

European Commission
TEMPUS

The mathematical models and results of classification of alloys on the basis of aluminum on the specified brand with use of parameters of the computer thermal analysis are presented.

Д. С. МОРОЗОВ, П. Е. ЛУЩИК, И. В. ШЕСТЮК, БНТУ

Научный руководитель канд. техн. наук, доцент И. В. РАФАЛЬСКИЙ, БНТУ

УДК 621.746

КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области разработки методов и средств контроля качества литых изделий, проблема управления качеством литейной продукции остается весьма актуальной. Эффективность производства во многом определяется качеством выпускаемой продукции, обусловленным применяемыми технологиями, с должным обеспечением контроля на всех этапах технологического процесса.

Основными этапами в технологической цепи контроля качества сплава в плавильных печах являются процессы получения информации, передачи и обработки данных, принятие управленческих решений. При этом ключевым звеном является этап построения математических моделей контроля свойств объектов, обеспечивающих адекватную оценку контролируемых параметров.

Важно учитывать при этом, что математические модели, полученные с использованием методов регрессионного анализа, ограничены диапазонами входных параметров. Это приводит к тому, что контроль состава и свойств сплавов, получаемых в процессе плавки, может устанавливаться только строго в соответствии с заданными марками сплавов. В реальных производственных условиях параметры технологического процесса могут изменяться в очень широких диапазонах, выходящих за рамки модельных ограничений.

Функционирование системы контроля металлургических процессов методом компьютерного термического анализа (КТА) можно разделить на четыре основных этапа:

- сбор данных КТА для каждой марки сплава и определение параметров его структуры, свойств и химического состава;

- построение математической зависимости параметров структуры, свойств и химического состава от параметров КТА для каждой марки сплава;

- автоматическая идентификация марки сплава, выбор соответствующей математической модели;

- контроль параметров структуры, свойств и химического состава для данного типа сплава.

Структурная схема контроля металлургических процессов при производстве отливок методом компьютерного термического анализа (КТА) показана на рис. 1.

Применяемые в схеме контроля металлургических процессов математические модели представляют собой систему уравнений, отражающих зависимости различных технологических факторов и свойств объектов контроля. Для построения и использования математического моделирования реализуются следующие этапы:

- формализованное описание кривых охлаждения сплавов, отражающих процесс их затвердевания;

- выбор типа математической модели на основе выделенных в процессе формализованного описания входных данных (структурная идентификация модели);

- расчет коэффициентов модели (параметрическая идентификация модели);

- проверка адекватности математической модели.

В процессе формализации обучающих наборов данных в качестве входных параметров математических моделей, характеризующих объект контроля, выделяется заданное множество параметров температурно-временных зависимостей (кривых охлаждения), связанных с фазовыми превращениями алюминиевого сплава при затвердевании.

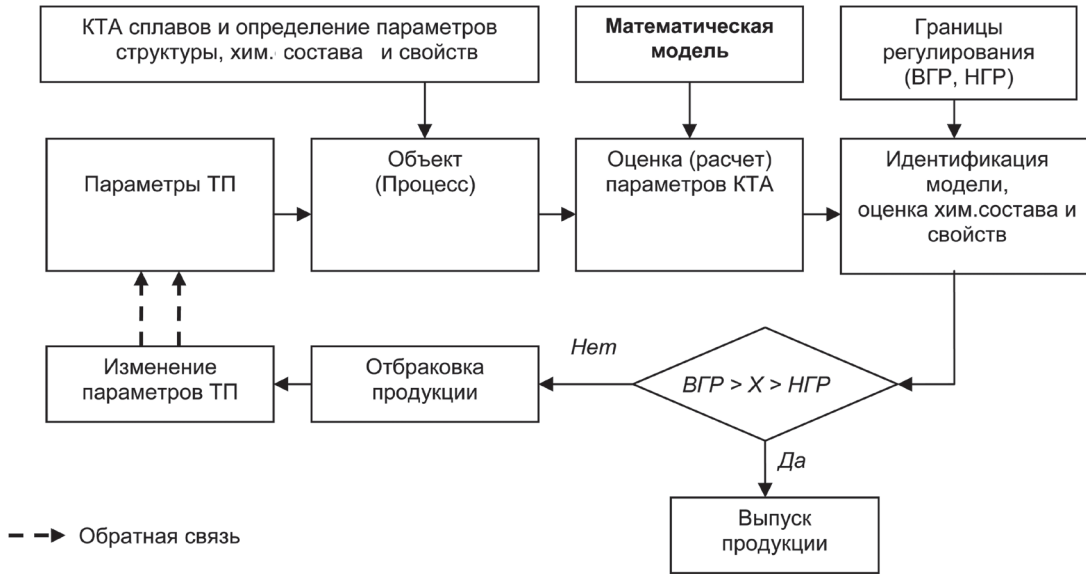


Рис. 1. Структурная схема контроля металлургических процессов при производстве отливок методом компьютерного термического анализа

Формализованные параметры (критические точки) вычислялись с использованием первой и второй производных температуры по времени (рис. 2).

