

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V. Pisarenko, I. Varava

INFORMATION MODELS FOR HEATPHYSICS PROCESSES MEASURING OF TEMPERATURE'S TEMPORAL DYNAMICS OF CRYSTALLIZED FUSION OF METAL

The information models of heat-physic processes for thermo analyses at crystallization of metal is considered. The problem of restoration of a temperature field far from the area controled by the thermocouple is solved.

Рассматривается информационная модель теплофизических процессов при кристаллизации металла для термоанализа. Решается задача восстановления температурного поля вдали от области, контролируемой термопарой.

© В.Г. Писаренко, И.А. Варава,
2007

УДК 53.81

В.Г. ПИСАРЕНКО, И.А. ВАРАВА

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗИРУЮЩЕГОСЯ РАСПЛАВА МЕТАЛЛА

Измерения временной динамики температуры кристаллизирующегося расплава металла – динамический термоанализ (ДТА), актуальны для задач экспресс-анализа образцов металла в таких технологиях металлургии как “печь-ковш”, непрерывная разливка стали, а также в разнообразных промышленных технологиях литья [1].

В стандартном варианте обработки исходных данных динамического термоанализа исходным получаемым файлом является последовательность показаний температуры термопары в пробнице с металлическим расплавом для совокупности равномерных отсчетов времени. Далее полученный файл отсчетов температуры подвергается специальным процедурам сглаживания и/или фильтрации для получения некоторой гладкой кривой $T(t)$, которая затем подвергается однократному дифференцированию по времени и нормированию.

Для получаемой кривой $(dT(t)/dt) / T(t) = (d \ln T(t) / dt)$ рассчитываются ее экстремальные точки и другие особенности, ассоциированные с началом или концом формирования основных фаз кристаллизирующегося расплава в соответствии с файлом библиотеки файлов фаз многокомпонентных сплавов (БФМС) [2–4]. Как известно, данные о фазовом составе получаемого металла являются весьма востребованным компонентом информационной модели как самого процесса

кристаллизации, так и всей совокупности предшествующих ему этапов подготовки и обработки анализируемого металлического расплава, а также степени адекватности итоговых данных ДТА [5] реальным процессам кристаллизации. При этом степень адекватности данных конкретной реализации ДТА существенно зависит от корректности учета неравномерности в пространстве и времени поля температур как в материале пробницы, так и в кристаллизирующемся расплаве, находящемся в пробнице. При этом необходимо корректно учитывать условия теплотерь с внешней поверхности пробницы с учетом явлений радиационного и конвективного переноса тепла.

Рассмотрим одномерную математическую модель описания процесса теплопередачи (без явлений конвекционного обмена теплом), сводящуюся к решению следующего параболического уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

в прямоугольной области $t, x \in D$, $D = [0, \tau] \times [0, 1]$ с начальным условием $T(x, 0) = 100 - 100 \sin(\pi x)$, $0 \leq x \leq 1$ и граничными условиями $T(0, t) = T(1, t) = 100$. Это обычно называется прямой задачей (ПЗ) одномерного теплопереноса с постоянным коэффициентом a теплопередачи. Для решения прямой задачи будем использовать схему Кранка–Николсона, которая является частным случаем ($\sigma = \frac{1}{2}$) следующей схемы:

$$\frac{y_i^{j+1} - y_i^j(x, t)}{\tau} = \sigma \frac{y_{i-1}^{j+1} - 2y_i^{j+1} + y_{i+1}^{j+1}}{h^2} + (1 - \sigma) \frac{y_{i-1}^j - 2y_i^j + y_{i+1}^j}{h^2} + F_i^j. \quad (1)$$

Лемма. Схема (1) имеет следующую точность аппроксимации:

1) аппроксимацию $O(h^2 + \tau^2)$ при $\sigma = 0.5$; $\rho = f\left(x, t_j + \frac{\tau}{2}\right)$ или

$$\rho = f\left(x, t_j + \frac{\tau}{2}\right) + O(h^2 + \tau^2), \text{ если } u \in C_3^4;$$

2) аппроксимацию $O(h^2 + \tau)$ для произвольного $\sigma \neq 0.5$;

$$\rho = f\left(x, t_j + \frac{\tau}{2}\right) + O(h^2 + \tau), \text{ если } u \in C_2^4;$$

3) аппроксимацию $O(h^4 + \tau^2)$ для

$$\sigma = 0.5 - \frac{h^2}{12\tau} \equiv \sigma^*; \rho = \frac{5}{6} f\left(x_i, t_j + \frac{\tau}{2}\right) + \left[\left(x_{i-1}, t_j + \frac{\tau}{2} \right) + \left(x_{i+1}, t_j + \frac{\tau}{2} \right) \right] / 12, \text{ если } u \in C_2^6.$$

