

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

№ 4 (43) 2022

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК), по специальностям: 2.6.2 Metallurgy черных, цветных и редких металлов; 2.6.3 Литейное производство; 2.6.4 Обработка металлов давлением. Сведения о журнале содержатся в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Редакционный совет

Председатель ред. совета:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Члены ред. совета:

С.В. Денисов – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

А.Н. Емелюшин – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

И.Е. Илларионов – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

А.А. Казаков – д-р техн. наук, проф.,
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

В.М. Колокольцев – президент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
д-р техн. наук, проф.

З. Конопка – д-р техн. наук, проф.,
Ченстоховский технологический
университет, Польша

О. Островский – д-р техн. наук, проф.,
UNSW, Австралия

А.М. Песин – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

М. Дабала – д-р техн. наук, проф.,
Университет Падуи, Италия

П. Тандон – д-р техн. наук, профессор
и руководитель машиностроения, Индийский
институт информационных технологий, дизайна
и производства PDPM, Джабалпур, Индия

Р.П. Кардосо – д-р техн. наук, проф.,
Федеральный университет Санта-Катарины,
Бразилия

Е. В. Агеев – д-р техн. наук, проф.,
Юго-Западный государственный университет

В.Б. Деев – д-р техн. наук, проф.,
НИТУ МИСиС, Москва, Россия

А.А. Попов – д-р техн. наук, проф.,
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

В.М. Салганик – д-р техн. наук, проф.,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

О.Ю. Шешуков – д-р техн. наук, проф.,
ГУ ИМЕТРАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Главный редактор:

А.С. Савинов – директор института
металлургии, машиностроения
и материалообработки, д-р техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Научный редактор:

Н.Ш. Тютеряков – канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Технический редактор:

Ю.А. Извеков – проф., канд. техн. наук,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

К.И. Рудь

Дизайнер:

Е.О. Харченко

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д.38).
16+, в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ от 29.12.10.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-74213 от 02.11.2018 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 315
Тел.: (3519) 29-84-64.
E-mail: TTaPEoMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
участок оперативной полиграфии

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Выход в свет 23.12.2022. Заказ 298. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

THE THEORY AND PROCESS ENGINEERING OF METALLURGICAL PRODUCTION

No. 4 (43) 2022

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. Information about the journals can be found into databases of the Russian Science Citation Index (RSCI)

Editorial Board Members

Chairman:

V.A. Bigeev – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Honorary Board Members:

S.V. Denisov – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
A.N. Emelyushin – D.Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
I.Y. Illarionov – D.Sc., Professor,
Chuvash State University
A.A. Kazakov – D.Sc., Associate Professor,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
V.M. Kolokoltsev – D. Sc., Professor,
President of Nosov Magnitogorsk State Technical
University
Z. Konopka – D.Sc., Professor,
Czestochowa University of Technology, Poland
O. Ostrovski – D.Sc., Professor,
University of New South Wales, Australia
A.M. Pesin – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
M. Dabala – D.Sc., Professor, University of Padova,
Italy
P. Tandon – D. Sc., Professor & Head of Mechanical
Engineering, PDPM Indian Institute of Information
Technology, Design and Manufacturing, Jabal-
pur, India

R.P. Cardoso – D. Sc., Professor,
Federal University of Santa Catarina, Brazil
E.V. Ageev – D.Sc., Professor, Southwest State University
V.B. Deev – D. Sc., Professor, MISiS, Moscow, Russia
A.A. Popov – D.Sc., Professor,
Institution of Higher Professional Education «Ural Federal
University named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin»
V.M. Salganik – D. Sc., Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University
O. Ju. Sheshukov – D.Sc., Professor,
alloys Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Professional Education
«Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N.Yeltsin»

Editor-in-Chief:

A.S. Savinov – Director of Metallurgy Mechanical
Engineering and Materials Processing Institute D.Sc., Nosov
Magnitogorsk State Technical University

Scientific Editor:

N.S. Tyteriakov – Ph.D., Nosov Magnitogorsk State
Technical University

Technical Editor:

