

Приведенные соотношения и схема краткосрочного прогнозирования ориентированы на выполнение обработки данных в микроконтроллере микропроцессорного модуля в реальном времени. Моделирование показало эффективность предлагаемого подхода к прогнозированию изменения параметров объекта. Результаты работы могут быть полезны при разработке программно-алгоритмических средств систем мониторинга и обеспечения безопасности технических, например, систем активной безопасности и инерциальной навигации автомобиля.

Результаты исследований изложенные в данной статье получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению информационно-телекоммуникационных комплексов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS/

Galileo" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. [Текст] /Ю.П. Лукашин/ – М.: Финансы и статистика, 2003. –416с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. [Текст] /Дж.Бокс, Г. Дженкинс/ – М.: Мир, 1974. – 197с.
3. Клевцов С.И. Особенности выбора параметров настройки модели сглаживающего временного ряда для осуществления краткосрочного прогнозирования изменения физической величины. [Текст] /С.И. Клевцов// Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №5(118). – С. 133-138.

Доцент Клевцов С.И. тел. 8-8634-32-80-25, sergkmps@mail.ru - каф. микропроцессорных систем Технологического института Южного федерального университета в г.Таганрог

УДК 536.51: 621.791.923; 621.762.5

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ФАЗОВЫХ ГРАНИЦАХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ, ПРЕТЕРПЕВАЮЩИХ ПЛАВЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

В.В. Иванайский, А.В. Ишков, К.В. Селиверстов, С.Ф. Дмитриев

В статье описаны комплексные исследования по измерению и моделированию температур на границах фаз в сложных плавящихся и термореагирующих порошковых смесях. Для регистрации температуры в процессе индукционной наплавки предложено использовать ХА-микротермопарный метод и метод термоиндикации при помощи СВС-составов. Методом численного расчета нестационарного уравнения теплопроводности смоделирован профиль температур при электростимулированном СВС композиционного контактного материала.

Ключевые слова: порошковый материал, термометрия, индукционная наплавка, микротермопара, термоиндикатор, СВС, моделирование.

Введение

Современные исследования многокомпонентных порошковых смесей, при нагревании которых происходит плавление отдельных компонентов, образование сплавов и покрытий, химические реакции и синтез новых веществ, невозможны без знания величин температуры и ее распределения на границах фаз. Такая информация необходима для управления процессами индукционной наплавки (ИН), сварки, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и многими другими технологиями.

Важной составляющей процесса упрочнения деталей методом индукционной

наплавки является нагрев частиц твердого сплава и флюса в наплавочной шихте [1]. В то же время регистрация с приемлемой точностью температуры в процессе ИН имеет определенные технические и методические трудности. Во-первых, толщина покрытий, формируемых методом ИН колеблется в пределах 1-3 мм, поэтому использование для этого обыкновенных промышленных и исследовательских термопар становится невозможным. Во-вторых, в процессе индукционного нагрева поверхность основного металла излучает большее количество энергии (как в виде теплоты, так и лучистым способом) чем формируемое покрытие, поэтому пирометри-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ФАЗОВЫХ ГРАНИЦАХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ, ПРЕТЕРПЕВАЮЩИХ ПЛАВЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

ческий метод регистрации температуры также неэффективен и отражает только тепловое состояние поверхности металлической основы. В-третьих, из-за исходной и постоянно изменяющейся в процессе ИН пористости наплавляемого материала, представляющего собой многокомпонентную гетерогенную смесь, все известные контактные термометрические методы дают заведомо невоспроизводимые результаты [2].

Еще более трудной задачей является экспериментальное исследование нестационарного поля температур при получении методом СВС композиционных контактных материалов (ККМ), когда размеры исследуемого объекта также много меньше размеров стандартных датчиков температуры.

Решение обозначенных проблем может быть достигнуто несколькими независимыми путями:

- минимизацией первичного датчика, чувствительного к температуре покрытия, металлической основы, шихты и ее отдельных компонентов;
- использованием термозависимых процессов в материалах (как уже имеющих в системе, так и вносимых извне) для однозначной, достоверной и воспроизводимой регистрации достигнутой в системе температуры;
- применением методов численного моделирования для определения возможных механизмов СВС-предреакционного характера в месте поверхностей раздела фаз.

