

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

И. В. Рафальский, Д. С. Морозов, А. В. Арабей
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Важнейшим элементом в технологической цепи контроля качества литейной продукции является обеспечение контроля и управления составом и свойствами литейных сплавов, при этом исключительно важным является решение задачи формализованного описания и идентификации математических моделей, описывающих свойства сплавов в процессе плавки.

В работе проведен анализ проблемы формализованного описания экспериментальных температурно-временных зависимостей (термограмм) силуминов, полученных с использованием метода компьютерного термического анализа (КТА), а также существующих математических методов классификации и принятия решений для обеспечения экспрессного контроля содержания кремния в сплавах системы Al-Si.

В настоящее время КТА достаточно широко используется как средство контроля процессов выплавки и обработки сплавов, особенно на крупных производствах, которые используют автоматические заливочные линии, что требует постоянного и строгого контроля в режиме реального времени. Экспрессный анализ параметров затвердевания сплава обеспечивает возможность быстрой и точной оценки состава литейного чугуна, стали и цветных литейных сплавов, проводимым непосредственно на рабочей площадке плавильных агрегатов, в том числе для определения углеродного эквивалента (CE, %), содержания углерода (C, %) и кремния (Si, %). В литейных чугунах этим методом оценивают эффективность модифицирования и инокуляции, степень раскисления стали, измельчения зерна, характеристики микроструктуры алюминиевых литейных сплавов, оценки риска образования макро- и микропористости в отливках и др. КТА также широко используют для определения температур начала и конца кристаллизации сплава при затверде-

вании жидкой фазы, определения объемной доли твердой фазы в интервале кристаллизации сплава.

Необходимо отметить, что практическое применение КТА в задачах контроля состава и свойств литейных сплавов связано со сложностью формализованного описания и интерпретации кривых охлаждения. Методы формализованного описания свойств сплавов с использованием данных КТА основаны на результатах математической обработки кривой охлаждения (зависимости «температура–время») с выявлением на ней характерных точек, соответствующих протекающим фазовым превращениям, и построении математических моделей, описывающих состав и свойства сплавов.

Одной из наиболее сложных проблем, затрудняющей интерпретацию и формализованное описание кривых охлаждения сплавов, является изменчивость формы кривых охлаждения в зависимости от фазового состава сплава и интенсивности выделения теплоты кристаллизации для каждого момента времени затвердевания сплава. Отклонения кривых охлаждения от экспоненциальной зависимости могут носить сложный характер, поэтому параметры кривых охлаждения (критических точек) крайне трудно поддаются определенной классификации или систематизации с точки зрения формирования строго упорядоченных массивов данных для описания кривой охлаждения сплава.

Важно учитывать, что математические модели, полученные с использованием методов регрессионного анализа, ограничены конкретными диапазонами входных параметров, например, концентраций компонентов. Это приводит к тому, что контроль состава и свойств сплавов, получаемых в процессе плавки, устанавливается строго в соответствии с марками или типами сплавов. Оценки выходных параметров модели являются кор-

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

ректными только в том случае, если входные параметры математической модели соответствуют установленным ограничениям на модель. В реальных же технологических процессах параметры технологического процесса (и зависимые от них входные параметры модели, например, параметры кривых охлаждения сплавов) могут изменяться в очень широких диапазонах, выходящих за рамки модельных ограничений.

Регрессионные модели для оценки содержания кремния в силуминах с использованием в качестве входных параметров модели температур начала и окончания кристаллизации сплава, ограничены областями, верхней или нижней границей которых является концентрация в эвтектической точке. В том случае, если в процессе плавки концентрация основного легирующего элемента (кремния) окажется больше (для доэвтектических сплавов) или меньше (для заэвтектических сплавов), чем эвтектическая, результат оценки состава сплава может оказаться неверным. Это объясняется тем, что одно и то же значение температуры ликвидус в интервале температур 577 – 660 °С может соответствовать как доэвтектическому, так и заэвтектическому сплаву (например, для сплавов Al–1,8%Si и Al–18%Si температура ликвидус составляет около 650 °С).

В настоящее время для решения проблем идентификации объектов и систем со сложным поведением параметров широко привлекают математические методы и модели классификации и принятия решений, из которых наиболее известными являются бай-

есовская стратегия принятия решений, метод k-ближайших соседей, метод сравнения с эталоном по минимуму расстояний, метод сравнения с эталоном по максимуму функции корреляции и др.

В настоящей работе рассматриваются методологические аспекты контроля содержания кремния в широком диапазоне концентраций в сплавах системы Al-Si на основе данных компьютерного термического анализа с использованием математических методов метрической классификации.

