

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.942

DOI: 10.17223/19988605/56/3

С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В. Мартусевич, В.Н. Буинцев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В МИКСЕРЕ ЛИТЕЙНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90087\19.

Рассматривается задача математического моделирования действующего процесса изготовления алюминиевых сплавов для осуществления непрерывного мониторинга основных технологических параметров, определяющих формирование требуемого химического состава алюминиевого расплава в миксере литейного отделения. Разработаны соответствующие математические модели, в частности модель материально-теплого баланса взаимодействующих веществ, а также модель динамики, характеризующая последовательный процесс модификации алюминиевого расплава, представленная в виде задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно масс исходного алюминия-сырца в литейных ковшах.

Ключевые слова: математическая модель; вычислительный эксперимент; технологический процесс; алюминиевый расплав; параметры смешивания.

В настоящее время одной из наиболее ресурсоемких и стратегически важных отраслей промышленности является производство алюминиевых сплавов, обладающих различными физико-химическими характеристиками. Данная тенденция обусловлена возросшими запросами общества к использованию качественных материалов с высокими эксплуатационными свойствами, отвечающих современным экологическим требованиям. Стало быть, совершенствование действующей технологии производства алюминиевых сплавов является перспективной и актуальной задачей в связи с отсутствием комплексного подхода к рационализации установившихся технологических процессов, а также с учетом избыточного количества циклов модификации алюминиевого расплава в плавильном миксере. Так, неточность эмпирических методов расчета, направленных на определение корректных значений параметров смешивания исходного алюминия-сырца из литейных ковшей, или ошибочные управляющие воздействия технологического персонала непосредственно приводят к снижению производительности литейного отделения, а также способствуют повышению себестоимости готовой продукции и изменению плановых сроков выполнения производственного плана.

Для решения соответствующих технологических задач требуется использование средств математического моделирования и инструментов информатизации, что не только позволяет проводить неограниченное количество вычислительных экспериментов с использованием компьютерной техники, но и определяет возможность визуализации статических или динамических характеристик исследуемого объекта [1]. Как следствие, применение данного подхода способствует результативному управлению основными аспектами выбранного технологического процесса, что предопределяет эффективное достижение заданных физико-химических характеристик алюминиевого расплава, а также позволяет обеспечить возможность повышения уровня квалификации технологического персонала с учетом исходных наборов технологических данных и различных ограничений [2].

Математическое моделирование является универсальным инструментом для исследования сложных многопараметрических систем, к которым также относится и процесс формирования алюминиевого расплава в плавильном миксере. Моделирование обеспечивает математическое подобие исследуемых характеристик реального процесса или явления на основе вновь разработанных моделей, что способствует наиболее точному познанию природы выбранных объектов при проведении серии экспериментальных исследований [3]. Из этого следует, что замена основных характеристик исследуемого объекта или процесса адекватными моделями относится к общенаучным методам естественного познания с использованием эмпирических и теоретических уровней исследования. Так, основными отличительными преимуществами математического моделирования по сравнению с другими альтернативными видами моделирования считаются следующие особенности: возможность моделирования объектов любого происхождения; тестирование стандартных и нестандартных режимов работы объекта; точная масштабируемость исследуемых процессов во времени; проведение многофакторного анализа; прогнозирование общих и скрытых закономерностей объектов [4–6].

Действительно, развитие информационных технологий предопределяет необходимость тесного взаимодействия разработанных математических моделей объектов и современных электронно-вычислительных средств. Вместе с использованием высокоуровневых объектно-ориентированных языков программирования компьютерное моделирование является одним из наиболее эффективных методов изучения сложных технологических систем за счет осуществления численной реализации соответствующих математических моделей с учетом различных входных и выходных сигналов, что позволяет производить интерпретацию и сопоставление полученных результатов моделирования с реальным поведением исследуемого объекта [7]. При этом в зависимости от выбранных объектов познания, а также с учетом того, при каких обстоятельствах реализуется способность моделей полноценно отражать действительное соответствие исследуемых характеристик, существуют различные разновидности математических моделей, например эталонные, управленческие, регистрирующие, оптимизационные, балансовые, имитационные, статические, динамические [8, 9].

Также важно, что для исследования динамических процессов и непрерывного анализа переходных режимов работы объекта используются детально настраиваемые компьютерные модели, построенные на основе системы дифференциальных уравнений. Тем самым широкое использование возможностей математического моделирования является современным и наиболее комплексным подходом для разработки новых и оптимизации действующих технологических систем с целью достижения новых практических результатов научно-исследовательской деятельности.