Ниже представлены теплофизические параметры температурно-временных зависимостей:

TL – температура начала затвердевания, точка кривой охлаждения, соответствующая первому максимуму второй производной;

TLP – первая точка на графике первой производной температуры от времени, которая принимает нулевое значение и меняет знак с минуса на плюс, соответствует на кривой охлаждения минимально-

му переохлаждению после начала кристаллизации сплава;

TLH – вторая точка на графике производной температуры от времени, которая принимает нулевое значение и меняет свое значение с плюса на минус, соответствует на кривой охлаждения максимальной рекалесценции (увеличения температуры) после начала кристаллизации сплава;

TEL – третья точка на графике производной температуры от времени, которая принимает нулевое значение и меняет знак с минуса на плюс, соответствует на кривой охлаждения минимальному

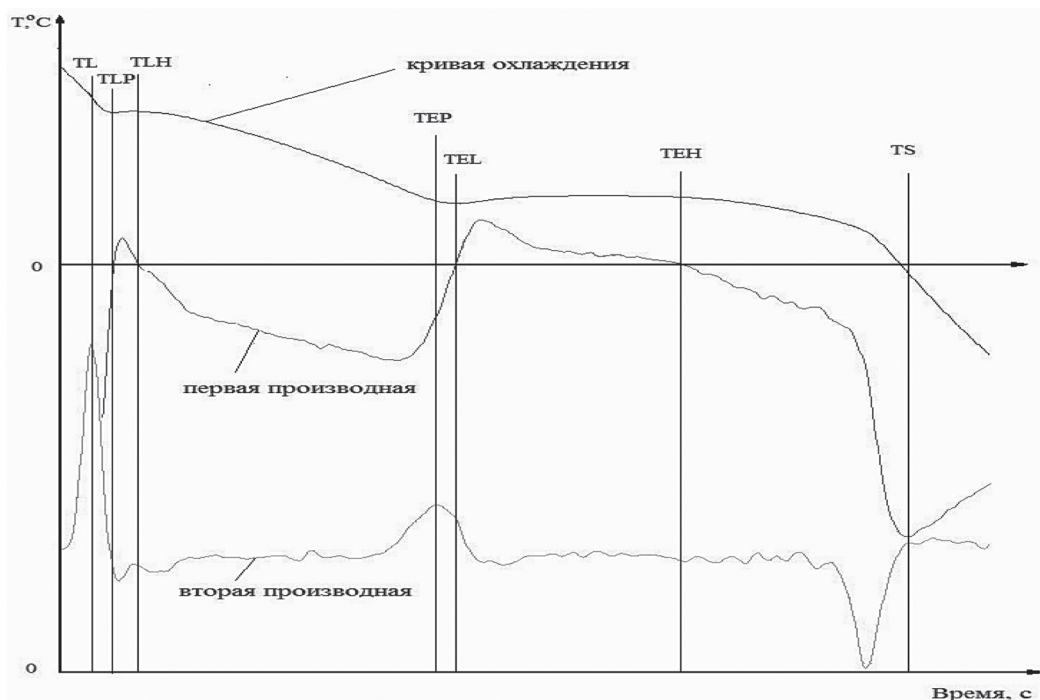


Рис. 2. Кривая охлаждения (термограмма) сплава системы Al-Si с производными первого и второго порядков

переохлаждению после начала эвтектической кристаллизации сплава;

TEP – точка кривой охлаждения, в которой наблюдается второй максимум производной первого порядка;

TEH – четвертая точка на графике производной температуры от времени, которая принимает нулевое значение и меняет свое значение с плюса на минус, соответствует на кривой охлаждения максимальной рекалесценции (увеличения температуры) после начала эвтектической кристаллизации сплава;

TS – точка кривой охлаждения, соответствующая окончанию процесса затвердевания сплава и определяемая по минимуму на графике первой производной.

С целью идентификации марки сплава на основе алюминия осуществлялось формирование тестовых наборов экспериментальных данных термического анализа (НДТА) для сплавов АК12М2МгН, АК9, АК9ч, АК5М4 и АД31.

В результате компьютерного термического анализа сплавов АК12М2МгН, АК9, АК9ч, АК5М4 и АД31 была построена диаграмма распределения сплавов в двухмерных пространствах информативных признаков – параметров КТА. Полученная диаграмма представлена на рис. 3.

