

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
И.В. МОРОЗОВ,
А.В. АРАБЕЙ (БНТУ)

ЭКСПРЕССНЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Al-Si С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МЕТРИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Эффективность литейно-металлургического производства определяется себестоимостью и качеством выпускаемой продукции, обусловленных стоимостными показателями и структурой затрат, применяемыми технологиями, с должным обеспечением контроля на всех этапах процесса. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области разработки методов и аппаратных средств контроля качества литых изделий, проблема обеспечения оперативного контроля и управления качеством литейной продукции остается весьма актуальной.

Важнейшим элементом в технологической цепи контроля качества продукции металлургических и машиностроительных предприятий является обеспечение контроля и управления составом и свойствами 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 термического анализа, а также существующих математических методов классификации и принятия решений для обеспечения экспрессного контроля содержания кремния в сплавах системы Al-Si с использованием данных термического анализа (ТА) пробы расплава.

Термический анализ является одним из основных методов получения данных о свойствах литейных сплавов. Научные работы в области термического анализа, посвященные изучению диаграмм состояния сплавов и зависимостей между их свойствами и соста-

вом, позволили впервые осуществить систематическое исследование сплавов. Являясь высокочувствительным методом измерения теплофизических характеристик, ТА широко используется не только в научных целях, но и для решения практических задач экспрессного контроля качества сплавов. С появлением прецизионных микропроцессорных средств сбора и обработки данных ТА появилась возможность записывать и анализировать кривые охлаждения в режиме реального времени с высокой точностью, что привело к росту практического их применения в последние годы за рубежом.

В настоящее время ТА 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. Термический анализ обеспечивает возможность быстрого и точного экспресс-анализа чугуна, стали и цветных сплавов, проводимого непосредственно на рабочей площадке плавильных агрегатов, в том числе позволяет определять углеродный эквивалент (CE, %), содержание углерода (C, %) и кремния (Si, %) в чугунах, эффективность модифицирования и инокуляции, углеродный эквивалент и степень раскисления стали, степень измельчения зерна, характеристики микроструктуры модифицирования алюминиевых сплавов и другие свойства сплавов. ТА широко используют для определения температур начала и окончания кристаллизации сплава при затвердевании жидкой фазы, определения объемной доли твердой фазы в интервале кристаллизации сплава, оценки риска образования макро- и микропористости в отливках и слитках.

Необходимо отметить, что практическое применение ТА в задачах контроля состава и свойств сплавов связано со сложностью формализованного описания и интерпретации кривых охлаждения. Методы формализованного описания свойств сплавов с использованием данных ТА 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 при этом, 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 корректными только в том случае, если входные параметры математической модели соответствуют установленным ограничениям на модель. В реальных же технологических процессах параметры 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 силименах с использованием в качестве входных параметров модели температур начала и окончания кристаллизации сплава ограничены областями, верхней или нижней границей которых является эвтектическая точка. 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 (рисунок 1). 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 привле-

кают математические методы и модели классификации, из которых наиболее известными являются байесовская стратегия принятия решений, метод k -ближайших соседей, метод сравнения с эталоном по минимуму расстояний, метод сравнения с эталоном по максимуму функции корреляции и другие [1].

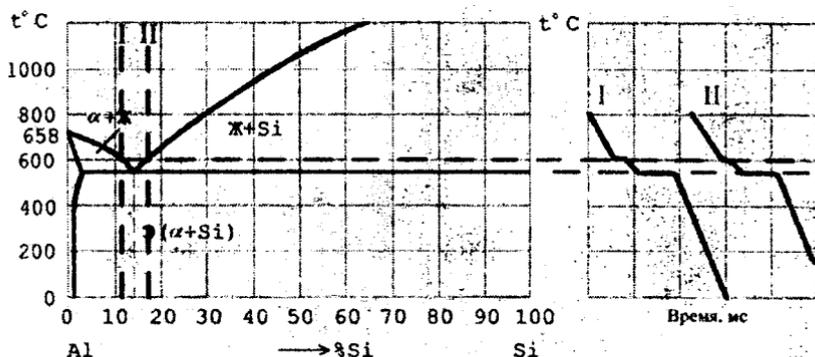


Рисунок 1 – Связь диаграммы состояния системы Al–Si с температурно-временными зависимостями (кривыми охлаждения) двухкомпонентных сплавов доэвтектического (I) и заэвтектического (II) типов, полученными при термическом анализе пробы расплава

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

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

$$P(Z \in L) = 1 - e^{\ln(0,5) \cdot G_L / G_1}, \quad (1)$$

где G_1 , G_L – статистические оценки отклонений значений признака от среднего значения по классу.