Целью настоящей работы являлась разработка комплексных методов регистрации и моделирования температуры на фазовых границах в нагреваемой смеси порошков металлов при ее плавлении и химическом взаимодействии между компонентами.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны образцы шихты для ИН следующего состава, мас. %: твердый сплав - 85, плавильный флюс - 15. Материал твердого сплава - порошки ПГ-УС27 и ПС-14-60 ($\varnothing$ 0,5-1,5 мм), флюсы - промышленные составы марок АСМ (г. Рубцовск), ЦСМ (г. Астана), ЗОР (г. Одесса).

Для изготовления микротермопар использовали хромелевую и алюмелевую проволоку $\varnothing$ 0,2 мм (ГОСТ 1790-77), помещенную в стекловолоконную изоляцию. Спаи изготавливали сплавлением проволок конденсаторной сваркой на постоянном токе угольным электродом.

Для изготовления термоиндикаторных составов использовали порошки никеля марки ПНЭ, алюминия марки АСД-1 и титана марки ПТК.

Для моделирования тепловых полей в СВС-реагирующей системе ККМ осуществляли решение нестационарного уравнения теплопроводности численными методами в среде Mathcad 2011.

Результаты и их обсуждение

Температура отдельных компонентов наплавочной шихты, поверхности основного металла и поверхности расплава на границе твердый сплав-воздух может быть измерена с приемлемой точностью (до 3-5 %) с помощью микротермопар, при условии, что размер их спаи будет составлять от 0,1 до 0,3 характеристического размера исследуемого структурного элемента. Для этого нами были подготовлены и откалиброваны хромель-алюмелевые микротермопары (МТП).

В первой части исследования - для измерения температуры порошковых материалов, в том числе и твердого сплава для ИН, рабочий спай термопары приваривали под микроскопом (МБС-10) к отдельной частице порошка, в которой измеряли температуру нагрева.

На рисунке 1 показаны фотографии частиц твердого сплава с прикрепленными к ним термоэлектродами, приваренными к одной и двум плоскостям частицы

Предлагаемый метод обеспечивает измерение температуры нагрева твердого сплава с учетом основных требований, предъявляемых контактным датчикам температуры [2].

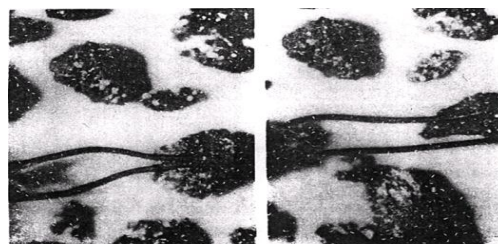


Рисунок 1 - Схема крепления термоэлектродов к одной (слева) и двум (справа) плоскостям частицы ($\times 20$)

Были измерены температуры нагрева твердого сплава на границах шихта-основной металл и шихта-воздух. Полученные результаты достаточно достоверны, так как форма и химический состав рабочего слоя не отличаются от формы и химического состава отдельных частиц нагреваемого порошкового материала [3].

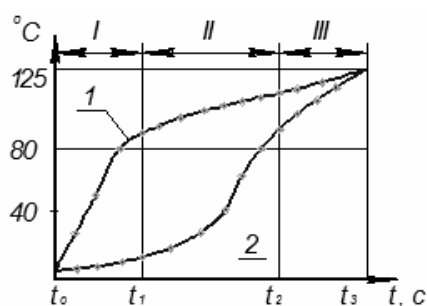


Рисунок 2 - Обобщенные графики нагрева наплавочной шихты на границах: основной металл-шихта (1) и шихта-воздух (2)

На рисунке 2 приведены, зафиксированные самопишущим прибором, характерные кривые нагрева поверхности расплава (1) и наплавочной шихты (2).