Разработанный метод основан на вычислении вероятности принадлежности объекта Z к заданному классу L на основе функции:

$$P(Z \in L) = 1 - e^{-\ln(0.5) \cdot GL / G1} \quad (1)$$

где $G1$, GL - статистические оценки отклонений значений признака от среднего значения по классу.

Для реализации методов автоматизированной классификации сплавов системы Al-Si по признаку принадлежности к группе доэвтектических или заэвтектических сплавов на основе экспериментальных данных компьютерного термического анализа в работе построена диаграмма распределения сплавов в двухмерном пространстве контролируемых признаков. В качестве разделяющих признаков использованы температура ликвидус сплава и массовая доля твердой фазы, выделившийся до начала эвтектической кристаллизации.

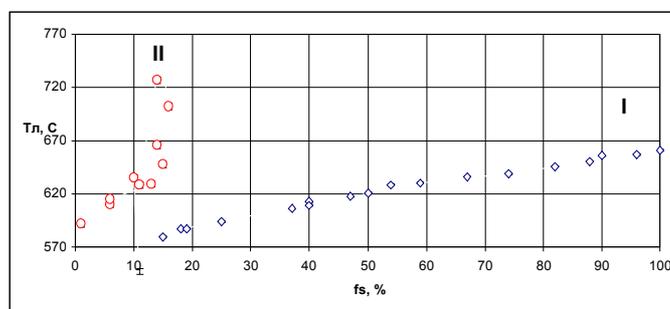


Рисунок 1 – Диаграмма распределения сплавов системы Al-Si:
I – область доэвтектических сплавов;
II – область заэвтектических сплавов.

В связи с тем, что полученные экспериментальные данные характеризуются функцией распределения объектов, близкой к линейному закону (коэффициент линейной парной корреляции для доэвтектических сплавов составляет 0,99), в работе предложен метод классификации сплавов с использованием метрических оценок, представляющих наименьшие расстояния от объекта контроля до базовой линии (линии регрессии), рассчитанной методом наименьших квадратов для объектов заданного класса:

$$G_L(X_j) = \frac{\prod_{i=1}^m |x_{ij} - \hat{x}_i^L|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \hat{x}_i^L)^2}}, \quad (2)$$

где \hat{x}_i – расчетное значение i -го признака, соответствующего базовой линии для объектов класса с номером L ;

m – число признаков, используемых для идентификации объектов в двумерном пространстве ($m=2$).

С использованием модели (2) была по-

строена диаграмма распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al-Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов, с учетом линейного распределения объектов (рисунок 2).

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что использованный метод метрической классификации позволяет проводить идентификацию сплава системы Al-Si и принятие решения о его принадлежности к группе доэвтектических или заэвтектических сплавов в автоматизированном режиме с использованием аппаратно-программных средств обработки данных КТА при наименьшем числе ошибок (для исследованной выборки число ошибок классификации равно нулю).

После классификации сплава (определения принадлежности к группе доэвтектических или заэвтектических сплавов) расчет содержания кремния в сплаве может осуществляться с использованием регрессионных математических моделей.

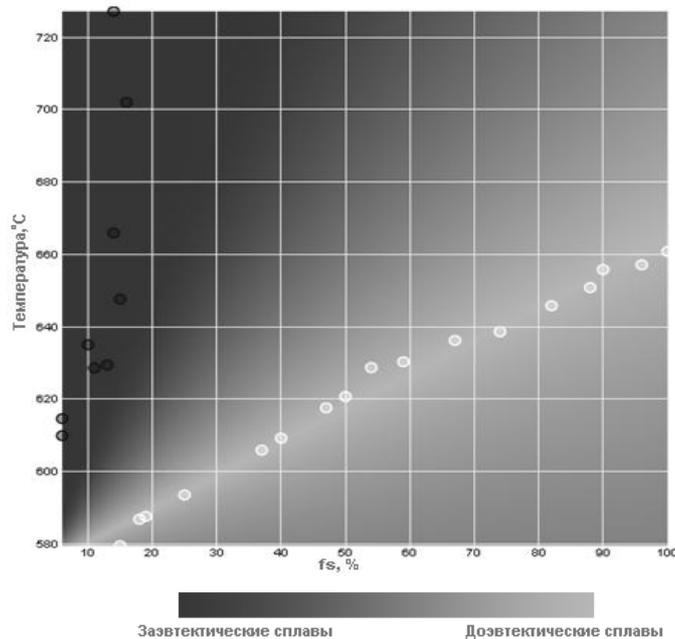


Рисунок 2 - Диаграмма распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al-Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов на основе метрических оценок, полученных методом расчета наименьших расстояний от объекта контроля до базовой линии