Y.A. Izvekov – Professor, Ph.D., Nosov Magnitogorsk
State Technical University
K.I. Rud

Designer:

E.O. Harchenko

© FSBEI of HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University”, 2022

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Registration certificate PI # FS 77-74213 dated November 02, 2018 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Editorship address:

315, 38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk 455000, Russia
Tel.: +7 (3519) 29-84-64.
E-mail: TTAPEoMP@magtu.ru; ttmp@magtu.ru

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Editorial office:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date 23.12.2022. Order 298. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	4
Бигеев В.А., Харченко А.С., Потапова М.В., Закуцкая Л.А., Посохин М.А., Кургузов К.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДОЛИ БЕДНЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД В ИСХОДНОЙ ШИХТЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА	4
Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА ПРИ ПОРЦИОННОМ СМЕШИВАНИИ ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ-СЫРЦА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА.....	9
Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Савченко Е.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	15
Завалишина А.Н., Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В., Чернов В.П. О ВЫХОДЕ ГОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ.....	23
Женин Е.В., Шаповалов А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ЧУГУНА ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ	27
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	31
Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Михалкина И.В., Ступак А.А., Осипова О.А., Рудь К.И., Элиджарова К.С. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗОНЫ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ В СТЕНКЕ ОТЛИВКИ ИЗ СТАЛИ 150ХНМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ.....	31
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	37
Лопатина Е.В., Полякова М.А., Воронин К.М. КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	37
Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/1070 И 5083/2024	43

CONTENTS

METALLURGY OF BLACK, COLOR AND RARE METALS	4
Bigeev V.A., Kharchenko A.S., Potapova M.V., Zakutskaya L.A., Posokhin M.A., Kurguzov K.V. DETERMINATION OF THE RATIONAL SHARE OF POOR MANGANESE ORES IN THE CHARGE FOR FERROSILICOMANGANESE MANUFACTURING	4
Martusevich E.A. Rybenko I.A. A DETERMINISTIC MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE OF A MELTING DURING BATCH MIXING OF PRIMARY RAW ALUMINUM IN THE PROCESS OF PRODUCING LUMINUM ALLOYS IN ELECTRIC RESISTANCE MIXERS TO DETERMINE THE OPTIMUM PRODUCTION CONDITIONS	9
Tyutrin A.A., Nemchinova N.V., Hoang V.V., Savchenko E.I. ANALYSING THE RESULTS OF SILICON PROCESSING REFINERY SLAG TREATMENT EXPERIMENT STATISTICALLY.....	15
Zavalishina A.N., Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V., Chernov V.P. ABOUT BOF METAL YELD	23
Zhenin E.V., Shapovalov A.N. INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF LIQUID PIG IRON IN STEEL MELTING.....	27
FOUNDRY	31
Feoktistov N.A., Savinov A.S., Mikhalkina I.V., Stupak A.A., Osipova O.A., Rud K.I., Elidzharova K.S. FORECASTING THE GEOMETRY AND LOCATION OF THE HIGH-PERFORMANCE ZONE IN THE WALL.....	31
PROCESSING OF METALS BY PRESSURE.....	37
Lopatina E.V., Polyakova M.A., Voronin K.M. CELLULAR AUTOMATA AS A PROMISING METHOD FOR MODELING METALWORKING PROCESSES BY PRESSURE.....	37
Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Nosov L.V., Pivovarova K.G., Pesin I.A. DEVELOPMENT OF RATIONAL TECHNOLOGICAL MODES OF PROCESSING SHEET LAMINATED ALUMINUM COMPOSITES 5083/1070 AND 5083/2024	43

УДК 669.2

Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А.

