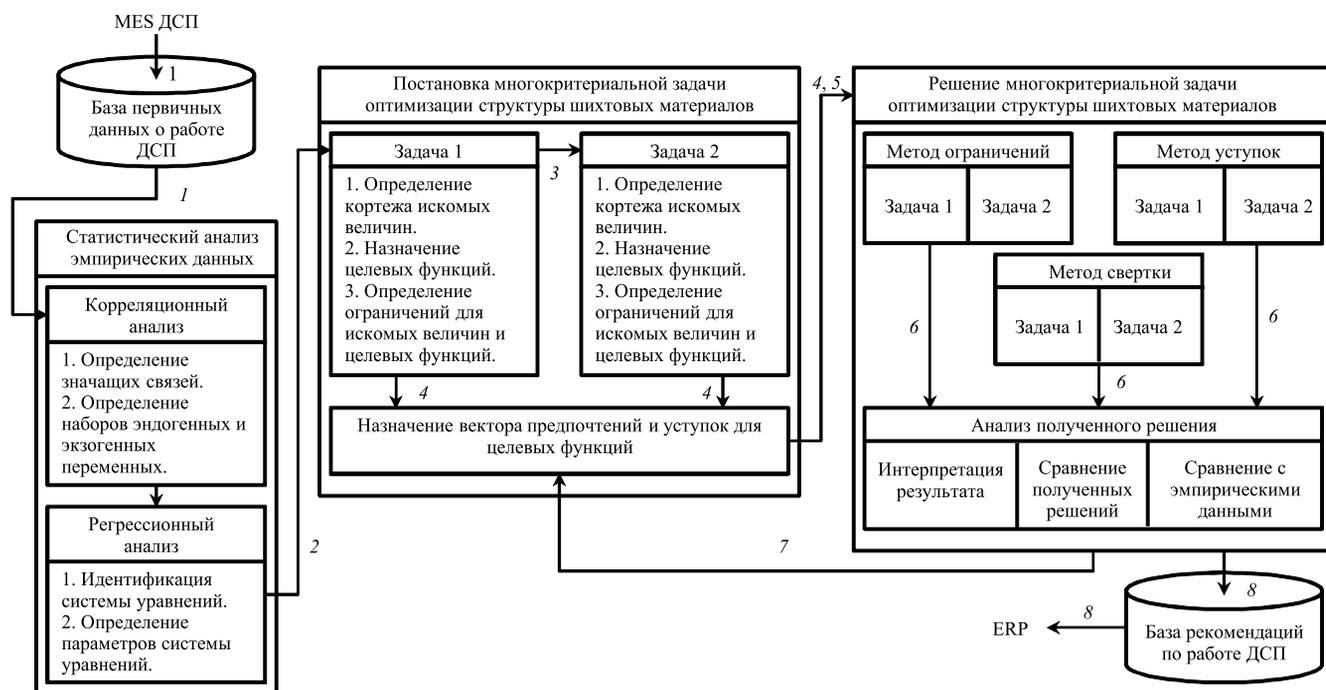
Задача 1	Задача 2
Требуется определить кортеж	Требуется определить кортеж
$(m_n, m_q, T, S_{O_2}, S_S, S_P)$	$(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$
такой, чтобы	такой, чтобы
$S_{Ni} = 0,000048 m_n - 0,000519 m_q + 0,1102 \rightarrow \min;$ $S_{Cu} = 0,000175 m_n - 0,001 m_q + 0,19804 \rightarrow \min;$ $S_{Cr} = -0,0007994 S_{Cu} + 0,9592 S_S + 1,6385 S_P + 0,0018 \rightarrow \min$	$m_{Cr} = \frac{0,1}{100} m_1 + \frac{0,15}{100} m_2 + \frac{0,3}{100} m_3 + \frac{0,15}{100} m_4 + \frac{0,1}{100} m_5 \rightarrow \min;$ $m_{Ni} = \frac{0,15}{100} m_1 + \frac{0,2}{100} m_2 + \frac{0,25}{100} m_3 + \frac{0,25}{100} m_4 + \frac{0,15}{100} m_5 \rightarrow \min;$ $m_{Cu} = \frac{0,15}{100} m_1 + \frac{0,2}{100} m_2 + \frac{0,15}{100} m_3 + \frac{0,2}{100} m_4 + \frac{0,15}{100} m_5 \rightarrow \min$
при наличии системы ограничений:	при наличии системы ограничений:
$\begin{cases} 150 \leq m_n + m_q \leq 210; \\ 90 \leq m_n \leq 200; \\ 10 \leq m_q \leq 150; \\ 1590 \leq T \leq 1670, \\ 0,355 \leq S_{O_2} \leq 2,827; \\ 0,019 \leq S_S \leq 0,055; \\ 0,003 \leq S_P \leq 0,021, \end{cases}$	$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 m_j = m_n; \\ m_j \geq d_j m_n, j = \overline{1,5}, \end{cases}$
где	где m_n является решением предыдущей задачи 1; $d = (0,2; 0,2; 0,2; 0,2; 0,2)$. Деление коэффициентов системы на 100 необходимо для перевода процентов в массовую долю
$S_{O_2} = 0,736 S_{Ni} + 0,001443 T - 2,3108;$ $S_S = 0,1174 S_{Cu} + 1,4977 S_P + 0,197 S_{Cr} + 0,00154;$ $S_P = 0,1717 S_S + 0,08559 S_{Cr} - 0,00302$	