1. Математическая модель технологического процесса на основе производственных данных

Для осуществления математического моделирования исследуемого технологического процесса, а также проведения соответствующих результативных вычислительных экспериментов необходимо разработать математическую модель процесса формирования алюминиевого расплава в плавильном миксере, которая, в свою очередь, состоит из уравнений теплового и материального балансов [10–13]. Общий вид уравнения теплового баланса для формируемого расплава в миксере имеет вид:

$$Q_{\text{распл}} = \sum_{i=1}^N Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – приходно-расходные статьи теплового баланса, Дж.

Уравнения материального баланса построены на основе закона сохранения масс применительно к гетерогенной системе. Далее представлены уравнения, описывающие массовый баланс газовых потоков и физических веществ. Общее уравнение материального баланса вход-выходных газовых потоков в миксере имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{K_{\text{конд}}} G_k^{\text{конд}} + \sum_{k=1}^{K_{\text{газ}}} G_k^{\text{газ}} = \sum_{l=1}^{L_{\text{конд}}} G_l^{\text{конд}} + G^{\text{газ}}, \quad (2)$$

где $K^{\text{конд}}$, $K^{\text{газ}}$ – количество конденсированных и газообразных входных потоков, ед.; $G^{\text{конд}}_k$, $G^{\text{газ}}_k$ – массовые расходы конденсированных и газообразных входных потоков, кг/с; $G^{\text{конд}}_l$ – массовый расход l -го конденсированного выходного потока, кг/с; $G^{\text{газ}}$ – массовый расход газообразного выходного потока, кг/с; $L^{\text{конд}}$ – количество конденсированных выходных потоков, ед.

Входные конденсированные потоки веществ состоят из соответствующих потоков в виде периодических поступлений алюминиевого расплава из набора K ковшей, а также потока подачи лигатур с массовым расходом $G^{\text{газ}}$ и потока подачи флюсов с массовым расходом $G^{\text{фл}}$, т.е. $K^{\text{конд}} = K + 2$. В таком случае формируется единственный выходной конденсированный поток веществ.

На основе выходного потока осуществляется разливка полученного расплава алюминия с массовым расходом $G^{\text{распл}}$. Входной газообразный поток является единственным, поэтому через него / в расплав миксера поступают газовые включения кислорода и водорода с массовым расходом $G^{\text{газ}}_{\text{вх}}$.

Кроме этого, газовые включения могут содержаться в оставшемся расплаве после предшествующей плавки с массовым содержанием $G^{\text{газ}}_0$. Выходной газообразный поток также остается единственным и имеет массовый расход $G^{\text{газ}}_{\text{вых}}$.

Уравнение итогового материального баланса имеет следующий вид:

$$\sum_{k=1}^K G^{\text{конд}}_k + G^{\text{газ}}_{\text{вх}} + G^{\text{лиг}} + G^{\text{фл}} = G^{\text{газ}}_{\text{вых}} + G^{\text{распл}}. \quad (3)$$

Вместе с тем важной сопутствующей задачей является разработка математической модели динамики формирования алюминиевого расплава в плавильном миксере при добавлении в него жидкого алюминия-сырца из i -го литейного ковша, поступающего из электролизного цеха с некоторым интервалом времени. При этом интенсивность истечения исходной массы алюминия-сырца из выбранного i -го литейного ковша определяется соответствующей математической моделью, представленной в виде задачи Коши [14] для системы дифференциальных уравнений относительно массовых концентраций компонентов формируемого алюминиевого расплава в плавильном миксере:

$$\begin{cases} v^i = \frac{dm^i}{d\tau} = -\gamma m^i, \\ v^M = \frac{dm^M}{d\tau} = \gamma(m_0^M + m_0^i - m^M), \\ m^i(0) = m_0^i, \\ m^M(0) = m_0^M, \end{cases} \quad (4)$$

где m^i – масса расплава в i -м ковше, кг; m_0^i – начальная масса расплава в i -м ковше, кг; m^M – масса расплава в миксере, кг; m_0^M – начальная масса расплава в миксере, кг; v^i – скорость расхода массы (истечения) расплава в ковше, кг/с; v^M – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с; γ – коэффициент пропорциональности, характеризующий интенсивность уменьшения массы алюминиевого расплава, 1/с.