Проведенные эксперименты показали, что по мере увеличения размеров частиц твердого сплава уменьшается глубина проплавления основного металла при неизменных режимах наплавки. При наплавке шихты с размером частиц твердого сплава 0,5-1,2 мм глубина проплавления была 0,40-0,50 мм. При наплавке частиц 2,0-3,0 мм проплавление основного металла составило 0,30-0,35 мм, объясняется это тем, что в больших частицах индуцируется ток и нагревает их. Поэтому особенно при увеличении толщины наплавленного слоя целесообразно увеличивать гранулы твердого сплава

Также было установлено, что интенсивность нагрева твердого сплава в наплавочной шихте снижается по мере уменьшения его фракции. Посредством МТП температуру нагрева наплавочной шихты удается измерить по высоте ее насыпки практически в любой точке, в том числе на её поверхности (граница шихта-воздух и при контакте с деталью, граница шихта-деталь).

Однако на практике также необходимо контролировать и температуру нагрева поверхности детали в процессе ИН. Традиционные способы регистрации температуры (термопара, пирометр) не нашли применения в производстве по причине сложного аппаратного оформления в первом случае, а во втором - большой погрешности при измерениях.

Нами были проведены измерения температуры нагреваемой токами высокой частоты поверхности детали с использованием двух типов термоиндикаторов (ТИ): термитных смесей, а также смесей порошков титана, никеля и алюминия, которые реагируют между собой по реакции СВС [8].

СВС-процесс в исследованных нами смесях металлов хорошо заметен визуально (рисунок 3), так как наблюдается мгновенный разогрев и возгорание всего образца ТИ.



Рисунок 3 - Воспламенение Ni-Al термоиндикатора

Для тарирования исследованных Ni-Al и Ni-Ti ТИ использовали вольфрам-рениевую МТП диаметром 0,2 мм, которую с помощью конденсаторной сварки приваривали к металлической пластине, а в непосредственной близости с МТП устанавливали таблетку ТИ и затем нагревали образец в индукторе. На температурной кривой нагрева ТИ хорошо виден характерный температурный всплеск, при воспламенении порошковой смеси, отвечающий протеканию в ней СВС в режиме теплового взрыва. Общая погрешность измерения температуры при таком аппаратном оформлении метода с использованием программно-аппаратного комплекса не превысила 3,5-4,5%.

Таким образом, разработанные методы комплексной регистрации температуры в процессе индукционной наплавки позволяют определять температуры плавления наплавочной шихты и ее отдельных компонентов, поверхности детали, исследовать особенности тепловых процессов при ИН и позволяют, в процессе перемещения детали в ВЧ-индукторе, определять температурные поля на упрочняемой поверхности, а также оперативно корректировать режимы работы ВЧ-генератора.

Для второй части исследования - численного моделирования и решения нестационарной задачи теплопроводности в выбранной модели ККМ (рисунок 4) примем некоторые допущения: -будем считать, что процессы при спекании в каждой ячейке развиваются подобно; -объемная электрическая мощность не меняется за время синтеза ККМ; -температура изменяется в интервале 20-1500 оС; -боковые потери реализуются за счет конвективного обмена.

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ФАЗОВЫХ ГРАНИЦАХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ, ПРЕТЕРПЕВАЮЩИХ ПЛАВЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

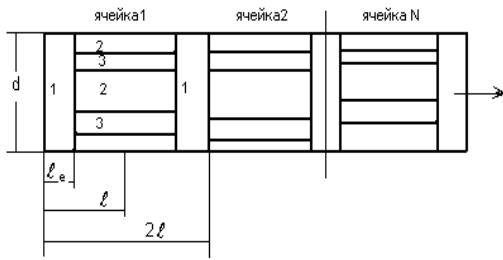


Рисунок 4 - Схема расчетного участка структуры ККМ: 1 - волокна меди,

2 - порошковая смесь Ni+Al,

3 - нагреватель (частицы порошка Al)

С учетом этих допущений постановка задачи сводится к решению известного нестационарного уравнения теплопроводности [3]:

$$\frac{d}{dx} \left(K_{xx} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_{yy} \cdot \frac{d\varphi}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_{zz} \cdot \frac{d\varphi}{dz} \right) = \lambda \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

со следующими граничными условиями:

$$\varphi = \varphi_b \text{ на } S_1$$

$$K_{xx} \frac{d\varphi}{dx} \cdot l_x + K_{yy} \frac{d\varphi}{dy} \cdot l_y + K_{zz} \frac{d\varphi}{dz} \cdot l_z$$

$$+ q + h \cdot (\varphi - \varphi_\infty) = 0$$

на S_2 , где S_2 – боковая поверхность ячейки ККМ.