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА ПРИ ПОРЦИОННОМ СМЕШИВАНИИ ПЕРВИЧНОГО АЛЮМИНИЯ-СЫРЦА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

Аннотация. Формирование алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления является сложным физико-химическим процессом, который характеризуется последовательным смешиванием алюминия-сырца, полученного методом электролиза и его взаимодействием с различными лигатурами и флюсами. На этой стадии происходит формирование заданного химического состава и качества алюминиевых сплавов посредством рафинирования и легирования расплава. Этот этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий в связи с многозадачностью и многофакторностью металлургического процесса, что приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности электрического миксера сопротивления и повышению затрат на единицу готовой продукции. Следовательно, совершенствование технологии формирования алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления и разработка оптимальных ресурсосберегающих режимов на основе математических моделей является актуальной научно-практической задачей современной металлургии. В связи с этим важное значение приобретает математическое моделирование металлургических процессов с применением программно-инструментальных систем, обеспечивающее высокое качество алюминиевых сплавов в результате прогнозирования конечных параметров химического состава с учетом свойств исходного сырья. Поэтому в рамках интенсивной цифровой трансформации металлургической отрасли актуальна разработка и промышленное применение математических моделей, позволяющих оптимизировать технологический процесс получения алюминиевых сплавов, снизив энергетические и материальные затраты, а также повысить производительность миксеров литейных отделений.

Ключевые слова: алюминиевый расплав, электрический миксер сопротивления, литейный ковш, математическая модель, задача оптимизации

Выделение объекта исследования

Объектом исследования является технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения, который относится к сложным многопараметрическим объектам [1–4]. При выделении объекта исследования можно выделить следующие параметры: входных потоков, выходных потоков, технологические параметры и технико-экономические показатели (рис. 1).

При формировании алюминиевого расплава в миксере параметрами входного потока являются: K – количество литейных ковшей с алюминием-сырцом из электролизного цеха; L – количество легирующих добавок; F – количество флюсовых добавок; m_k – масса расплава алюминия-сырца из k -го литейного ковша ($k = 1 \div K$), кг; m_l – масса l -й легирующей добавки ($l = 1 \div L$), кг; m_f – масса f -й флюсовой добавки для коррекции текущего химического состава расплава ($f = 1 \div F$), кг; $[R]_{ik}$ – исходный химический состав алюминия-сырца в k -м литейном ковше, %; $[R]_{il}$ – химический состав l -й лигатуры, %; $[R]_{if}$ – химический состав f -го флюса, %; m_M^0 – исходная масса расплава в миксере перед началом выполнения технологической операции формирования расплава, кг; m_k^0 – исходная масса расплава алюминия-сырца в k -м литейном ковше, кг; t_M^0 – температура исходного расплава алюминия-сырца в миксере, °C; t_k – температура алюминия-сырца в k -м литейном ковше, °C.

К параметрам выходного потока относятся: m_M – масса сформированного расплава в миксере с учетом легирующих и флюсовых добавок, кг; $[R]_i$ – химический состав расплава в миксере согласно заданным требованиям установленного заказа, %; t_M – температура расплава в миксере, °C. К технологическим показателям и технико-экономическим показателям относятся: $\tau_{\text{общ}}$ – общее время формирования алюминиевого расплава в миксере, с; C_M – затраты на формирование алюминиевого расплава в миксере, руб; C_k – стоимость исходного алюминия-сырца в k -м литейном ковше, руб/кг; C_l – стоимость l -й лигатуры, руб/кг; C_f – стоимость f -го флюса, руб/кг; $C_{\text{эл}}$ – стоимость тарифа электроэнергии, руб./кВт·ч.

Разработка математической модели

Процесс получения алюминиевого расплава в миксере можно разделить на два последовательных этапа: формирование основы расплава путем смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей и последующая корректировка расплава легирующими добавками и флюсами. Первый этап процесса формирования алюминиевого расплава заключается в смешивании исходного алюминия-сырца из k -х литейных ковшей и его дальнейшем перемешивании в миксере [5, 6]. Полученная масса расплава m_M в миксере определяется количеством перелитого алюминия-сырца из литейных ковшей:

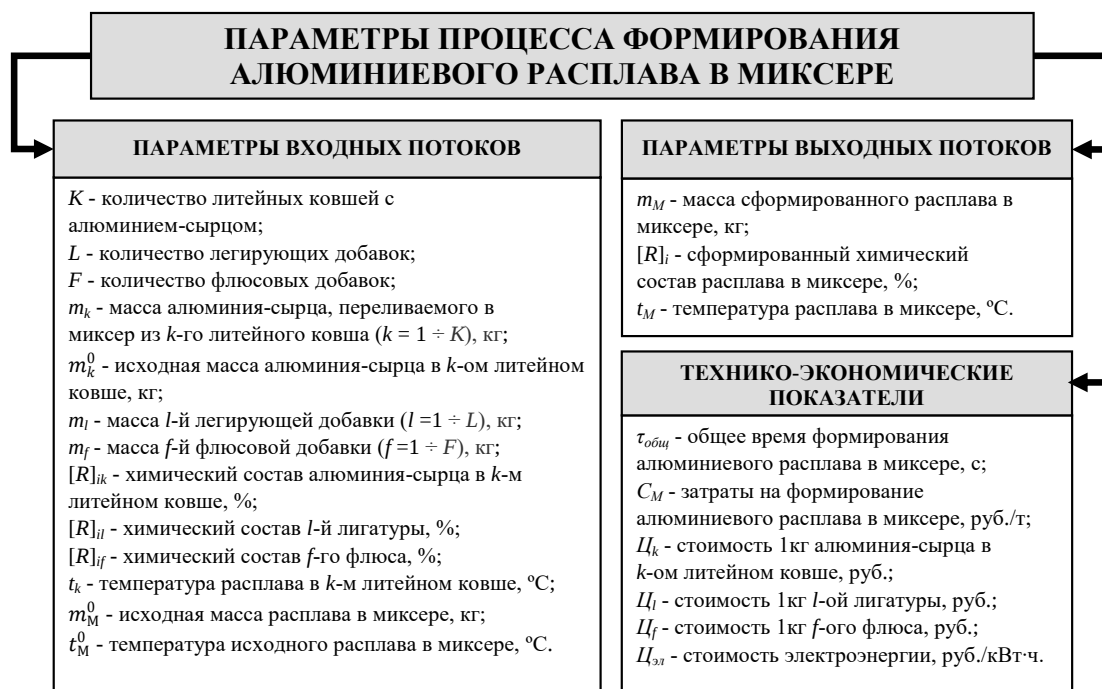


Рис. 1. Параметры технологического объекта

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k, \quad (1)$$

где *K* – количество литейных ковшей;

m_M⁰ – исходная масса расплава в миксере перед началом технологической операции формирования расплава, кг;

m_k – масса алюминия-сырца, поступающего из *k*-го литейного ковша, кг.

Масса *i*-го вещества в миксере рассчитывается с учетом массы и химического состава алюминия-сырца из литейных ковшей, а также угара элементов:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0 [R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k [R]_{ik}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (2)$$

где *K* – количество литейных ковшей;

m_M⁰ – исходная масса расплава в миксере, кг;

m_k – масса алюминия-сырца, поступающего из *k*-го литейного ковша, кг;

[R]_i – химический состав алюминиевого расплава в миксере, оставшегося с предыдущего технологического этапа плавки, %;

[R]_{ik} – химический состав алюминия-сырца в *k*-м литейном ковше, %;

η_i – коэффициент угара *i*-го элемента.

Скорости изменения масс химических веществ при формировании алюминиевого расплава в миксере можно представить в виде задачи Коши, определяемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно скоростей изменения масс

расплавов алюминия-сырца из *k*-х литейных ковшей и их начальными значениями:

$$\{v_k = \frac{dm_k}{d\tau} = -\gamma m_k ;$$

$$v_M = \frac{dm_M}{d\tau} = \gamma (m_M^0 + m_k^0 - m_M), m_k(0) = m_k^0 ;$$

$$m_M(0) = m_M^0, \quad (3)$$

где *v_k* – скорость расхода массы (истечения) расплава из литейного ковша, кг/с;

v_M – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с;

m_k – текущая масса расплава в *k*-м литейном ковше, кг;

m_k⁰ – начальная масса расплава в *k*-м литейном ковше, кг;

m_M – текущая масса расплава в миксере, кг;

m_M⁰ – начальная масса расплава в миксере, кг;

τ – текущее время, с;

γ – постоянная времени запаздывания инерционного процесса, 1/с.