Процесс автоматизированной идентификации сплава проводился с использованием параметров КТА, соответствующих началу и окончанию затвердевания сплава. Идентификация сплава проводилась на основе модели метрической классификации с использованием статистических оценок от-

клонений значения признака от среднего значения по классу, которые могут быть получены на основе метода наименьших квадратов:

$$G_L(X_j) = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i^L)^2, \quad (1)$$

где L – номер класса ($L = 1, 2, \dots$); j – номер объекта контроля; i – номер информативного признака; m – количество информативных признаков в выбранной совокупности; \bar{x}_i^L – оценка математического ожидания i -го признака для объектов класса с номером L .

В рамках рассматриваемой модели решение о принадлежности объекта контроля заданному классу устанавливается в соответствии со значением вероятности принадлежности объекта Z к заданному классу L на основе функции:

$$P(Z \in L) = \begin{cases} 0, & \text{при } G_L = 0, \\ 1 - e^{\ln(0,5)G_L/G_I}, & G_L \neq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где G_I, G_L – статистические оценки отклонений значений признака от среднего значения по классу.

Границы областей, соответствующих заданным маркам сплавов АК12М2МгН, АК9, АК9ч, АК5М4 и АД31, представлены на рис. 4 в виде диаграммы распределения вероятности принадлежности к заданным маркам сплавов в двухмерном пространстве информативных признаков – параметров КТА. Границей двух смежных классов является линия, соответствующая 50% вероятности принадлежности сплава к заданному классу, при этом каждой точке граничной линии соответствует ста-

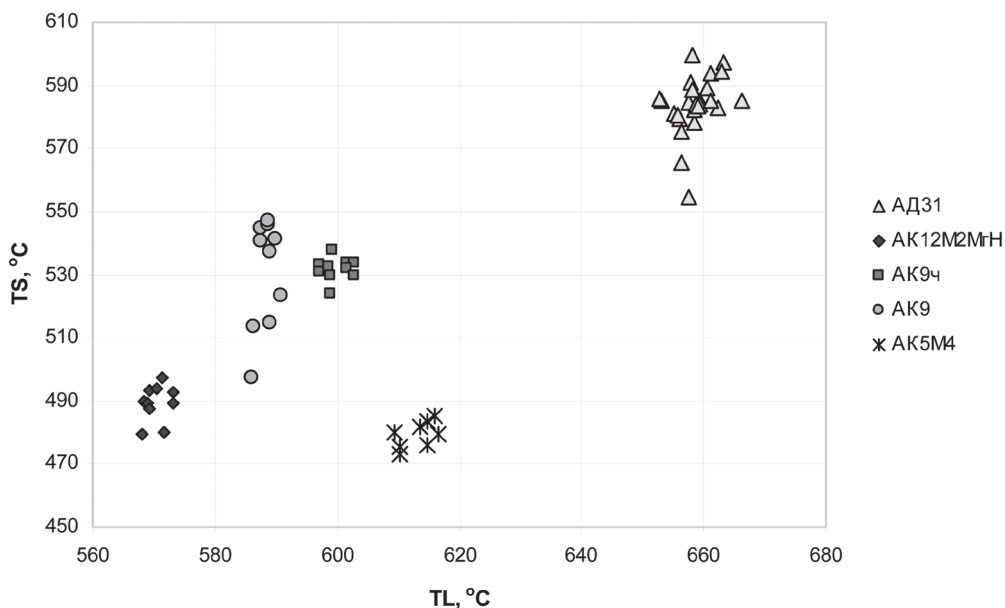


Рис. 3. Диаграмма классификации литейных сплавов АД31, АК12М2МгН, АК9ч, АК9, АК5М4 в пространстве параметров КТА