Для задач реального термоанализа (когда, как правило, датчик температуры в виде термопары позволяет измерить температуру лишь в центральной зоне образца кристаллизующегося металла) будем рассматривать задачу восстановления значений в зоне примыкающей к зоне контроля термопарой, которая состоит из следующих трёх полос: левой (1-я полоса), правой (2-я полоса) и зоны примыкающей к начальному значению (3-я полоса, отвечающая $T \in [0, \varepsilon)$ для «малого» ε). Объединение этих трех полос будем называть областью \tilde{D} . В данной постановке принимаем предположение, что значения поля температур $T(t, x)$ в области $D_{исх}$ известно (например, из результата прямого расчета смешанной задачи или из эксперимента; рис. 1).

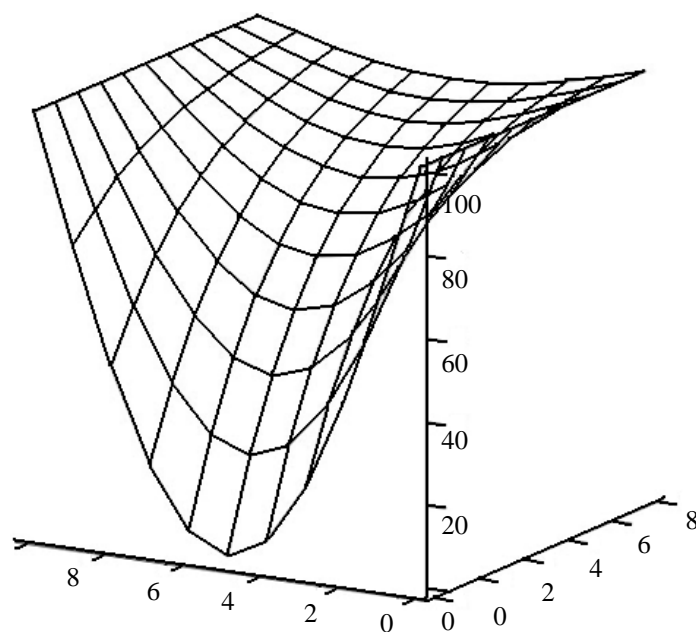


РИС. 1. Решение прямой задачи теплопроводности

Задачу восстановления значений поля температур в области \tilde{D} по данным в области $D_{исх}$ назовем условно пространственно-обратной задачей (ПОЗ) восстановления временной динамики поля температур в области \tilde{D} .

Для получения результатов численных экспериментов решения вышесформулированной пространственно-обратной задачи определения динамики поля температур выберем в качестве области $D_{исх} = [0, T] \times [4, 6] \ni (t, x)$. Результаты расчета с помощью формальной схемы Кранка–Николсона (1) для указанной области в качестве начальных условий показаны на рис. 2, а зависимость коэффициента корреляции решения ПОЗ и ПЗ – на рис. 3.

