

УДК 004.9:66.041

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ПЛАВКИ В ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Костюкова А.П.*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа,
e-mail: ktp@ufanet.ru*

Актуальность рассматриваемого материала определяется требованиями надежности и предотвращения аварийных ситуаций, возникающих при плавке металлов и сплавов. В статье объектом исследования является расплав металла, который подвергается технологическому процессу плавки в индукционной тигельной печи (ИТП). При этом особое внимание уделяется построению единого информационного пространства, позволяющего реализовывать мониторинг процесса плавки. Металл как объект исследования характеризуется рядом параметров, определяющих его реологическое состояние – это электропроводность, плотность и вязкость. Применение контактных датчиков по условиям рабочей среды невозможно, поэтому оценка состояния расплава возможна только бесконтактным способом. Приводится процесс обработки информативных данных на этапах анализа и распознавания термографических изображений. Поскольку реологические параметры металла зависят от температуры, то именно этот параметр рекомендуется использовать для определения этапа технологического процесса плавки металла для мониторинга состояния расплава. Оценивание основных свойств выполняется с использованием среднего значения и ковариационной функции, которые использованы в качестве прообраза измеряемых параметров. Приведена система диалога с оператором-технологом в процессе мониторинга состава расплава. В заключение указывается, что на основе полученных профилей формируется настройка порогов сигнализации фаз технологического процесса.

Ключевые слова: индукционные тигельные печи, диагностика, реологическое состояние металла, профиль расплава

INFORMATION SUPPORT OF MONITORING OF PROCESS OF MELTING IN INDUCTION CRUCIBLE FURNACES

Kostyukova A.P.*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: ktp@ufanet.ru*

The relevance of the considered material is defined by requirements of reliability and prevention of the emergencies arising when melting metals and alloys. In article an object of a research is fusion of metal which is exposed to technological process of melting in the induction crucible furnace (ICF). At the same time special attention is paid to creation of the common information space allowing to realize melting process monitoring. Metal as an object of a research is characterized by a number of the parameters defining his rheological state is a conductivity, density and viscosity. Use of contact sensors under the terms of a working environment is impossible therefore assessment of a condition of fusion perhaps only in the contactless way. Processing of informative data at analysis stages and recognitions of thermographics is given. As rheological parameters of metal depend on temperature, this parameter. it is recommended to use for definition of a stage of technological process of melting of metal for monitoring of a condition of fusion. Estimation of the main properties is carried out with use of average value and kovariatsionny function which are used as a prototype of the measured parameters. The system of dialogue with the operator-technologist in the course of monitoring of composition of fusion is given. It is specified in the conclusion that on the basis of the received profiles control of thresholds of the alarm system of phases of technological process is formed.

Keywords: induction crucible furnaces, diagnosis, rheological metal state, melt profile

В настоящее время управление процессом плавки осуществляется на основе регулирования энергетических параметров металлургического оборудования (напряжение или мощность энергетического потока, выделяемого на индукторе). Сформированный на основе данных показателей информационный поток обратной связи (ОС) воздействует лишь на параметры источника питания индукционной тигельной печи (ИТП).

Контроль показателей качества приготавливаемого расплава, как показал анализ литературы и опыт научно-исследовательской работы в области металлургического производства, осуществляется в лабораторных условиях после его завершения, а также с помощью визуальных данных и пирометрией [1–3]. Последние данные технолог

оценивает визуально. Обратная связь, оценивающая состояние расплава на основе лабораторных исследований полученных качественных показателей металла, осуществляется посредством сравнения характеристик технологического процесса (ТП) на основе математических и физических зависимостей. Такая разновидность ОС, воздействующей на параметры ТП, характеризуется значительным временем запаздывания, что оказывает влияние на качество процесса регулирования и поддержания величин параметров в заданном диапазоне. На основании этих данных технолог выполняет мониторинг процесса плавки. Несмотря на интенсивные исследования, проведенные за последние годы в этом направлении, проблема непрерывного мониторинга состояния расплава до сих пор не решена.

Для повышения эффективности получения качественного металла в режиме онлайн процесса его изготовления, необходимо выявление передовых подходов к мониторингу физико-химических процессов, протекающих в металле. Более совершенные возможности открываются при мониторинге параметров плавки в результате вычленения новых информационных параметров, внедрения передовых измерительных средств и методов обработки контролируемой информации [4].