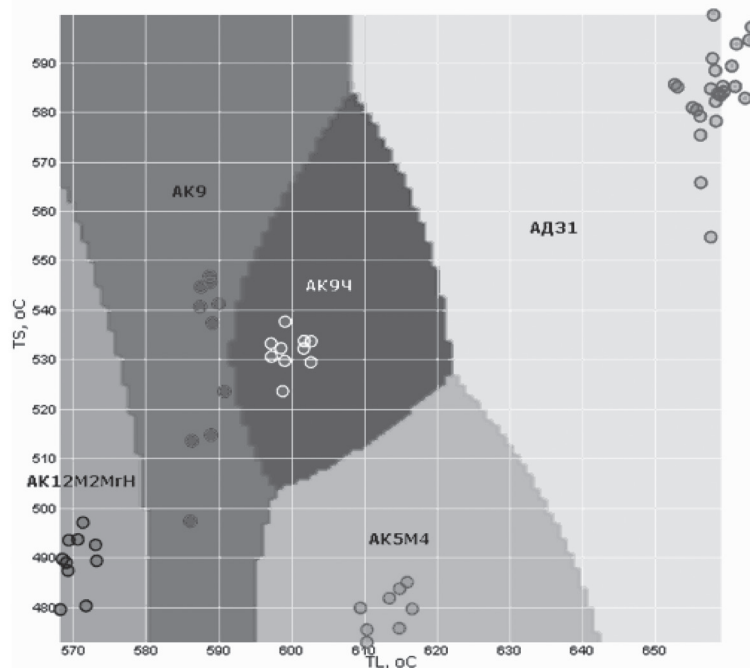


Рис. 4. Диаграмма распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al-Si к маркам сплавов АК12М2МгН, АК9, АК9ч, АК5М4, АДЗ1

статистическая оценка отклонений значений признака $G_L = G_f$.

Приведенная диаграмма позволяет провести идентификацию сплава и определить, по каким регрессионным математическим моделям проводить дальнейший расчет параметров.

На следующем этапе были построены регрессионные модели для определения содержания основных элементов химического состава сплавов АК9 и АК9ч.

Выбор входных параметров модели осуществлялся на основе данных корреляционного анализа, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты линейной парной корреляции между параметрами КТА и содержанием основных элементов химического состава сплавов АК9 и АК9ч

Элемент	TL, °C	TLP, °C	TLH, °C	TEP, °C
Si	-0,93	-0,93	-0,83	-0,93
Mg	0,88	0,87	0,82	0,88
Mn	0,96	0,96	0,86	0,96
Cu	-0,96	-0,96	-0,86	-0,96
Zn	-0,95	-0,95	-0,9	-0,95

На этапе структурной идентификации математической модели на основе выделенных в процессе формализованного описания входных данных было выбрано нелинейное полиномиальное уравнение (нелинейная множественная регрессия) второго порядка:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2 + b_3 X_2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_3 + \dots + b_n X_n^2, \quad (3)$$

где Y_i – зависимая переменная, соответствующая контролируемому параметру; X_j, X_n – значения входного параметра в j -м эксперименте.

В результате проведенной параметрической идентификации нелинейных моделей были получены следующие уравнения нелинейной регрессии:

для определения содержания кремния

$$Y_1 = 1493,666 + 5,024967X_1 - 0,00395X_1^2 + 45,57275 X_2 - 0,03763 X_2^2 - 0,00785X_3 - (3,9E-07)X_3^2 - 55,4848X_4 + 0,045615X_4^2;$$

для определения содержания магния

$$Y_2 = -83,2173 + 5,024967X_1 - 0,00395X_1^2 - 1,50009X_2 + 0,001207X_2^2 + 0,001532X_3 - (1,8E-08)X_3^2 + 13,41187X_4 - 0,01126X_4^2;$$

для определения содержания марганца

$$Y_3 = -74,0873 - 0,22150X_1 + 0,000174X_1^2 - 8,52733X_2 + 0,007102X_2^2 + 0,001411X_3 + (2,96E-08) X_3^2 + 8,979689X_4 - 0,00745 \cdot X_4^2;$$

для определения содержания меди

$$Y_4 = 167,6394 - 8,16149X_1 + 0,006821 \cdot X_1^2 + 9,885537X_2 - 0,00823X_2^2 - 0,00084X_3 - (1,0E-07) X_3^2 - 2,25676X_4 + 0,001842 \cdot X_4^2;$$

для определения содержания цинка

$$Y_5 = 38,10446 + 0,520759X_1 - 0,00044X_1^2 + 1,521415X_2 - 0,00126X_2^2 - 0,00104X_3 - (9,2E - 09) X_3^2 - 2,16499X_4 + 0,001805X_4^2.$$

Проверка адекватности полученных моделей проводилась с использованием критерия Фишера. Расчетные и табличные (критические) значения критерия Фишера приведены в табл. 2.

Полученные уравнения регрессии являются адекватными, так как рассчитанные значения F -критерия не превышают табличных $F_{\text{табл}}$ для выбранного уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Представленные математические модели обеспечивают возможность автоматизированной

Таблица 2. Расчетные и табличные значения критерия Фишера

Зависимая переменная	$F_{\text{табл}}$	$F_{\text{расч}}$
Si	2,4	0,11
Mg		0,15
Mn		0,07
Cu		0,06
Zn		0,08

классификации сплавов на основе алюминия по заданной марке с использованием параметров компьютерного термического анализа. Оценка содержания основных элементов химического состава литейных сплавов АК9, АК9ч может проводиться с использованием полученных регрессионных моделей.