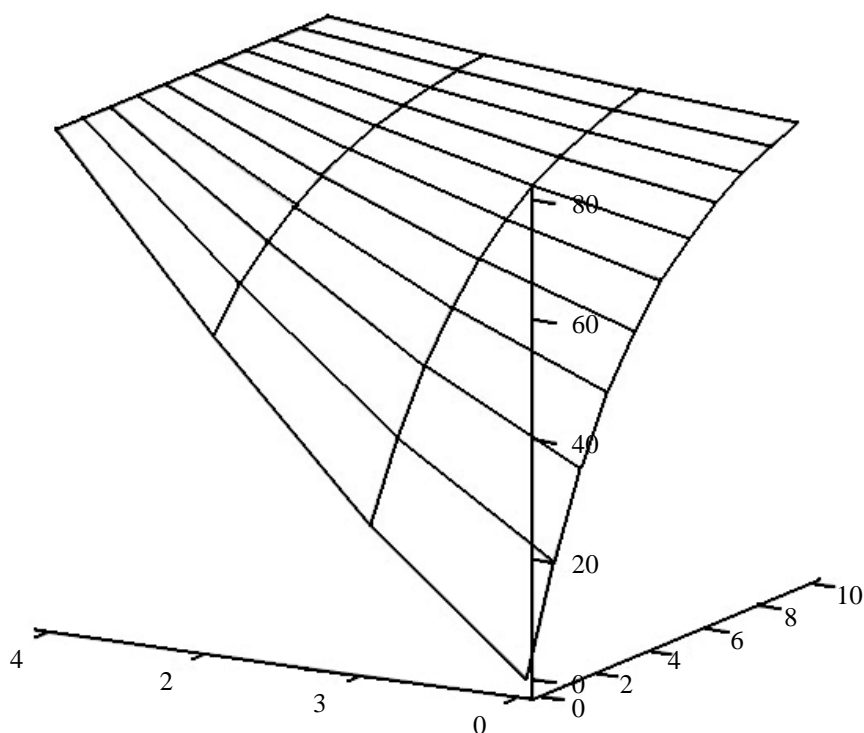


РИС. 2. Левая часть решения в области $D_{исх} \cup D^*$

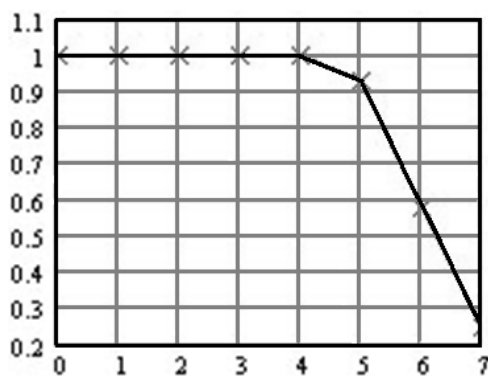


РИС. 3. Зависимость коэффициента корреляции решения ПОЗ и ПЗ от количества пространственных слоев

Таким образом, проанализированы проблемы формулировки информационной и математической модели теплофизических процессов в термоанализе с использованием пробницы с термопарой. Предложена информационная модель этой задачи, основанная на пространственно-обратной задаче определения ди-

намики поля температур в дополнении к стандартной прямоугольной области в пространстве и времени по известным данным о поле температур в некоторой стартовой области пространства и времени, исключаяющей приграничную область, примыкающую к левому и правому концам и начальному моменту времени.

Для изучения вклада явлений конвективного переноса тепла в расплаве далее ставится задача: на базе эксперимента выяснить меру зависимости показаний термопары в процессе остывания от места ее расположения внутри ограниченного объема пробницы с расплавом.

Такой эксперимент направлен на выявление корректности учета неравномерности распределения в пространстве и времени поля температур в кристаллизирующемся расплаве, находящемся в пробнице. Анализируем степень однородности в пространстве как процесса остывания, так и последующей кристаллизации расплава.

В частности, для этой задачи был проведен эксперимент на специальном моделирующем стенде «Мульти_ДТА» по одновременному снятию температурных кривых с 4 «почти одинаковых термопар» типа ХА, введенных через крышку сосуда в тестируемую жидкость симметрично (сосуд с водой, нагретой до точки кипения воды при давлении 1 атм), как показано на рис. 4.

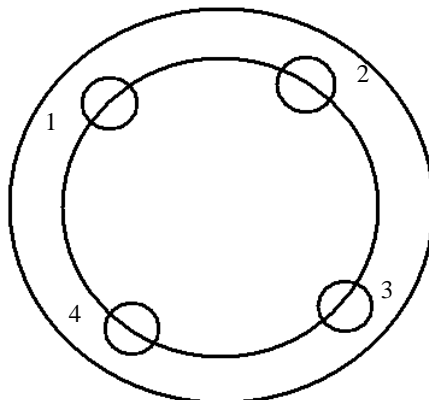


РИС. 4. Схема расположения 4 термопар в сосуде с тестируемой жидкостью

Ввод в компьютер результатов прямых 4-канальных измерений в реальном времени осуществлялся через устройство USB NI 9211 фирмы National Instruments.

Для извлечения необходимой информации предполагалось полученные на фоне шумов синхронные измерения четырех кривых охлаждения сопоставить между собой, используя результаты вычисления шести парных корреляционных функций для четырех температурных кривых (т. е. для каждой пары каналов). Кроме того, в определенные моменты времени дважды (для $t = 750$ с и $t = 1700$ с) включался на 20 с дополнительный источник тепла.

Результаты прямых 4-канальных измерений показаны на рис. 5.