Как известно [5], реологические параметры металла, такие как удельные значения электропроводности $\rho(\theta)$, магнитной проницаемости $\mu(\theta)$, теплоемкости $c(\theta)$ и теплопроводности нагреваемого материала $\lambda(\theta)$, где θ – температура расплава, резко меняют свои значения в процессе нагрева согласно зависимостям

$$\begin{cases} \rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta) \\ \mu = \mu_0 (1 + \xi\theta) \\ c = c_0 (1 + \gamma\theta) \\ \lambda = \lambda_0 (1 + \zeta\theta) \end{cases} \quad (*)$$

Реологические параметры нагреваемого металла позволяют определить стадию плавки в печи. Оценка состояния расплава возможна только бесконтактным способом по косвенным признакам. Основным косвенным показателем может выступать температура θ , так как все реологические параметры определяются ею (*), а точнее температурным полем расплава [4].

В табл. 1 приведены отличительные характеристики рабочих режимов плавки.

Для оценки температурного поля расплава используется его видеоизображение (термограмма) (рис. 1).

Термограммы являются графической формой сообщений [5] и содержат сведения о состоянии исследуемого объекта. Термограмма представляет собой причинно-обусловленное отображение состояний

расплава плавильных модулей, поскольку отражает различные процессы, протекающие в объекте. Термограмма рассматривается как случайный процесс $\{X_k(t)\}$. Воспроизведение такого процесса $X_k(t)$ невозможно описать явной аналитической зависимостью, поэтому для оценки характеристик процесса необходимо использовать интегральные характеристики (статистические параметры и характеристики). Под интегральной характеристикой понимается количественная оценка сообщения, содержащегося в термограмме. Формы интегральной характеристики могут быть временными либо спектральными [6].

При использовании временной формы необходима некоторая совокупность термограмм, поскольку временная форма описания сигнала – это описание его изменения в функции времени (рис. 2).

Эта форма предоставляет возможность определения структуры колебаний сигнала во времени, периода изменения сигнала и т.п.

Частотные или спектральные характеристики объекта можно оценить, выполнив преобразование Фурье временной формы [7]. При этом сама по себе отдельная термограмма является непериодическим сигналом, который может быть описан преобразованной зависимостью периодического сигнала при условии

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} \rightarrow \infty, \text{ если } \Omega \rightarrow d\omega \approx 0,$$

где Ω – круговая частота распространения сигнала. В данном случае можно провести аналогию между $\Delta\omega$ – случайным приращением круговой частоты и $\Delta\theta$ случайным приращением температуры, $S(j\omega)$ спектральной плотностью круговой частоты и спектральной плотностью температуры $S(j\theta)$. Из спектральной характеристики термограммы можно определить: ширину спектра температур $\Delta\theta$ и спектральную плотность (оггибающую амплитуд $S(j\theta)$, составляющих спектр).

Таблица 1

Отличительные характеристики рабочих режимов

№ режима	Наименование режима плавки	Состояние металла	Значение наблюдаемых параметров
1	Пусковой режим	Визуально твердый металл	Температура 25°C
2	Преднагревательный режим	Состояние металла твердо-вязкое, пузырьки, окалина, изменение цвета	Температура от 25°C до температуры плавления
3	Режим непосредственного плавления	Визуально расплавленный металл с комками	Температура плавления ± допуск
4	Режим расплава	Нет комков, металл полностью расплавлен	Температура плавления ± допуск
5	Режим кипячения	Кипящий металл	Температура кипения металла