Таблица 5

Этапы реализации методов решения задач многокритериальной оптимизации*

Метод ограничений	Метод уступок	Метод свертки
1. Нормировать каждую целевую функцию: $w_i(X) = \frac{f_i^{\max}(X) - f_i(X)}{f_i^{\max}(X) - f_i^{\min}(X)}, \forall i = 1, k$	1. Решить задачу с первым наиболее важным критерием $f_1(X)$	1. Назначить вектор весовых коэффициентов $\rho = (\rho_i), \forall i = 1, k, \text{ где } \rho_i \geq 0 \text{ и } \sum_{i=1}^k \rho_i = 1$
2. Назначить вектор предпочтений $\rho = (\rho_i), \forall i = 1, k, \text{ где } \rho_i \geq 0 \text{ и } \sum_{i=1}^k \rho_i = 1$	2. Назначить уступку $\Delta f_1(X)$ в процентах от найденного значения $f_1(X) \leq f_1^*(X) - \Delta f_1^*(X)$	2. Ввести свертку $\Phi(X) = \left(\sum_{i=1}^k \rho_i f_i^{\mu}(X) \right)^{\mu} \rightarrow \min, \forall \mu \in N$
3. Переопределить исходную многокритериальную задачу в однокритериальную: найти такой кортеж (X) , при котором $\delta \rightarrow \min$ при ограничениях: $\rho_i w_i(X) \leq \delta, \forall i = 1, k$	3. Ввести в систему ограничений новое неравенство 4. Продолжить процедуру для каждой целевой функции последовательно	3. Выполнить решение однокритериальной задачи

* $f_i(X)$ – целевая функция с номером i ; X – кортеж искоемых значений входных параметров; k – количество целевых функций; ρ_i – весовые коэффициенты критериев; $f_i^*(X)$ – оптимальное значение i -ой целевой функции; μ – порядок свертки.



Стратегия постановки задачи для оптимизации состава шихты в ДСП:

1 – поток первичных эмпирических данных, поступающих с полевой шины; 2 – система эмпирических взаимосвязанных уравнений; 3 – кортеж связывающих параметров; 4 – математическая модель многокритериальной задачи оптимизации; 5 – кортеж уступок и весовых коэффициентов; 6 – значения искомых параметров и целевых функций; 7 – кортеж рассогласований; 8 – перечень рекомендаций о формировании структуры шихтовых материалов; MES – система управления технологическим процессом; EPR – система планирования производства

Выводы. 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 выплавляемых марок стали в сортаменте ММК, которое показало, что изменяя соотношение шихтовых материалов, подаваемых в дуговую электросталеплавильную печь, можно добиться заданного содержания остаточных элементов в стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черная металлургия России. // Анализ и прогноз производства товарных групп, 2010. Вып. 1.
2. Мацко И.И., Логунова О.С. Интеграция эргатического модуля оценки качества непрерывнолитой заготовки в АСУ ТП металлургического производства // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012.
3. Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Суспицын В.Г. // Сталь. 2004. № 12. С. 101 – 104.
4. Logunova O.S., Pavlov V.V., Matsko I.I., Pavlov I.V. // Journal of Mining World Express (MWE). 2012. Vol. 1. P. 21 – 26.
5. Логунова О.С., Осипов И.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 9. С. 39 – 42.
6. Кузнецов Ю.Н., Кузубов В.И., Волощенко А.Б. Математическое программирование. – М.: Высшая школа, 1985. – 302 с.

© 2013 г. О.С. Логунова, Е.Г. Филиппов, И.В. Павлов, В.В. Павлов
Поступила 24 октября 2012 г.