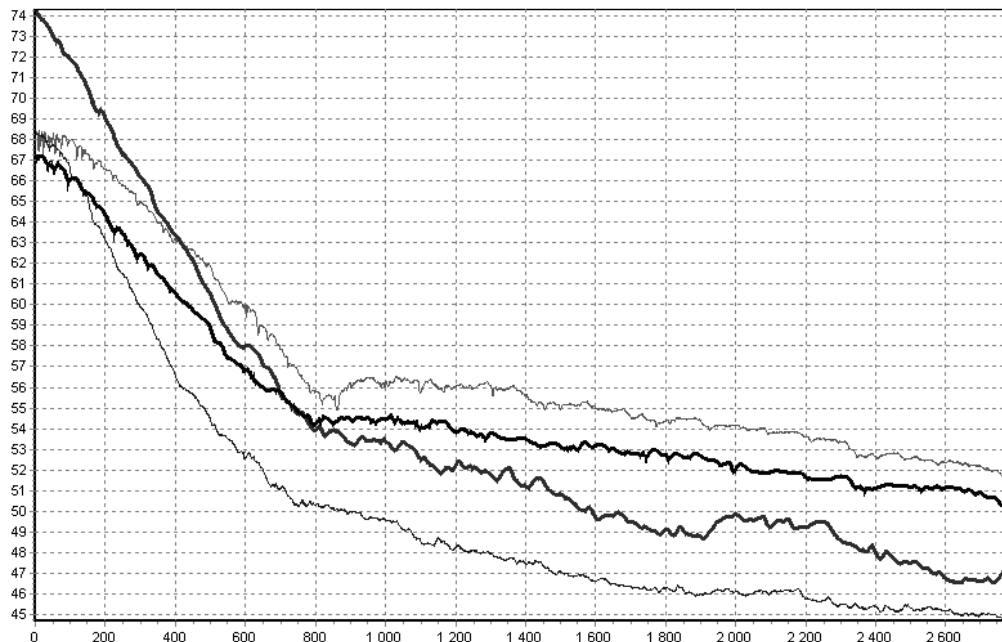


РИС. 5. Результаты прямых 4-канальных измерений

Результаты вычисления парных корреляционных функций показаны на рис. 6, а, б, в, г, д, е.

Из анализа рис. 6 получаем следующие выводы:

1. Значительная «шумовая» составляющая сигнала: меньше 5 % при $t \in (0, 670]$ с и 5–12 % при $t \in (671, 2400]$ с.
2. Доля шума в комплексе сигнал + шум скачком возрастает на участке $t > 671$ с.

3. Из анализа парных корреляций сигналов 4 каналов (см. рис. 5) следует, что подавляющую долю эксперимента (> 95 %) сигналы в разных каналах коррелированы (например, для 1 и 2 каналов корреляционная функция превышает 0.5 для 75 % времени и находится в течение 10 % времени эксперимента в области отрицательных значений корреляции (-0.2... -0.8). Подобная закономерность коррелированности оказалась свойственна и парам 1–3; 2–4; 3–4. Для пар 2–3 и 1–4 значения корреляционной функции не попадают в область отрицательных значений и находятся в пределах 0.6...1.0 в течение 62 % всего времени эксперимента.

4. Из выводов 1–3 следует, что для достаточно адекватного понимания вклада реальных процессов конвективного теплообмена в охлаждающемся расплаве необходимо проводить измерения параллельно значительным количеством однотипных термопар (в предельном случае «практически тождествен-

ным)), тогда как использование единственной термопары для большинства практических требований контроля качества получаемого слитка металла совершенно недостаточно.