При этом $v^M = -v^i$, что соответствует соотношению

$$\gamma(m_0^M + m_0^i - m^M) = -(-\gamma m^i), \text{ т.е. } m^M - m_0^M = m_0^i - m^i. \quad (5)$$

В результате преобразований получается, что прирост массы расплава в миксере равен расходу массы каждого элемента содержимого расплава из i -го литейного ковша в любой момент времени. Данный эффект изображен на рис. 1.

Ниже представлен общий вид задачи Коши для основных элементов химического состава алюминиевого расплава, характеризующий скорость изменения масс этих элементов при смешивании в плавильном миксере:

$$\begin{cases} \frac{dm_X^M}{d\tau} = \gamma(m_{X_0}^M + m_{X_0}^i - m_X^M), \\ m_X^M(0) = m_{X_0}^M. \end{cases} \quad (6)$$

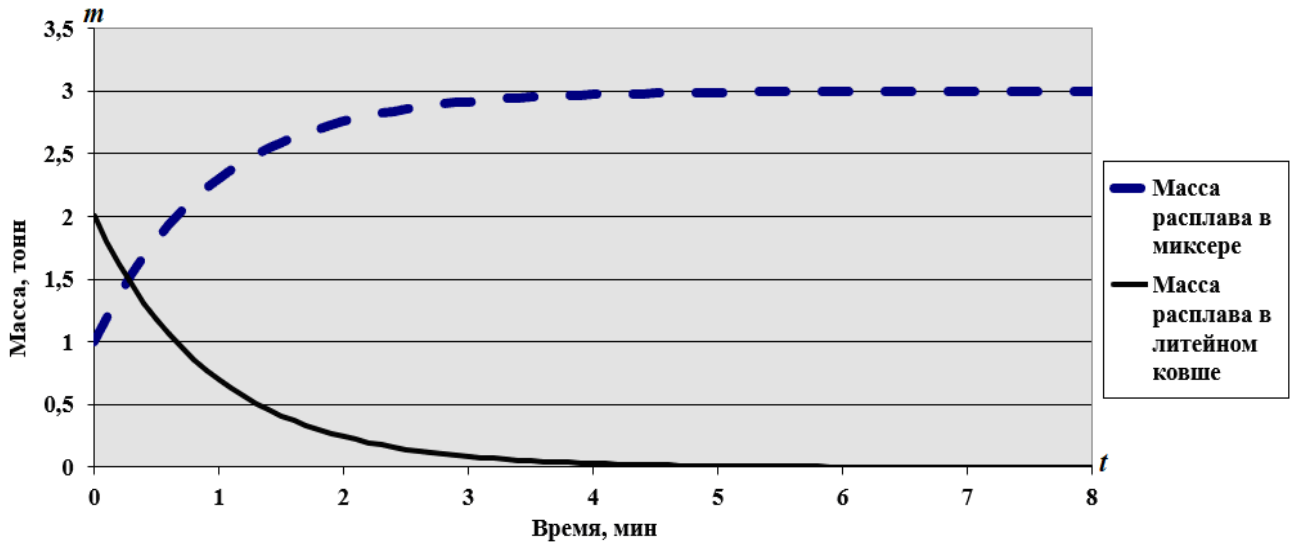


Рис. 1. Динамика формирования расплава в миксере при добавлении содержимого из i -го литейного ковша
Fig. 1. Dynamics of melt formation in the mixer when adding content from the i -th casting ladle

Задача Коши (6) для каждого химического элемента в плавильном миксере имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dm_{Fe}^M}{d\tau} = \gamma(m_{Fe_0}^M + m_{Fe_0}^i - m_{Fe}^M), m_{Fe}^M(0) = m_{Fe}^M, \\ \frac{dm_{Si}^M}{d\tau} = \gamma(m_{Si_0}^M + m_{Si_0}^i - m_{Si}^M), m_{Si}^M(0) = m_{Si}^M, \\ \dots \\ \frac{dm_{Sn}^M}{d\tau} = \gamma(m_{Sn_0}^M + m_{Sn_0}^i - m_{Sn}^M), m_{Sn}^M(0) = m_{Sn}^M. \end{cases} \quad (7)$$

Далее представлена задача Коши для основных элементов химического состава алюминиевого расплава, характеризующая скорость изменения масс этих элементов в литейных ковшах:

$$\begin{cases} \frac{dm_X^i}{d\tau} = -\gamma m_X^M, \\ m_X^i(0) = m_{X_0}^i. \end{cases} \quad (8)$$

Задача Коши (8) для каждого химического элемента в литейном ковше имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dm_{Fe}^i}{d\tau} = -\gamma m_{Fe}^M, m_{Fe}^i(0) = m_{Fe_0}^i, \\ \frac{dm_{Si}^i}{d\tau} = -\gamma m_{Si}^M, m_{Si}^i(0) = m_{Si_0}^i, \\ \dots \\ \frac{dm_{Sn}^i}{d\tau} = -\gamma m_{Sn}^M, m_{Sn}^i(0) = m_{Sn_0}^i, \end{cases} \quad (9)$$

где X – химический элемент расплава в плавильном миксере и литейных ковшах из множества $\{Fe, Si, Ti, Al, Cu, Zn, Mn, Mg, Pb, Sn\}$.