Будем считать, что поле температур симметрично относительно средней точки и подобно в каждой ячейке.

Проведем расчет профиля температур на участке модели ККМ по неявной и явной конечно-разностным схемам.

Неявная конечно-разностная схема. С учетом выражения (1) элементы матрицы теплопроводности примут вид (2). Непосредственно из (2), нельзя рассчитать вектор температур в момент времени t_j простой подстановкой вектора температур в момент времени t_1 , т.к. вектор $\{F\}$ необходимо выбрать для момента t_j . Для этого надо выразить из вектора $\{F\}_j$ вектор температур $\{\Phi\}_j$.

$$\begin{aligned} \{f^e\} &= -\frac{QAL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{hPLT_\infty}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \delta_{1e} h' T_\infty A \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \\ [k^e] &= \frac{A}{L} K_{xx} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{PhL}{6} \begin{bmatrix} 21 \\ 12 \end{bmatrix} + \delta_{1e} h' A \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \end{bmatrix} \quad (2) \\ [c^e] &= \frac{1}{6} c \rho AL \begin{bmatrix} 21 \\ 12 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Представим вектор $\{F\}$ в таком виде: $\{F\}_j = \{F+\}_j + \{F-\}_j$, где

$$\{f^e\}_j = \frac{QAL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}; \{f^e\}_j = \frac{hPLT_\infty}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \delta_{1e} h' T_\infty A \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

где, $\{F+\}$ описывает приток тепла в систему, а $\{F-\}$ боковые потери тепла.

Таким образом, после преобразования имеем:

$$\{\Phi\}_j = [A]^{-1} [B] \{\Phi\}_i + [A]^{-1} \{\tilde{F}\}_i \quad (4)$$

Явная конечно-разностная схема. Уравнение для расчета температуры узлов по явной схеме получается из выражения (4). Соотношение (4) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} [A] \{\Phi\}_j &= [B] \{\Phi\}_i + \{F\}_i, \\ [a^e] &= \frac{1}{6} c \rho AL \begin{bmatrix} 21 \\ 12 \end{bmatrix}, \\ [b^e] &= \frac{1}{6} c \rho AL \begin{bmatrix} 21 \\ 12 \end{bmatrix} - \frac{A}{L} \cdot k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} - \frac{PhL}{6} \begin{bmatrix} 21 \\ 12 \end{bmatrix} - h' A \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \end{bmatrix}. \quad (5) \end{aligned}$$

При расчете по этой схеме матрицы $[A]$ и $[B]$ рассчитываются для каждого момента времени (в отличие от случая неявной схемы). Учет и тепловые процессы на переходном элементе. Из [4] известно соотношение для сопротивления стягивания R линий тока к пятну круглой формы для одного из контактов. Если ввести параметр sr - отношение площадей кажущейся контактной поверхности и а-пятна, то выражение для R примет вид:

$$R = \frac{\sqrt{sp}}{4d} \cdot (\rho_1 + \rho_2) \quad (7)$$

Выражение (7) используется для расчета сопротивления, а параметр sr подбирается при анализе экспериментальных данных. Расчеты проводились при воздействии на ячейку объемной мощности $W = 1.6 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$ по неявной схеме. Параметр sr подбирали с учетом времени электронагрева состава №14 из работы [5].

На рисунке 5. представлены профили температуры по оси ячейки ККМ, видно, что температурный профиль имеет максимум в месте стыка медное волокно-порошковая смесь, плато в порошковой смеси до момента $t=6,0$ с и второй максимум, расположенный в центре порошковой заготовки ~ через 8,0 с нагрева.