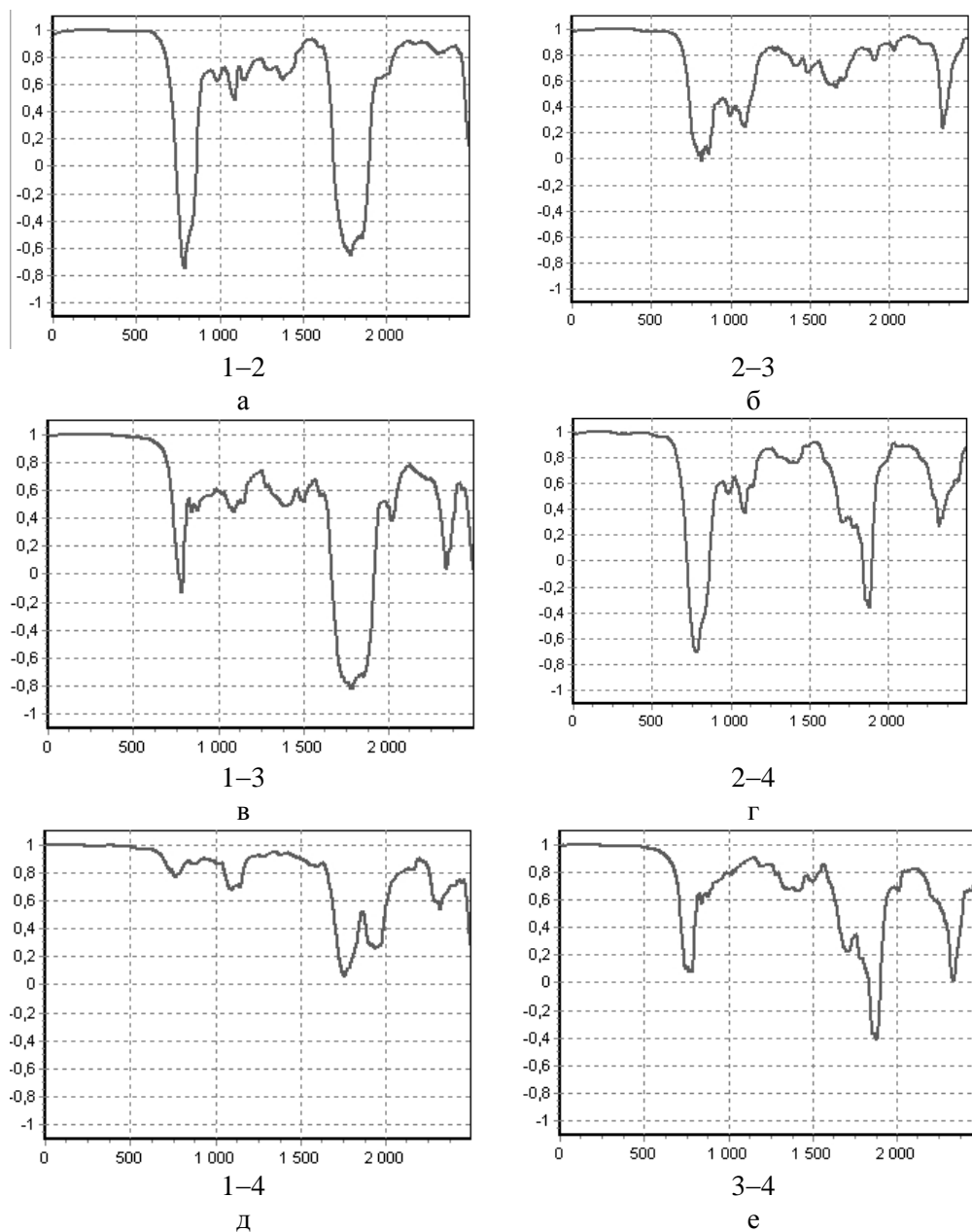


РИС. 6. Попарные корреляции для четырёх кривых из рис. 5

5. При наличии данных $N \times M$ штук термопар полученные данные измерения температуры кристаллизирующегося расплава по $N \times M$ каналам можно с помощью алгоритма, описанного в первой части работы, рассчитать поле температур в приграничной (к внешней поверхности) зоне изложницы. Точность такого метода расчета оценочно может быть получена из [5].

При исследовании (теоретическом и экспериментальном) движения турбулентных потоков жидкости или газа для обнаружения закономерностей измеряемых стохастических процессов (т. е. в условиях быстрых пульсаций измеряемых параметров) активно используют аппарат статистического анализа, позволяющий выявить некоторые важные закономерности для термобарических и кинематических параметров среды, усредненных по малым интервалам пространства и времени. Эти статистические методы включают, в частности, методы вычисления корреляционных и автокорреляционных функций функции измеряемых параметров (поле скоростей, температур, давления и др.). В этом смысле обнаруженные особенности поведения парных корреляционных функций (см. рис. 6) позволяют сделать предварительный вывод о возможности проявления в подобных экспериментах упорядоченных локализованных 3-мерных вихревых структур, которые относительно медленно распространяются (относятся к категории так называемых ползущих течений) в тестируемом объеме остывающей жидкости, перенося с собой запасенную в данном локальном объеме соответствующую порцию кинетической энергии, которая в конечном итоге со временем диссипируется во всем объеме жидкости. Можно также предположить, что наличие системы таких «блуждающих» вихрей может давать значительный вклад в снижение градиента температур в охлаждающейся жидкости, альтернативный вкладу обычной теплопроводности (последняя реализуется за счет механизма чисто молекулярной тепловой диффузии).

1. *Бялик О.М., Ментковский И.Л.* Некоторые вопросы динамической теории затвердевания металлических отливок. – Киев: Вища шк., 1982. – 179 с.
2. *Мондольфо Л.Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
3. *Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М.* Промышленные алюминиевые сплавы: 2-е изд. – М.: Металлургия, 1984. – 364 с.
4. *Писаренко В.Г.* Основы САПР складних об'єктів та систем. – К.: ТОВ „Аримойя”, 2003. – 124 с.
5. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

Получено 14.06.2007