При этом *v_M* = –*v_k*, то есть прирост массы формируемого расплава в миксере равен расходу массы алюминия-сырца в *k*-м литейном ковше, что соответствует соотношению *m_M* + *m_M⁰* = *m_k⁰* – *m_k*. Прирост масс *i*-го вещества в миксере при переливании исходного алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом начальных условий можно представить в следующем виде:

$$\frac{dm_M^x}{d\tau} = \gamma (m_M^{x_0} + m_k^{x_0} - m_M^x); m_M^x(0) = m_M^{x_0}. \quad (4)$$

Уменьшение массы i -го вещества из k -х литейных ковшей при переливании расплава алюминия-сырца в миксер с учетом начальных условий можно представить уравнением:

$$\frac{dm_k^x}{d\tau} = -\gamma m_M^x; m_k^x(0) = m_k^{x_0}. \quad (5)$$

Математическая модель динамики изменения концентрации химических элементов в миксере и литейных ковшах соответственно определяется системой обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{dm_M^{Fe}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Fe_0} + m_k^{Fe_0} - m_M^{Fe}); m_M^{Fe}(0) = m_M^{Fe_0} \\ \frac{dm_M^{Si}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Si_0} + m_k^{Si_0} - m_M^{Si}); m_M^{Si}(0) = m_M^{Si_0} \\ \frac{dm_M^{Ti}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Ti_0} + m_k^{Ti_0} - m_M^{Ti}); m_M^{Ti}(0) = m_M^{Ti_0} \\ \frac{dm_M^{Al}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Al_0} + m_k^{Al_0} - m_M^{Al}); m_M^{Al}(0) = m_M^{Al_0} \\ \frac{dm_M^{Cu}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Cu_0} + m_k^{Cu_0} - m_M^{Cu}); m_M^{Cu}(0) = m_M^{Cu_0} \\ \frac{dm_M^{Zn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Zn_0} + m_k^{Zn_0} - m_M^{Zn}); m_M^{Zn}(0) = m_M^{Zn_0} \\ \frac{dm_M^{Mn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mn_0} + m_k^{Mn_0} - m_M^{Mn}); m_M^{Mn}(0) = m_M^{Mn_0} \\ \frac{dm_M^{Mg}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Mg_0} + m_k^{Mg_0} - m_M^{Mg}); m_M^{Mg}(0) = m_M^{Mg_0} \\ \frac{dm_M^{Pb}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Pb_0} + m_k^{Pb_0} - m_M^{Pb}); m_M^{Pb}(0) = m_M^{Pb_0} \\ \frac{dm_M^{Sn}}{d\tau} = \gamma(m_M^{Sn_0} + m_k^{Sn_0} - m_M^{Sn}); m_M^{Sn}(0) = m_M^{Sn_0}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dm_k^{Fe}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Fe}; m_k^{Fe}(0) = m_k^{Fe_0} \\ \frac{dm_k^{Si}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Si}; m_k^{Si}(0) = m_k^{Si_0} \\ \frac{dm_k^{Ti}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Ti}; m_k^{Ti}(0) = m_k^{Ti_0} \\ \frac{dm_k^{Al}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Al}; m_k^{Al}(0) = m_k^{Al_0} \\ \frac{dm_k^{Cu}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Cu}; m_k^{Cu}(0) = m_k^{Cu_0} \\ \frac{dm_k^{Zn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Zn}; m_k^{Zn}(0) = m_k^{Zn_0} \\ \frac{dm_k^{Mn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mn}; m_k^{Mn}(0) = m_k^{Mn_0} \\ \frac{dm_k^{Mg}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Mg}; m_k^{Mg}(0) = m_k^{Mg_0} \\ \frac{dm_k^{Pb}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Pb}; m_k^{Pb}(0) = m_k^{Pb_0} \\ \frac{dm_k^{Sn}}{d\tau} = -\gamma m_M^{Sn}; m_k^{Sn}(0) = m_k^{Sn_0}. \end{cases} \quad (7)$$