Статистические оценки отклонений значений признака от среднего значения по классу могут быть получены на основе метода наименьших квадратов:

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

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

Также могут быть использованы функции, построенные на оценках наименьших расстояний от объекта контроля до «эталонных объектов» в пространствах, подлежащих контролю признаков:

$$G_L(X_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i^L)^2}. \quad (3)$$

В качестве «эталонного объекта» используется вектор средних значений по признакам для каждого класса.

В случае если контролируемые параметры существенно отличаются по характеристикам рассеивания (разброса) измеряемых величин, более целесообразным является использование нормированных оценок отклонений признака от среднего значения по величине дисперсии:

$$G_L(X_j) = \sum_{i=1}^n [(x_{ij} - \bar{x}_i^L)^2 / (S_i^L)^2], \quad (4)$$

где S_i^L – дисперсия i -го признака для объектов класса с номером L .

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

Расчет массовой доли твердой фазы, выделяющейся при кристаллизации сплава, осуществляли на основе уравнения теплового

баланса системы «расплав–форма» с учетом выделения скрытой теплоты кристаллизации [2]:

$$\frac{dQ_L}{dt} - mc \frac{dT}{dt} = \alpha F(T - T_0), \quad (5)$$

где m – масса сплава, кг; α – коэффициент теплопередачи, Дж/(м²·К·с); F – площадь поверхности образца, м²; T_c – температура окружающей среды, К; Q_L – общее количество скрытой теплоты затвердевания, Дж; c – удельная теплоемкость сплава, Дж/(кг·К).

Анализ участков с нулевым выделением скрытой теплоты кристаллизации (выше температуры ликвидус и ниже температуры солидус) проводился на основе уравнения теплового баланса (5) без учета выделения скрытой теплоты кристаллизации:

$$- mc \frac{dT}{dt} = \alpha F(T - T_0). \quad (6)$$

Зависимость выделяющейся массовой доли твердой фазы в расплаве от времени ($f(t) = m_s(t)/m$) рассчитывали по уравнению:

$$f_S(t) = \frac{\int_L^t \theta(t) dt}{\psi}, \quad (7)$$

$$\theta(t) = \xi \Delta T(t) + \frac{dT}{dt}, \quad (8)$$

$$\xi = \frac{\alpha F}{cm}, \quad \psi = \frac{q}{c}, \quad \Delta T(t) = T(t) - T_0, \quad (9)$$

где q – удельная теплота кристаллизации сплава, Дж/кг.

Значения параметра ξ рассчитывали для однофазных участков кривой охлаждения сплава для моментов времени начала ($t = t_L$) и конца затвердевания ($t = t_S$) пробы расплава:

$$\xi = -\frac{\Delta T(t)}{dT/dt}, \quad (10)$$

Параметр ψ определяли из соотношений (9) с учетом того, что $\varphi(t) = 1$ для момента времени $t = t_L (m = m_S)$.

Для проведения термического анализа использовали сплавы системы Al-Si с содержанием кремния до 25 % (масс.), полученные сплавлением алюминия марки А97 и кремния кристаллического Кр0 в печи сопротивления типа СНОЛ в графитовых тиглях. В качестве датчиков температуры использовали хромель-алюмелевые термопары, сигнал с которых передавался на микропроцессорное устройство на базе микроконвертора серии ADuC834/ADuC836 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Внешний вид микропроцессорных средств для сбора данных методом термического анализа

Выборка кривых охлаждения исследованных сплавов с различным содержанием кремния представлена на рисунке 3.

В результате обработки данных термического анализа определяли объемную долю твердой фазы f_S и температуру ликвидус T_L . На основе полученных данных построена диаграмма классификации доэвтектических и заэвтектических силуминов, представленная на рисунке 4.