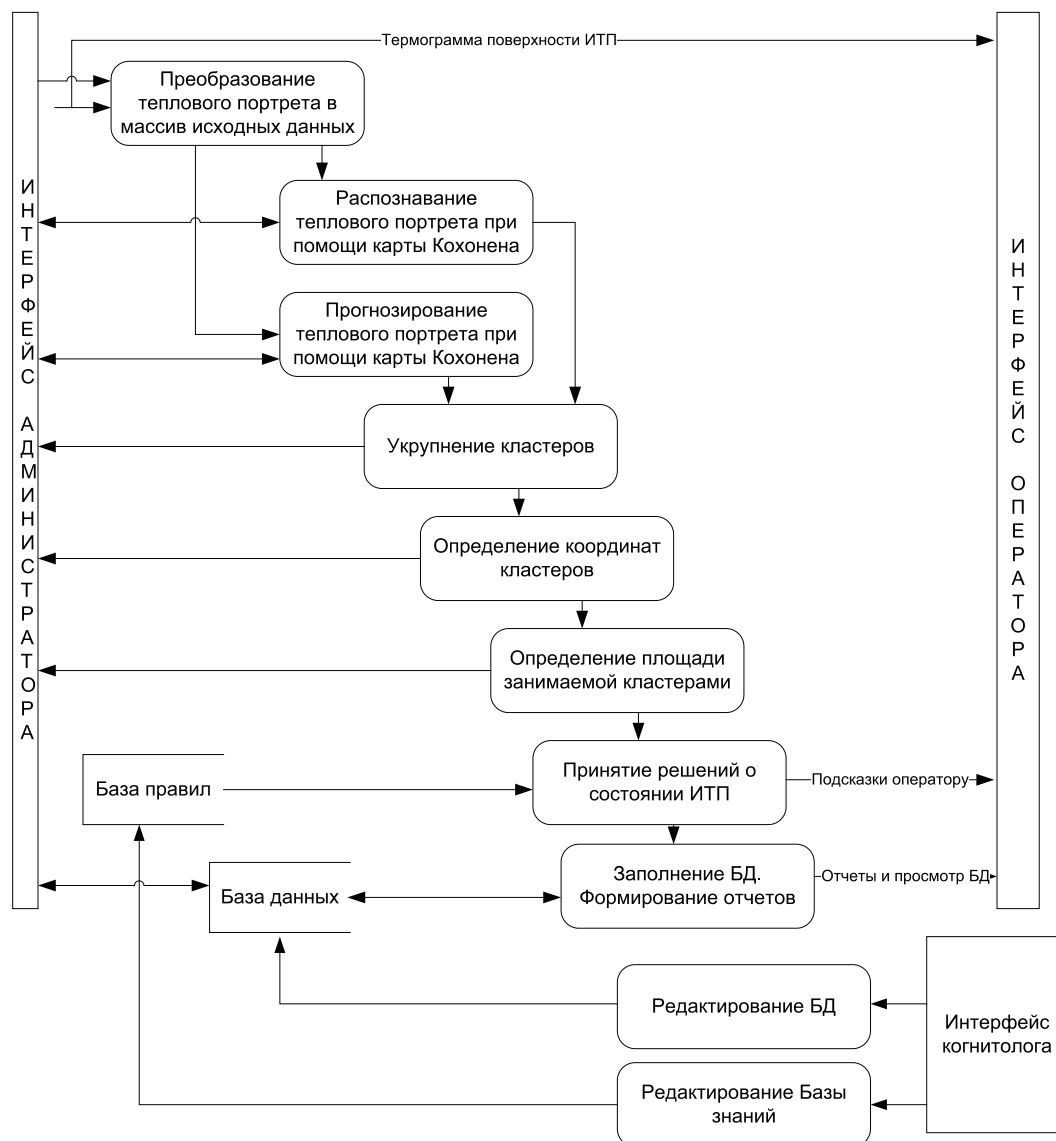
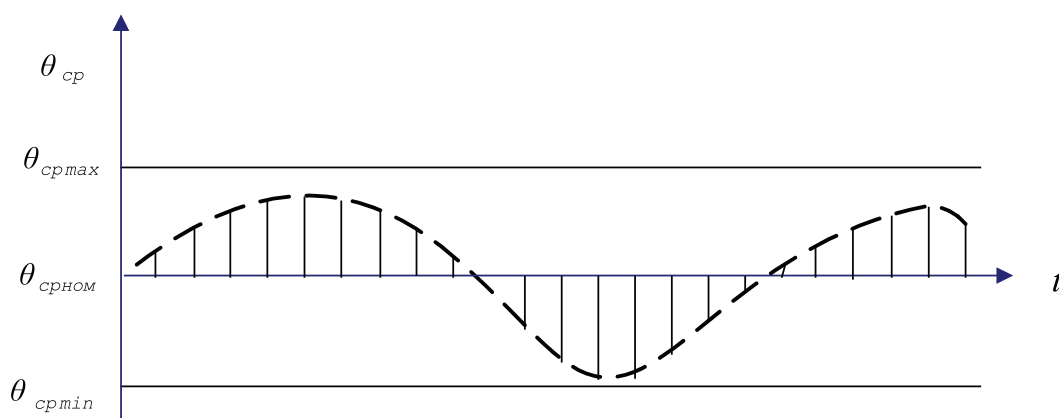