В свою очередь, уравнения теплового баланса построены на основе закона сохранения тепловой энергии, что позволяет рассчитывать температуру полученного алюминиевого расплава при смешивании двух различных расплавов с помощью соотношения

$$T_{распл} = \frac{(m_1 t_1 + m_2 t_2)}{(m_1 + m_2)} + \Delta T, \quad (10)$$

где $T_{\text{распл}}$ – рассчитываемая конечная температура расплава, °С; m_1, m_2 – массы исходного и добавляемого расплава, кг; t_1, t_2 – температура исходного и добавляемого расплава, кг; ΔT – приращение температуры за некоторое время τ , °С.

$$\Delta T = \int_0^{\tau} V_{\text{нагр}} d\xi - \int_0^{\tau} V_{\text{охл}} d\xi, \quad (11)$$

где τ – текущее время процесса, с; $V_{\text{нагр}}, V_{\text{охл}}$ – скорости нагрева и охлаждения расплава при включенных или выключенных нагревательных элементах в миксере, °С/с.

Химический состав формируемого алюминиевого расплава высчитывается поэлементно на каждом технологическом шаге при помощи соотношения

$$X_j^{\text{спл}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ji} m_i - \sum_{i=1}^n k_{ij} m_{\text{флюс}}}{m_{\text{микс}}}, \quad (12)$$

где $X_j^{\text{спл}}$ – концентрация j -го химического элемента в алюминиевом сплаве, ед.; x_{ji} – концентрация j -го химического элемента в i -м шихтовом материале, ед.; m_i – масса i -го шихтового материала, кг; k_{ij} – коэффициент удаления массы j -го химического элемента i -м флюсом; $m_{\text{флюс}}, m_{\text{микс}}$ – массы флюса и расплава в миксере, кг.

Значение себестоимости готовой продукции описывается соотношением

$$C_{\text{спл}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Pi_i + W_{\text{эл}} \Pi_{\text{эл}}}{m_{\text{спл}}} + S_{\text{др}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{спл}}$ – себестоимость сплава, руб./кг; m_i – масса i -го шихтового материала, кг; Π_i – цена i -го шихтового материала, руб./кг; $W_{\text{эл}}$ – количество затраченной электроэнергии, кВт; $\Pi_{\text{эл}}$ – цена электроэнергии, руб./кВт; $S_{\text{др}}$ – другие затраты на 1 кг продукции, руб./кг.

Процент выполнения заказа определяется с помощью соотношения

$$\eta_e = \frac{m_{\text{расплава}}}{m_{\text{заказа}}} 100\%, \quad (14)$$

где $m_{\text{заказа}}, m_{\text{расплава}}$ – масса заданного и масса сформированного расплава в миксере, кг.

В итоге вышеописанная математическая структура помогает формализовать описание технологического процесса изготовления алюминиевого расплава в миксере литейного отделения.

2. Интерпретация результатов математического моделирования

В таблице представлены исходные технологические данные, отражающие действительные значения основных элементов химического состава исходных литейных ковшей. На основе этих данных представлен процесс формирования алюминиевого расплава при последовательном смешивании алюминия-сырца из литейных ковшей через промежутки времени $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$.

Полученные результаты представлены на рис. 2–4 в виде графического отображения для соответствующих значений химических элементов алюминиевого расплава, полученных на основе решения задачи Коши (7).

