

УДК 537.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2019 г. В. А. Ермишкин<sup>1</sup>, Н. А. Минина<sup>1</sup>, \*, О. К. Белоусов<sup>1</sup>, Н. А. Палий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: minina1951@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 16.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Описана разработанная методика для прямого измерения коэффициентов температуропроводности на поверхностях нагретых образцов по данным фотометрического анализа излучаемой ими энергии. Разработанный метод отличается простотой и высокой воспроизводимостью результатов измерения, однако его необходимо дополнить возможностью измерений по третьей координате.

DOI: 10.1134/S0367676519060140

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение теплофизических свойств предъявляет повышенные требования к точности, воспроизводимости и стабильности результатов совмещая их с относительно низкими затратами и высокой производительностью при их выполнении. Применение спектральных методов для получения теплофизических характеристик открывает большие возможности для удовлетворения этих требований. Излучение тел может служить практически безинерционным индикатором их энергетического состояния. Атомно-эмиссионные спектры нашли широкое применение для анализа химического состава материалов, а тепловое излучение служит основой для бесконтактного измерения температур. Однако эти примеры не исчерпывают возможности технического применения спектров отраженного и испущенного света для получения информации о физических характеристиках материалов. В частности, в авторском коллективе был разработан фотометрический анализатор структурных изображений (ФАСИ) [1, 2], который был использован для определения температуропроводности алюминиевой и медной пленочных мишеней, в которых с помощью лазерной вспышки возбуждался процесс переноса тепла [3]. В настоящей работе рассмотрено определение коэффициента температуропроводности многокомпонентной стали с помощью ФАСИ в условиях непрерывного нагрева исследуемого образца в металлографическом микроскопе Reihert.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследования была использована сталь 02Х21Н1Г2Б, из которой были приготовлены цилиндрические образцы диаметром 6.62 мм и высотой 11.06 мм, которые непрерывно нагревали в интервале температур 20–850°C со скоростью 12–15°C/мин. Структурные изменения на торцевой поверхности образца в процессе нагрева фиксировали с помощью специальной цифровой фотонасадки с 350-кратным увеличением. Отснятые кадры были проанализированы с помощью ФАСИ. Структурные изменения обнаруживали в результате сравнения по дифференциальной схеме эталонного кадра, на котором была отснята структура поверхности образца до начала нагрева, с ее изображением в нагретом состоянии. На этих кадрах снимались спектры яркости излучения света поверхностью образца. Алгебраические операции над спектрами позволили выявить и получить количественную меру этих изменений. Для этого интервалы яркости, в которых произошли изменения, выделяются с помощью цветового окрашивания и эта окраска переносится на структурные изображения. Тем самым удается визуализировать зоны, в которых произошли изменения, и измерить величину площадей, которую они занимают, и спектральные частоты, соответствующие их яркостям. Как явствует из монографии [4] энергия излучения ( $U$ ) тела связана с уровнем внутренней энергии, аккумулированной им ( $Q$ ) соотношением:

$$U = AQ, \quad (1)$$

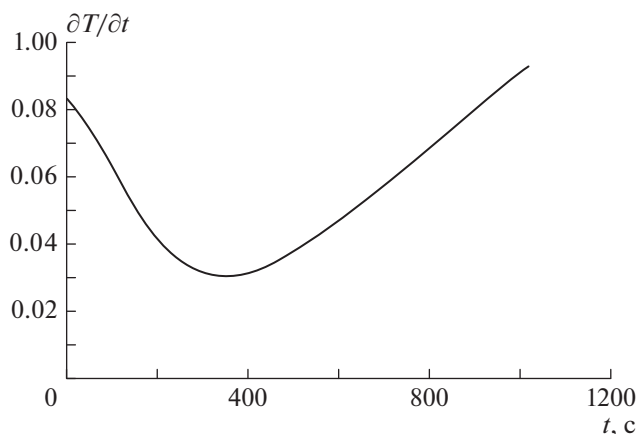


Рис. 1. Зависимость  $\partial T/\partial t=f(t)$  для выбранного температурного интервала.

где:  $A$  – коэффициент, связанный с вероятностью спонтанного излучения телом с внутренней энергией  $Q$ . ФАСИ позволяет измерить значения  $U$  при разных температурах в относительных единицах. Но если известно значение теплоемкости при любой температуре, то из соотношения (1) можно получить значение коэффициента  $A$  в энергетических единицах. Однако для определения коэффициента температуропроводности в этом нет необходимости, так как при использовании соотношения (1) в уравнении теплопроводности коэффициент  $A$  в правой и левой частях уравнения сократится. При этом двумерное уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

По результатам анализа кадров, снятых при разных температурах, можно получить значения производных, входящих в уравнение (2). Далее из этого уравнения определяется коэффициент температуропроводности. Следует отметить, что он определяется для двумерного случая, так как по условиям эксперимента нельзя определить вторую производную по третьей координате.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные измерений хорошо описываются уравнением:  $T = 56.72t = 120.77$  при критерии значимости  $R^2 = 0.9951$ . Для определения производных в уравнении (2) был выбран температурный интервал 20–120°C. В центре кадров, снятых в этом температурном интервале, были выделены микрофрагменты с размерами  $\sim 0.12 \times 0.12$  мм, сгруппированные по двум взаимноперпендикулярным направлениям в центре кадра. По своему физическому смыслу площади под спектральными кривыми