Рис. 1. Процесс обработки информации о тепловом портрете

Рис. 2. Структура колебаний сигнала во времени: $\theta_{cp\max}$ – максимальный уровень сигнала; $\theta_{cp\text{ном}}$ – номинальное значение сигнала; $\theta_{cp\min}$ – минимальный уровень сигнала

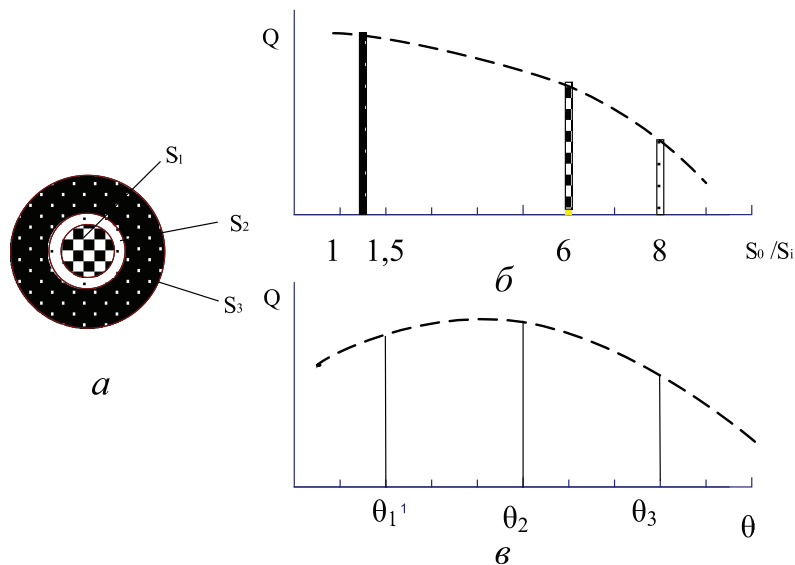


Рис. 3. Способы представления конечной информации

Рассмотрим получение спектральной плотности термограммы (рис. 3, а). На ней различными интенсивностями цвета обозначены области с различной температурой. Площади данных областей – S_i . Тогда тепловые потоки областей определяются по формуле

$$Q_i = \theta_i \cdot S_i, \quad T = \frac{2\pi}{S_0},$$

где $S_0 = S_1 + S_2 + S_3$.

На рис. 3, б, в, показаны различные способы представления конечной информации.

Таким образом, оценивание основных свойств теплового процесса можно выполнить с использованием:

1) среднего значения:

$$M_X(t) = E[X_K(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N X_K(t_1),$$

где $E[X_K(t)]$ – математическое ожидание, взятое по множеству индексов k ;

2) ковариационной функции:

$$R_{XX}(\tau) = E\{X(t_1) \cdot X_K(t_1 + \tau)\}.$$

К определяющим свойствам теплового процесса относятся: его стационарность, наличие или отсутствие периодических составляющих, выявление тренда и др. характеристики. Стационарность процесса говорит о его неизменности. Установление в процессе содержания периодических составляющих позволяет избежать ошибок при интерпретации результатов мониторинга. При отсутствии периодических составляющих возможно упрощение аналитиче-

ского исследования случайного процесса. Выявление тренда позволяет прогнозировать момент наступления аварийного случая.

Стационарность процесса можно определить по двум характеристикам $M_X(t_1)$ и $R_{XX}(t_1, t_1 + \tau)$, если они не зависят от момента времени t_1 – момента проведения диагностики. В этом случае среднее значение постоянно, а ковариационная функция зависит только от интервала наблюдения τ , т.е.

$$M_X(t_1) = M_X, \quad R_{XX}(t_1, t_1 + \tau) = R_{XX}(\tau).$$

Среднее значение и ковариационная функция могут быть использованы в качестве образа (профиля) при сравнении измеряемых показателей температуры. Как известно, профиль – это совокупность основных, типичных технологических параметров, характеризующих состояние какого-либо процесса. В рассматриваемом случае таким процессом является процесс плавки металла.