Исходные технологические данные

№	Масса, кг	Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Mn	Mg	Pb	Sn
Ковш 1	4 099	0,143	2,831	0,128	91,385	3,026	0,066	0,023	2,244	0,079	0,075
Ковш 2	2 000	0,841	4,433	0,099	88,308	2,959	1,159	0,068	1,839	0,238	0,056
Ковш 3	4 000	0,069	0,811	0,198	91,409	2,499	2,257	0,051	2,445	0,161	0,10
Ковш 4	3 000	0,081	7,464	0,076	86,829	2,438	2,51	0,087	0,38	0,031	0,104
Ковш 5	1 000	0,706	7,063	0,153	88,042	1,906	0,398	0,004	1,519	0,082	0,127
Ковш 6	4 305	0,001	5,874	0,06	89,643	0,53	2,383	0,037	1,259	0,192	0,021
Ковш 7	1 000	0,797	4,624	0,053	89,295	2,668	1,763	0,087	0,425	0,268	0,02
Ковш 8	3 500	0,476	4,712	0,05	92,156	1,063	0,649	0,068	0,649	0,001	0,176

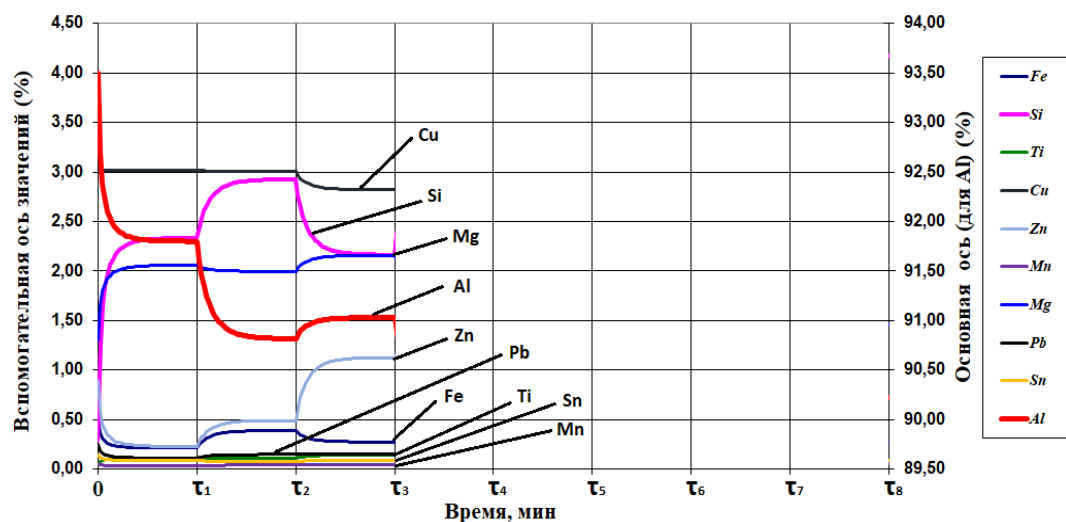


Рис. 2. Последовательное смешивание доступных расплавов из 3 литейных ковшей в плавильном миксере
Fig. 2. Sequential mixing of available melts from 3 casting ladles in a melting mixer

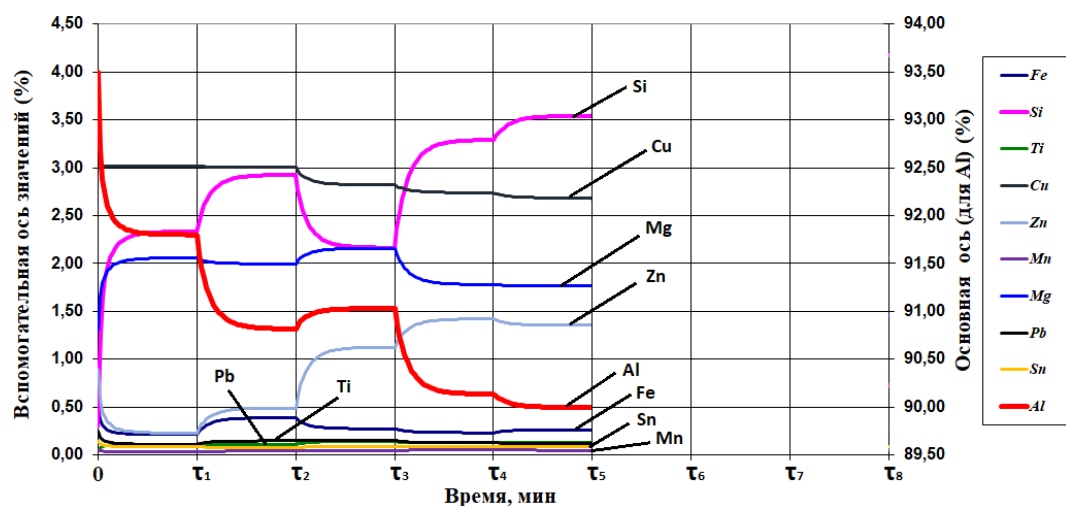


Рис. 3. Последовательное смешивание доступных расплавов из 5 литейных ковшей в плавильном миксере
Fig. 3. Sequential mixing of available melts from 5 casting ladles in a melting mixer