Выводы

1. Разработаны комплексные методы регистрации температуры в процессе индукционной наплавки, основанные на использовании микротермопар и СВС-термоиндикаторов.
2. При регистрации температуры микротермопарным методом, удается зафиксировать температуры плавления отдельных компонентов шихты и температуру на границах раздела фаз.

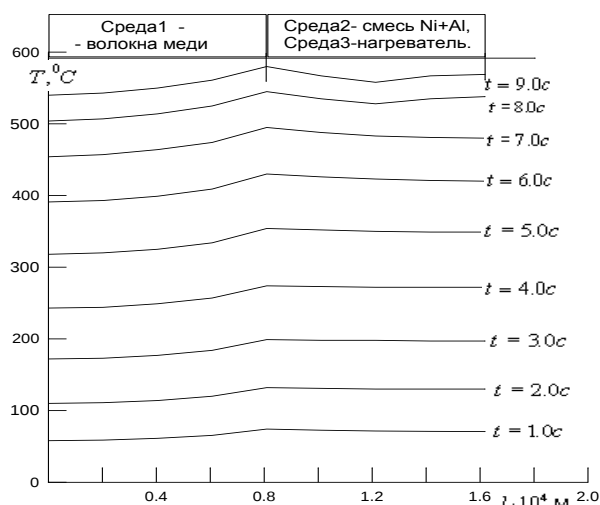


Рисунок 5 - Профиль температуры по оси ячейки ККМ (ч/з 1 секунду СВЧ)

3. При регистрации температуры термоиндикаторным методом погрешности не превысили 4,5 %.
4. Проведен расчет температурного поля в предреакционный период при электро-

синтезе ККМ с учетом контактных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. [Текст] /И.А.Рябцев/ -Киев: Экотехнология, 2004.
2. Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры. [Текст] /Р.В. Бычковский/ -М.: Металлургия. -1978.
3. Сегерлинд Л.Дж. Применение метода конечных элементов. [Текст] /Л.Дж. Сигерлинд/ - М: Мир.1979.
4. Хольм Р. Электрические контакты. [Текст] /Р.Хольм/ - М: ИЛ.1961.
5. Дмитриев С.Ф. СВ-электросинтез смесей порошков Ni+Al на подложке из Al [Текст] /С.Ф. Дмитриев// - Вестник ТГУ. Бюлл. № 24. 2004. Апрель. С. 108-112.

К.т.н., доцент **Иванайский В.В.** (3852)-62-83-80; e-mail: olg168@rambler.ru, д.т.н., профессор **Ишков А.В.**, ст. преп. **К.В. Селиверстов** - Алтайский государственный аграрный университет; к.т.н., доцент **С.Ф. Дмитриев** - Алтайский государственный университет (г. Барнаул)

УДК 681.5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОСВЯЗНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.А. Каширин

В статье рассматривается применение метода штрафных функций для решения задачи параметрической оптимизации многосвязной динамической системы. Описанный метод позволяет перейти от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации. Рассматривается пример параметрического синтеза системы активного управления подвеской транспортного средства.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, активное управление, штрафные функции

Введение

Целью работы является использование методов оптимизации при решении задач синтеза различных многосвязных систем на основе матричного уравнения Ляпунова, применяемого в задачах синтеза стабилизирующей обратной связи. В процессе решения удастся свести исходную задачу к задаче математического программирования. Одним из наиболее популярных методов решения задач математического программирования является метод штрафных функций [1]. Данный метод позволяет перейти от задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации. В свою очередь для решения задачи безусловной оптимизации можно применить

методы прямого поиска, не требующие вычисления градиента целевой функции. В данной работе метод штрафных функций применяется для решения задачи параметрической оптимизации многосвязной динамической системы [2]. Рассматривается пример параметрического синтеза системы активного управления подвеской транспортного средства.

Норма системы

Рассмотрим линейную стационарную систему, поведение которой в пространстве состояний описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax, y = Cx, \quad (1)$$