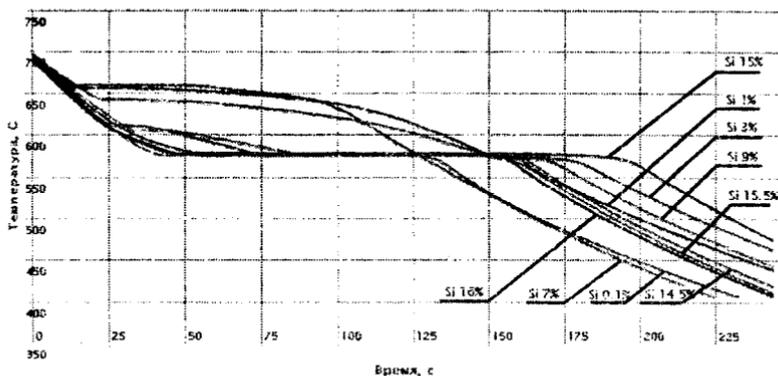
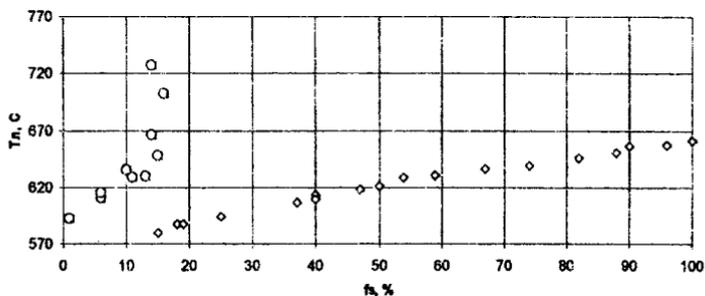


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые охлаждения Al-Si сплавов с различным содержанием кремния



○ – заэвтектические сплавы; ◇ – доэвтектические сплавы

Рисунок 4 – Диаграмма распределения сплавов системы Al-Si

Диаграммы распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al-Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов, рассчитанной на основе метрических оценок (1)–(4), представлены на рисунке 5.

Анализ диаграмм распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al-Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов на основе метрических оценок (рисунок 5) показал, что для тех областей пространств признаков, которые являются наиболее удаленными от «эталонных точек» со средними значениями признаков по классу, наблюдаются отдельные ошибки классификации. Это объясняется тем, что полученные экспериментальные данные

характеризуются функцией распределения объектов, близкой к линейному закону (коэффициент линейной парной корреляции для доэвтектических сплавов составляет 0,99).

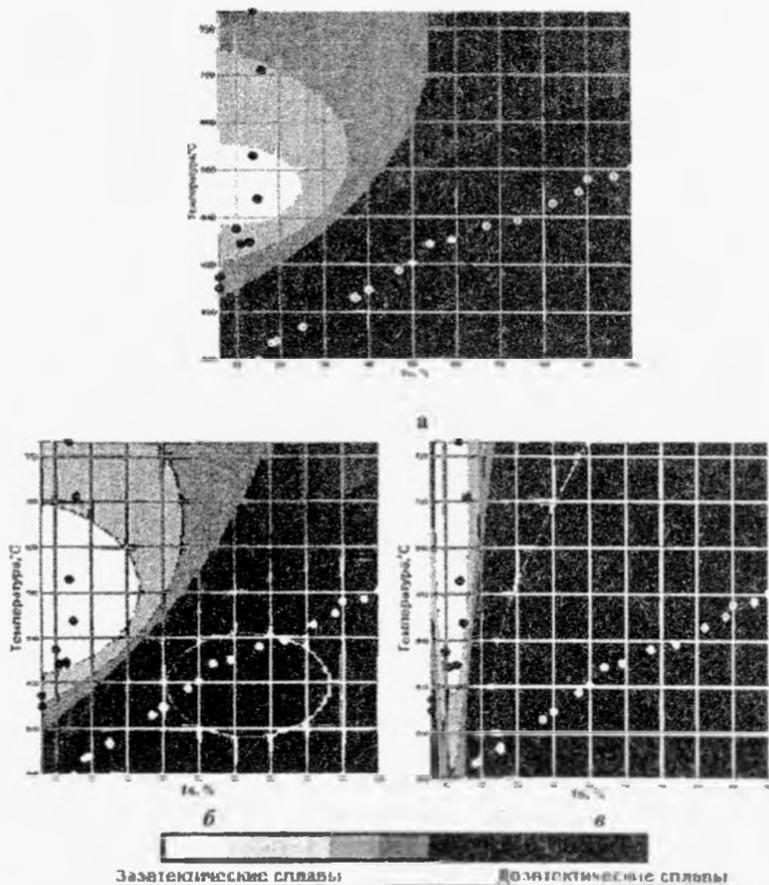


Рисунок 5 – Диаграммы распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al–Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов на основе метрических оценок, полученных: (а) – методом сравнения с эталоном по минимуму расстояний; (б) – методом наименьших квадратов; (в) – методом оценок отклонений признака от среднего значения, нормированных по величине дисперсии

В связи с этим 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:

$$G_L(X_j) = \frac{\prod_{i=1}^n |x_{ij} - \hat{x}_i^L|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \hat{x}_i^L)^2}}, \quad (11)$$

где \hat{x}_i – расчетное значение i -го признака, соответствующего базовой линии для объектов класса с номером L ; n – число признаков, используемых для идентификации объектов в двухмерном пространстве ($n = 2$).