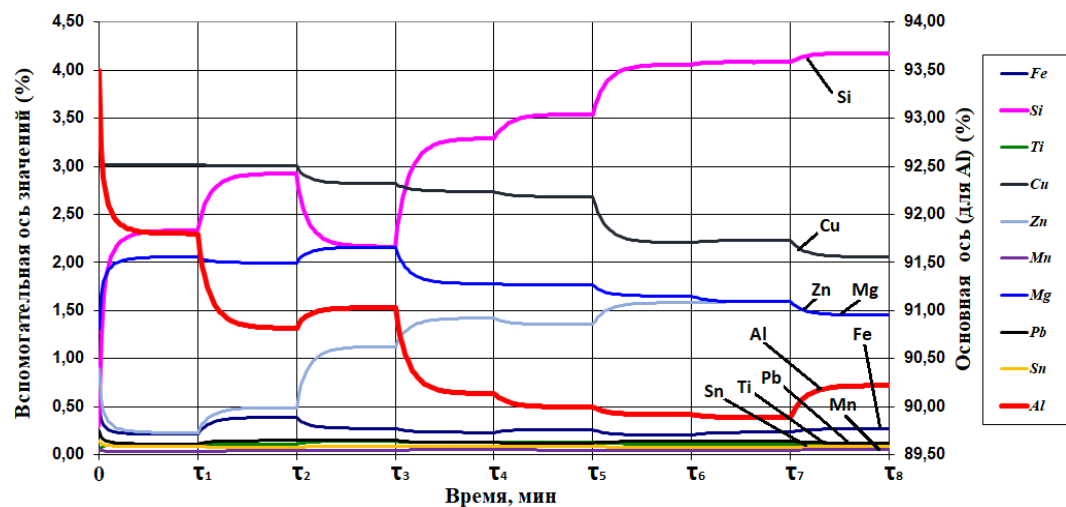


Рис. 4. Последовательное смешивание доступных расплавов из 8 литейных ковшей в плавильном миксере
Fig. 4. Sequential mixing of available melts from 8 casting ladles in a melting mixer

Представленные графики характеризуют процесс последовательного смешивания доступных литейных ковшей как результат вычислительного эксперимента на основе разработанной математической модели для формирования выходного химического состава расплава требуемой массы. Технологический процесс смешивания алюминия-сырца имеет инерционный характер протекания. Так, использование одного из выбранных ковшей характеризуется некоторой скоростью разливки, которая прямо пропорциональна оставшейся массе расплава в ковше, т.е. чем меньше остается доступного расплава в выбранном ковше, тем меньше скорость разливки алюминия-сырца.

Отображение многопараметрической динамической картины смешивания литейных ковшей в графическом виде обеспечивает возможность проведения визуально-событийного анализа реального процесса формирования алюминиевого расплава и является удобным инструментом для практического использования технологическим персоналом.

Заключение

На основе математических моделей материально-теплого баланса взаимодействующих веществ, а также модели динамики, характеризующей последовательный процесс модификации алюминиевого расплава, разработана соответствующая модель технологического процесса формирования требуемого химического состава алюминиевого расплава в плавильном миксере, предназначенная для проведения серии различных вычислительных экспериментов.