В результате исходная задача Коши в векторной форме имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dX_k}{d\tau} = -\gamma X_k & \frac{dX_M}{d\tau} = \gamma(X_M^0 + X_k^0 - X_M) X_k(0) = X_k^0 \\ X_M(0) = X_M^0 \end{cases}, \quad (8)$$

где X_M – градиент изменения концентраций химических элементов в миксере;

X_k – градиент изменения концентраций химических элементов в k -м ковше.

Последующий этап корректировки расплава с использованием флюсов и лигатур можно представить в виде уравнения

$$m_M = m_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k + \sum_{l=1}^L m_l + \sum_{f=1}^F m_f, \quad (9)$$

где K – количество литейных ковшей;

L – количество применяемых лигатур;

F – количество применяемых флюсов;

m_M^0 – исходная масса расплава в миксере, кг;

m_k – масса расплава, поступающего из k -го литейного ковша, кг;

m_l – масса l -й лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав, кг;

m_f – масса f -го флюса, добавляемого в алюминиевый расплав, кг.

Тогда масса i -го вещества в миксере будет определяться количеством алюминия-сырца из литейных ковшей и введенных в расплав лигатур и флюсов:

$$m_i = \left(\frac{m_M^0[R]_i}{100} + \sum_{k=1}^K \frac{m_k[R]_{ik}}{100} + \sum_{l=1}^L \frac{m_l[R]_{il}}{100} + \sum_{f=1}^F \frac{m_f[R]_{if}}{100} \right) \cdot (1 - \eta_i), \quad (10)$$

где K – количество литейных ковшей;

L – количество применяемых лигатур;

F – количество применяемых флюсов;

m_M^0 – исходная масса алюминиевого расплава в миксере, кг;

m_k – масса жидкого алюминия-сырца, поступающего из k -го ковша в миксер, кг;

m_l – масса l -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав в миксере, кг;

m_f – масса f -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав в миксере, кг;

$[R]_i$ – химический состав алюминиевого расплава в миксере с предыдущей плавки, %;

$[R]_{ik}$ – химический состав алюминия-сырца в k -м литейном ковше, %;

$[R]_{il}$ – химический состав l -й лигатуры, %;

$[R]_{if}$ – химический состав f -го флюса, %;

η_i – коэффициент угара i -го элемента.

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава реализуется в заданном температурном режиме 900–1000°C. Для расчета текущей температуры формируемого алюминиевого расплава в результате смешивания исходного алюминия-сырца с разной температурой используется уравнение

$$t_M = \frac{(m_M^0 t_M^0 + \sum_{k=1}^K m_k t_k) C_M}{m_M C_M} + \Delta t, \quad (11)$$

где C_M – теплоемкость расплава в миксере, кДж/(кг·град);
 t_M – текущая температура алюминиевого расплава в миксере, °С;

t_M^0 – исходная температура алюминиевого расплава в миксере перед началом смешивания алюминия-сырца, °С;

t_k – температура жидкого алюминия-сырца в k -м литейном ковше, °С;

Δt – приращение температуры в миксере за счет нагревательных элементов, °С.

Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава представлена на рис. 2.