С использованием модели (11) была построена диаграмма распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al–Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов, с учетом линейного распределения объектов (рисунок 6).

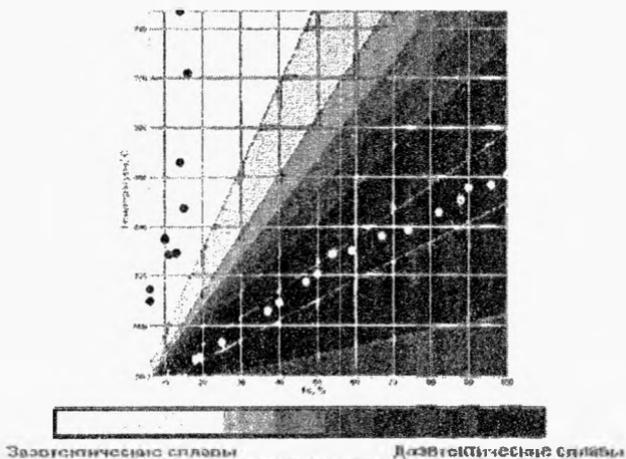


Рисунок 6 – Диаграмма распределения вероятности принадлежности сплавов системы Al–Si к группе доэвтектических и заэвтектических сплавов на основе метрических оценок, полученных методом расчета наименьших расстояний от объекта контроля до базовой линии (линии регрессии)

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 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 (Y_{Si}) в сплаве осуществляется с использованием математических моделей, построенных с помощью методов регрессионного анализа. Расчетное содержание кремния в доэвтектических сплавах определяется из уравнения регрессии:

$$Y_{Si} = 1668,59 - 7,876938X + 1,26464 \cdot 10^{-2}X^2 - 6,88159 \cdot 10^{-6}X^3, \quad (12)$$

где X – температура ликвидус, °С.

Расчетное содержание кремния в заэвтектических сплавах определяется из уравнения регрессии:

$$Y_{Si} = 51,05 - 0,173478X + 1,88745 \cdot 10^{-4}X^2. \quad (13)$$

Таким образом, представленные модели метрической классификации доэвтектических и заэвтектических силуминов обеспечивают возможность автоматизированного экспресс-контроля содержания кремния в широких диапазонах его концентраций в доэвтектических и заэвтектических сплавах в процессе плавки с использованием данных термического анализа пробы расплава.

Литература

1. Татур, М.М. Классификаторы в системах распознавания: прикладные аспекты синтеза и анализа / М.М.Татур, Д.Н.Одинец. – Минск : Бестпринт, 2008. – 165 с.
2. Рафальский, И.В. Применение компьютерного термического анализа для моделирования процесса затвердевания отливок из

УДК 621.74.669.715

Л.В. ТРИБУШЕВСКИЙ,
В.Л. ТРИБУШЕВСКИЙ, канд. техн. наук,
Б.М. НЕМЕНЕНОК, д-р техн. наук,
Г.А. РУМЯНЦЕВА, канд. техн. наук (БНТУ)

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВОЙ СТРУЖКИ

Современный этап развития машиностроения характеризуется увеличением объема производства отливок из алюминиевых сплавов, которые все чаще заменяют отливки из чугуна и стали. В связи с этим существенно увеличивается количество отходов из сплавов на основе алюминия. При механической обработке отливок, изготовленных литьем в кокиль, масса стружки может достигать 50 % от массы отливки [1], и поэтому во всем мире большое внимание уделяется вопросам переработки и дальнейшего использования стружки алюминиевых сплавов. На сегодняшний день нет универсального оборудования, которое позволяло бы оптимально перерабатывать разные виды сырья [2]. Алюминиевая стружка, как шихтовый материал, обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при ее переплаве. Прежде всего, это материал с высокой удельной поверхностью на единицу массы, который легко окисляется и способен образовывать на поверхности легкую оксидную пленку с высокими физико-механическими свойствами [3]. Переплав такой шихты возможен различными способами, каждый из которых имеет свои отличительные особенности. Установка соответствующего плавильного оборудования имеет решающее значение для рентабельности производства. Однако при любом способе переплава стружки необходимо обеспечивать ее максимально быстрое замешивание в расплав. Последнее достигается за счет использования индукционных тигельных печей, отражательных пламенных печей ванного типа с цилиндрическими электромагнитны-