Предложенные математические модели могут быть использованы для анализа действующих режимов управления производственными агрегатами с целью улучшения текущих технико-экономических показателей производства алюминиевых сплавов, а также способны применяться для развития комплексного набора навыков при исследовании динамической реакции управляемого объекта в соответствии с произвольными воздействиями технологического персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машунин Ю.К. Математическое моделирование и выбор оптимальных параметров технологического процесса // Математические методы в технике и технологиях. 2020. № 2. С. 39–51.
2. Скуратов А.П., Шахрай С.Г., Фомичев И.В., Белянин А.В. Повышение экологической и энергетической эффективности производства алюминия // Исследование энергетической эффективности и экологических показателей оборудования алюминиевой промышленности. Красноярск : СФУ, 2018. 179 с.
3. Мартусевич Е.А., Буинцев В.Н., Калашиников С.Н. Структура и математические модели информационно-обучающей системы «Шихтовщик алюминиевого расплава» // Инженерный вестник Дона : электронный научный журнал. 2019. № 2 (53). 14 с.
4. Аверченков В.И., Козак Л.Я., Кобищанов В.В. Математическое моделирование сложных технологических объектов большой размерности факторного пространства в условиях пассивного эксперимента // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 3 (39). С. 86–94.
5. Козак Л.Я. Получение математических моделей управления металлургическим производством // Инновационная деятельность: теория и практика. 2016. № 6 (2). С. 63–67.
6. Манкаев Н.В. Математическое моделирование глобальной экономики: актуальные методы // Экономика и управление: проблемы, решения. 2019. № 3 (6). С. 121–129.
7. Кабаков З.К. Математические модели при освоении новых технологий в металлургии // Высшее образование в Российской Федерации. 2005. № 11. С. 74–78.
8. Пилипчук А.И. Экономико-математические модели и методы // Наука и молодежь: новые идеи и решения : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей. Волгоград, 2017. С. 333–335.
9. Сибицкий Н.В. Математические модели и оптимальные решения в условиях неполной информации // Автоматика и информатика. 2017. № 2 (41). С. 92–100.
10. Мясоедов А.И. Современные экономико-математические методы и модели в процессе принятия управленческих решений // Проблемы и перспективы экономики и управления : материалы VI Междунар. науч. конф. СПб., 2017. С. 150–153.
11. Сердюк В.С., Добренко А.М., Цорина О.А., Бакико Е.В., Янчий С.В. Математические модели для оценки производственных рисков // Проблемы машиностроения : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2018. С. 288–293.
12. Христинич Р.М., Велентеев А.М., Головенко Е.А., Христинич А.Р. МГД-технологии рафинирования и приготовления алюминиевых сплавов в транспортных ковшах // Электрометаллургия. 2008. № 11. С. 1–8.

13. Горюхин А.С., Гайнцева Е.С., Шайхутдинова И.И. Модель экспертной системы автоматизированного управления технологической подготовкой производства отливок из алюминиевых сплавов // Information technologies for intelligent decision making support itids. Уфа, 2015. С. 183–187.
14. Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Параметризация задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с предельными особыми точками // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. № 6 (57). С. 934–957.

Поступила в редакцию 12 февраля 2021 г.

Kalashnikov S.N., Martusevich E.A., Martusevich E.V., Buintsev V.N. (2021) MATHEMATICAL MODELING OF THE CURRENT TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMING AN ALUMINUM MELT IN THE MIXER OF THE FOUNDRY DEPARTMENT. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 56. pp. 20–28

DOI: 10.17223/19988605/56/3

Improving the existing technology for the production of aluminum and its alloys is still an urgent task. The search for a solution to the presented technological problem is directly related to improving the technical and economic indicators of production, as well as increasing the efficiency of the corresponding algorithms for modifying aluminum alloys. The use of a mathematical apparatus to formalize the features of the presented production process will ensure finding the most optimal option for the formation of established grades of aluminum alloys in the foundry department of an industrial enterprise. This becomes possible thanks to the conduct of an unlimited number of scientific experiments and empirical operations aimed at calculating the required values of the parameters for mixing raw aluminum from casting ladles.

At the same time, it is possible to analyze the already obtained values of the concentrations of chemical elements of raw aluminum in casting ladles, taking into account the specified requirements of the order portfolio, in order to selectively modify the fundamental elements of the chemical composition of the formed grade of aluminum alloy. The software-algorithmic implementation of the presented mathematical model using modern high-performance devices and computers will ensure a higher competitiveness of finished products in the non-ferrous metals market due to a systematic reduction in the cost of producing a ton of metal and obtaining new practical results.

Also, the formalization of the technological process and the development of a mathematical model of the investigated process will allow organizing initial training and professional retraining of technological personnel of an industrial enterprise. Carrying out career guidance activities and organizing the process of improving the qualifications of technological personnel are possible by setting up various options for the initial combinations of casting ladles and determining the initial conditions of the set technological problem, taking into account the current production features and the available set of available modifying materials.

The result of this study is the development of a mathematical model of the process of forming an aluminum melt in a mixer in the foundry department, consisting of equations of heat and material balances, taking into account the physicochemical laws of the course of metallurgical processes based on the law of conservation of masses in relation to the selected heterogeneous system.

In addition, it is worth noting that using mathematical modeling, it is possible to continuously monitor the most important indicators of the technological process based on similar mathematical models in order to further improve the existing software complex or information system of the enterprise to an independent automated control system and user decision-making.

Keywords: mathematical model; computational experiment; technological process; aluminum melt; mixing parameters.