Решение задачи оптимизации

Для определения оптимальных расходов алюминия-сырца, поступающего из литейных ковшей, и корректирующих добавок была поставлена задача оптимизации, которая заключается в минимизации затрат на формирование алюминиевого расплава в миксере с заданными свойствами при соблюдении всех технологических ограничений и выполнении условий

$$K, L, F, m_k^0, m_M^0, m_k, m_p, m_f, [R]_{ik}, [R]_{il}, [R]_{if}, t_k, t_M^0$$



Рис. 2. Блок-схема математической модели процесса формирования расплава в миксере

материального и теплового балансов [7, 8]. Целевая функция представляет собой суммарные затраты на получение единицы продукции:

$$C = \frac{(\sum_{k=1}^K m_k \Pi_k + \sum_{l=1}^L m_l \Pi_l + \sum_{f=1}^F m_f \Pi_f + \Pi_{эл})}{m_M} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где Π_k, Π_l, Π_f – стоимость алюминия-сырца, лигатур и флюсов соответственно, руб./т; $\Pi_{эл}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

Решение задачи оптимизации заключается в определении минимума целевой функции при соблюдении следующих ограничений:

а) масса формируемого алюминиевого расплава в миксере должна не превышать полезную емкость миксера:

$$m_{min} \leq m_M \leq m_{max}, \quad (13)$$

б) масса алюминия-сырца, переливаемая в миксер из k -го литейного ковша, должна не превышать исходную массу алюминия-сырца в k -м литейном ковше:

$$0 \leq m_k \leq m_k^0, \quad (14)$$

в) массы лигатур и флюсов должны не превышать массы имеющихся в наличии корректирующих материалов:

$$\begin{aligned} m_{l\min} &\leq m_l \leq m_{l\max}, \\ m_{f\min} &\leq m_f \leq m_{f\max}; \end{aligned} \quad (15)$$

г) формируемый химический состав алюминиевого расплава должен соответствовать заданному химическому составу установленной марки сплава:

$$[R]_{i\min} \leq [R]_i \leq [R]_{i\max}; \quad (16)$$

д) температура формируемого расплава должна соответствовать заданному диапазону значений согласно требованиям технологической инструкции:

$$t_{\min} \leq t_{\text{м}} \leq t_{\max}. \quad (17)$$

При такой постановке задачи применение формальных методов оптимизации не всегда позволяет получить решение при соблюдении всех ограничений. При этом возможно несколько вариантов. В первом случае оптимальное решение по формированию расплава со всеми необходимыми характеристиками может быть получено при заданных начальных условиях, то есть при исходном наборе литейных ковшей с алюминием-сырцом с учетом лигатур и флюсов. Ко второму случаю относится ситуация, когда можно получить лишь неполное решение, например сформировать заданный химический состав алюминиевого расплава в миксере в соответствии с установленной маркой, но меньшей массы. К третьему случаю относится ситуация, когда оптимальное решение, исходя из заданных начальных условий, получить невозможно.

Однако в связи с тем, что в литейный цех непрерывно поступают новые литейные ковшки с алюминием-сырцом, имеется возможность скорректировать начальные условия и добиться полного решения поставленной задачи, то есть получить алюминиевый расплав заданной массы, химического состава и температуры. Такую задачу можно решить методом динамического программирования, который применяется для определения оптимальных параметров объекта при постоянно изменяющихся начальных условиях. Для поиска оптимального решения в рамках метода динамического программирования на каждом этапе предлагается использовать метод линейного программирования, который обеспечивает решение задач, где целевая функция и ограничения имеют линейный вид.

Выводы

Для решения задачи определения оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере выделен объект исследования, определены параметры входных-выходных потоков и выбраны технико-экономические показатели. Разработана математическая модель технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, позволяющая рассчитывать пара-

метры смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере с учетом присадок лигатур и флюсов. Математическая модель включает в себя уравнения материального и теплового балансов, динамические уравнения скоростей изменения масс и химического состава расплава при смешивании алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере, что позволяет определить необходимое количество алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом расходов лигатур и флюсов для формирования расплава с заданной массой, химическим составом и температурой. Поставлена и решена задача оптимизации, заключающаяся в минимизации затрат на получение необходимого количества алюминиевого расплава в миксере с заданным химическим составом и температурой при ограничениях на параметры входных-выходных потоков и технологические параметры. В связи с тем, что решение оптимизационной задачи невозможно получить формальными методами условной оптимизации из-за постоянно меняющихся начальных условий, для поиска решения предложен метод динамического программирования с использованием симплекс-метода линейного программирования.