Задачей системы мониторинга является выдача достоверной информации технологу для диагностирования состояния объекта в реальном времени (рис. 4).

Процесс диалога содержит действия, представленные в табл. 2.

Приведенные интегральные характеристики занимают небольшой объем памяти при хранении, алгоритмы распознавания изображений с их использованием просты и обладают высоким быстродействием. Они могут работать как с цветным, так и с черно-белыми изображениями самых разных форматов.

Таблица 2

Описания действий по загрузке окон системы диалога

Номер действия	Описание	Реализация
0	Запуск	автоматически
1	Мониторинг	а) автоматически при угрозе предаварийного / аварийного состояния, б) вручную по выбору технолога
2	Прогноз состояния ИТП	а) автоматически при угрозе предаварийного / аварийного состояния на следующей плавке, б) вручную по выбору технолога
3	Архив событий	Вручную
4	Отчеты	По требованию технолога на печать или экран монитора
Вывод значений параметров		
5	КПД	Вручную
6	Толщина футеровки	Вручную
7	Мощность	Вручную
8	Ожидание следующего действия	

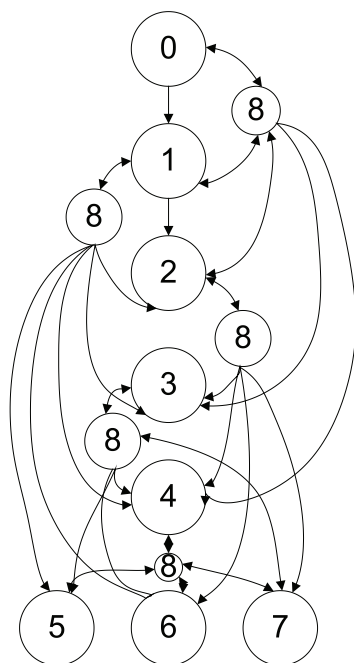


Рис. 4. Схема диалога

Профили расплава определяют характерные признаки процесса, используемые для диагностирования технологических ситуаций. Для характеристики состояния объекта используют троичную логику с признаками состояния: «норма», «больше», «меньше». При этом нормальным состоянием объекта считают состояние, определяемое технологическими инструкциями, реализующими поддержание выходных показателей печи на требуемом уровне для обеспечения требуемого качества выплавляемого материала.

Принятие решения на базе показаний двух характеристик исследуемых показате-

лей, таких как среднее значение и ковариационная функция, повышает надежность принимаемого решения. В этом случае показатель соответствия профилю определяется по расстоянию между принятыми оценками. На основе полученных профилей формируется настройка порогов сигнализации фаз технологического процесса. Эти действия способствуют улучшению управляемости и дальнейшей автоматизации процесса и, кроме того, сокращают нагрузку на операторов-технологов.

Список литературы

1. Металлургическая технология / А.Н. Головкин, Я.В. Фролов, А.Н. Гридин, С.М. Беляев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// metal-formating.org/images/stati/frolov/client-oriented-quility-ru.pdf](http://metal-formating.org/images/stati/frolov/client-oriented-quility-ru.pdf) (дата обращения: 15.04.2018).
2. Гордеев Ю.А. Новые технологии контроля параметров металлических расплавов / Ю.А. Гордеев, Г.И. Швецов, А.П. Репин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://market.ru/stsya_po_metallurgii/novye-tekhnologii-kontrolya-parametrov-metallicheskih-rasplavov-statya (дата обращения: 15.04.2018).
3. Контроль качества жидкого металла [Электронный ресурс] // Автолитмаш. Машиностроительный завод: сайт. – [http:// avtolitmash.ru](http://avtolitmash.ru) (дата обращения: 15.04.2018).
4. Костюкова А.П. Система поддержки принятия решений по диагностированию состояния индукционных плавильных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 16 с.
5. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О.М. Смирнов [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – № 2. – С. 45–52.
6. Определение показателей надежности диагностируемого электрооборудования / Е.П. Вишняков [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–2. – С. 256–260.
7. Костюкова А.П. Институциональный метод как основа мониторинга индукционной плавильной печи // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 19–24.