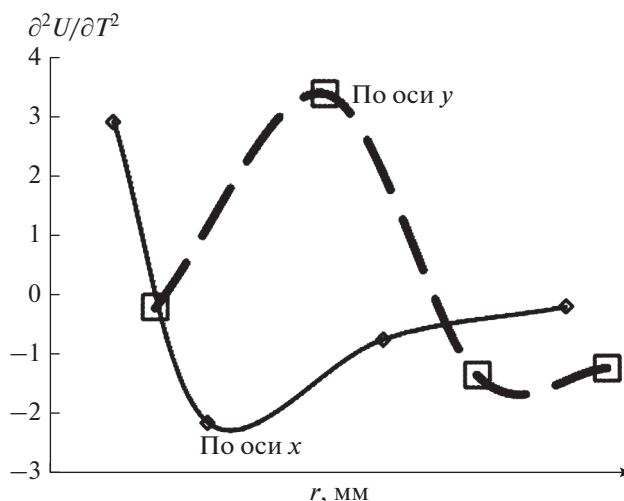


Рис. 2. Зависимости  $\partial^2 U/\partial x^2 = f(x)$  ( $\diamond$ ) и  $\partial^2 U/\partial y^2 = f(y)$  ( $\square$ ) при  $T = 70^\circ\text{C}$ .

являются удельными энергиями материала в соответствующих выделенных микрофрагментах. После построения зависимостей  $U = f(t)$ ,  $U = f(x)$  и  $U = f(y)$ , продифференцировав эти зависимости требуемое число раз, получим значения производных для подстановки в уравнение (2). Для этих производных были построены соответствующие зависимости. В частности на рис. 1 показана зависимость  $\partial T/\partial t=f(t)$ , построенная по данным дифференцирования уравнений тренда. Для определения производных в уравнении (2) был выбран температурный интервал 20–120°C. В центре кадров, снятых в этом температурном интервале, были выделены микрофрагменты с размерами  $\sim 0.12 \times 0.12$  мм, сгруппированные по двум взаимноперпендикулярным направлениям в центре кадра. По своему физическому смыслу площади под спектральными кривыми являются удельными энергиями материала в соответствующих выделенных микрофрагментах. После построения зависимостей  $U = f(t)$ ,  $U = f(x)$  и  $U = f(y)$ , продифференцировав эти зависимости требуемое число раз, получим значения производных для подстановки в уравнение (2). Для этих производных были построены соответствующие зависимости. В частности на рис. 2 показана зависимость  $\partial T/\partial t=f(t)$ , построенная по данным дифференцирования уравнений тренда. Зависимости  $\partial^2 U/\partial x^2$  и  $\partial^2 U/\partial y^2$  были построены для всех выделенных микрофрагментов в заданном температурном интервале. На рис. 2 показан пример этих зависимостей для  $T = 70^\circ\text{C}$ . При всех температурах в выбранном интервале температур были определены максимальные значения сумм вторых производных энергии по координатным осям и они были использованы для вычисления коэффициентов температуропроводности. По ним было получено среднее значение

этого коэффициента. Оно оказалось равным  $a = 0.01254 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Разброс полученных оценок коэффициента температуропроводности лежит в интервале  $[0.00941-0.01422] \cdot 10^{-4}$ . Следует отметить, что зависимости  $\partial^2 U / \partial x^2 = f(x)$  и  $\partial^2 U / \partial y^2 = f(y)$  носят немонотонный характер. Возможной причиной такого поведения зависимостей является структурная неоднородность исследованной стали в пределах фрагментов, что может вносить заметный вклад во внутреннюю энергию материала при малых площадях микро фрагментов. По порядку величины найденные значения не отличаются от значений коэффициентов температуропроводности, приводимых в справочниках для легированных сталей, но те получены для объемных измерений.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика для прямого измерения коэффициентов температуропроводности на поверхностях нагретых образцов по данным фотометрического анализа излучаемой ими энергии.

2. Разработанный метод отличается простотой и высокой воспроизводимостью результатов измерения, однако его необходимо дополнить возможностью измерений по третьей координате.

Работа выполнена по государственному заданию № 007-00129-18-00 и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-00098а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В.* // Инф. технол. 2007. № 11. С. 65.
2. *Ермишкин В.А., Минина Н.А., Федотова Н.Л.* Способ фотометрической диагностики фазовых превращений в твердых телах по данным анализа спектров яркости отражения света от их поверхности. Патент РФ № 2387978, кл. G01N21/55, G01N25/02. 2010.
3. *Новиков И.И., Ермишкин В.А., Кудрявцев Е.М., Минина Н.А.* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17. № 22. С. 152.
4. *Астапенко А.* Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. Долгопрудный: Изд-во Интеллект, 2010. 492 с.