Разработанная математическая модель предназначена для определения оптимального количества используемого алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом введения лигатур и флюсов, обеспечивающего формирование алюминиевого расплава заданной массы, химического состава и температуры.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ («Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре», договор № 19-37-90087\19), а также в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Список литературы

1. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2016. 108 с.
2. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов. М.: Ленанд, 2015. 416 с.
3. Лаврентьев Г.В., Лаврентьева Н.Б., Неудахина Н.А. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов. Барнаул: Изд-во АГТУ, 2009. 203 с.
4. Митришкин Ю.В. Линейные математические модели динамических систем с управлением. М.: Ленанд, 2019. 464 с.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов [и др.]. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
6. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. М.: Изд-во «Интермет инжиниринг». 2004. 442 с.
7. Математическое моделирование действующего технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения / С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В.

Мартусевич, И.А. Рыбенко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 56. С. 20–28.

8. Проектирование и реализация комплекса программ для моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов

на основе объектно-ориентированного подхода / С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В. Мартусевич, В.Н. Буинцев, И.А. Рыбенко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 57. С. 110–117.

Сведения об авторах

Мартусевич Ефим Александрович – старший преподаватель кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет «СибГИУ», г. Новокузнецк, Россия. E-mail: science_nvz@mail.ru

Рыбенко Инна Анатольевна – доктор технических наук, доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет «СибГИУ», г. Новокузнецк, Россия. E-mail: rybenkoi@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A DETERMINISTIC MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE OF A MELTING DURING BATCH MIXING OF PRIMARY RAW ALUMINUM IN THE PROCESS OF PRODUCING ALUMINUM ALLOYS IN ELECTRIC RESISTANCE MIXERS TO DETERMINE THE OPTIMUM PRODUCTION CONDITIONS

Martusevich Efim A. – Senior Lecturer, Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuzneck, Russia. E-mail: program.pro666@yandex.ru.

Rybenko Inna A. – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming; Siberian State Industrial University, Novokuzneck, Russia. E-mail: rybenkoi@mail.ru.

Annotation. The formation of aluminum melt in electric resistance mixers is a complex physical and chemical process, which is characterized by sequential mixing of raw aluminum obtained by electrolysis and its interaction with various master alloys and fluxes. At this stage, the formation of a given chemical composition and quality of aluminum alloys occurs through refining and alloying of the melt. This stage of production is associated with the presence of an excessive number of corrective actions due to the multitasking and multifactorial nature of the metallurgical process, which leads to an increase in the melt preparation time, a decrease in the productivity of the electric resistance mixer and an increase in costs per unit of finished product. Therefore, the improvement of the technology of aluminum melt formation in electrical resistance mixers and the development of optimal resource-saving modes based on mathematical models is an urgent scientific and practical task of modern metallurgy. In this regard, mathematical modeling of metallurgical processes using software and instrumental systems is of great importance, which ensures high quality of aluminum alloys as a result of predicting the final parameters of the chemical composition, taking into account the properties of the feedstock. Therefore, within the framework of the intensive digital transformation of the metallurgical industry, it is relevant to develop and industrially apply mathematical models that allow optimizing the technological process for producing aluminum alloys, reducing energy and material costs, as well as increasing the productivity of foundry mixers.

Key words: aluminum melt, electric resistance mixer, casting ladle, mathematical model, optimization problem.

Ссылка на статью:

Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. Детерминированная математическая модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия-сырца в процессе получения алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления для определения оптимальных условий реализации процесса // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 9–14.

Martusevich E.A., Rybenko I.A. A deterministic mathematical model of the dynamics of changes in the chemical composition and temperature of a melting during batch mixing of primary raw aluminum in the process of producing aluminum alloys in electric resistance mixers to determine the optimum production conditions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 9–14.