KALASHNIKOV Sergey Nikolaevich (Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation).

E-mail: s.n.kalashnikov@yandex.ru

MARTUSEVICH Efim Aleksandrovich (Junior Researcher, Post-graduate Student of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation).

E-mail: program.pro666@yandex.ru

MARTUSEVICH Elena Vladimirovna (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Science Disciplines named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation).

E-mail: science_nvkh@yandex.ru

BUINTSEV Vladimir Nikolaevich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation).

E-mail: buintsev@mail.ru

REFERENCES

1. Mashunin, Yu.K. (2020) Mathematical modeling and selection of the optimal parameters of technological process. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologii*. 2. pp. 39–51.
2. Skuratov, A.P., Shakhrai, S.G., Fomichev, I.V. & Belyanin, A.V. (2018) Improving the environmental and energy efficiency of aluminum production. In: *Issledovanie energeticheskoy effektivnosti i ekologicheskikh pokazateley oborudovaniya alyuminievoy promyshlennosti* [Research of energy efficiency and environmental performance of equipment for the aluminum industry]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University.
3. Martusevich, E.A., Buintsev, V.N. & Kalashnikov, S.N. (2019) The structure and mathematical models of the information system “Aluminum melt Mixer”. *Inzhenernyy vestnik Dona – Engineering Journal of the Don*. 2(53).
4. Averchenkov, V.I., Kozak, L.Ya. & Kobishchanov, V.V. (2013) Mathematical modeling of production facility of high dimension of the factorspace in conditions passive experiment. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk State Technical University*. 3(39). pp. 86–94.
5. Kozak, L.Ya. (2016) Poluchenie matematicheskikh modeley upravleniya metallurgicheskim proizvodstvom [Obtaining mathematical models of metallurgical production management]. *Innovatsionnaya deyatel'-nost': teoriya i praktika*. 6(2). pp. 63–67.
6. Mankaev, N.V. (2019) Matematicheskoe modelirovanie global'noy ekonomiki: aktual'nye metody [Mathematical modeling of the global economy: topical methods]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 3(6). pp. 121–129.
7. Kabakov, Z.K. (2005) Matematicheskie modeli pri osvoenii novykh tekhnologiy v metallurgii [Mathematical models in the development of new technologies in metallurgy]. *Vysshee obrazovanie v Rossiyskoy Federatsii - Higher Education in Russia*. 11. pp. 74–78.
8. Pilipchuk, A.I. (2017) [Economic and mathematical models and methods]. *Nauka i molodezh': novye idei i resheniya* [Science and Youth: New Ideas and Solutions]. Proc. of the 11th International Conference of Young Researchers. Volgograd. pp. 333–335.
9. Skibitsky, N.V. (2017) Mathematical models and optimal solutions in conditions of incomplete information. *Avtomatika i informatika – Automatic. Computer Science*. 2(41). pp. 92–100.
10. Myasoedov, A.I. (2017) [Modern economic and mathematical methods and models in the process of making managerial decisions]. *Problemy i perspektivy ekonomiki i upravleniya* [Problems and Prospects of Economics and Management]. Proc. of the Sixth International Conference. St. Petersburg. pp. 150–153.
11. Serdyuk, V.S., Dobrenko, A.M., Tsorina, O.A., Bakiko, E.V. & Yanchiy, S.V. (2018) [Mathematical models for assessing industrial risks]. *Problemy mashinostroeniya* [Problems of Mechanical Engineering]. Proc. of the Second International Conference. Omsk. pp. 288–293.
12. Khristinich, R.M., Velenteeko, A.M., Golovenko, E.A. & Khristinich, A.R. (2008) MGD-tekhnologii rafinirovaniya i prigotovleniya alyuminievykh splavov v transportnykh kovshakh [MHD-technologies for refining and preparation of aluminum alloys in transport buckets]. *Elektrometallurgiya – Russian Metallurgy*. 11. pp. 1–8.
13. Goryukhin, A.S., Gayntseva, E.S. & Shaikhutdinova, I.I. (2015) [Model of an expert system for automated control of technological preparation for the production of castings from aluminum alloys]. *Information technologies for intelligent decision making support*. Proceedings of the 4th International Conference. Ufa. pp. 183–187.
14. Kuznetsov, E.B. & Leonov, S.S. (2017) Parametrizatsiya zadachi Koshi dlya sistem obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy s predel'nymi osobymi tochkami [Parametrization of the Cauchy problem for systems of ordinary differential equations with limiting singular points]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 6(57). pp. 934–957.