

УДК 536.2.083

О. Е. Каракулов, старший преподаватель кафедры «Физика и оптотехника»
С. В. Бузилов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и оптотехника»
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СПЛАВОВ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

В работе проведен анализ методических погрешностей при измерении температуропроводности сплавов импульсным методом, описана экспериментальная установка для измерения коэффициента температуропроводности образцов различной формы.

Ключевые слова: методические погрешности, коэффициент температуропроводности, импульсный метод, экспериментальная установка.

Проектирование технологических объектов невозможно без знания теплофизических свойств начальных, промежуточных и конечных продуктов производства, определения их фазового состояния, причем появление множества новых областей применения материалов, в том числе и наноструктурированных, делает весьма актуальными измерения их теплофизических свойств. Ранее нами были проведены измерения температуропроводности системы Fe-Sn [1]. До последнего времени подобные системы несмешивающихся компонентов практически не находили себе применения, но сейчас появляется много работ, посвященных применению материалов на основе данной системы. Так, в работе [2] рассматривается возможность использования нанокompозитов на основе соединения Fe-Sn в анодах аккумуляторов нового поколения, а в работе [3] рассмотрена возможность использования нанокапсул на основе этого же соединения в качестве материала, хорошо поглощающего электромагнитное излучение.

Нами создана установка, позволяющая проводить измерения коэффициента температуропроводности для образцов различной формы (пластина, цилиндр, шар). Так, в случае использования образца в виде пластины можно воспользоваться методом Паркера [4]. На переднюю поверхность плоского образца (рис. 1) подается тепловой импульс, созданный лазерным излучением.

Коэффициент температуропроводности вычисляется по времени достижения на обратной поверхности пластины половины от максимальной температуры перегрева. При этом

$$a = Fo_{1/2} \frac{L^2}{t_{1/2}}, \quad (1)$$

где $Fo_{1/2}$ – критерий Фурье (безразмерное время), при котором безразмерная температура $\theta = \frac{T}{T_{\max}}$ достигает половины максимума; $t_{1/2}$ – соответствующее время достижения половины максимальной температуры перегрева образца на обратной поверхности.

Таким образом, измерив $t_{1/2}$ на обратной поверхности образца, можно вычислить значение коэффициента температуропроводности.

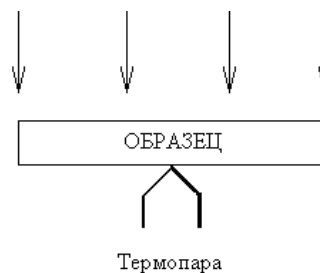


Рис. 1. Метод Паркера (равномерное тепловое излучение падает на переднюю поверхность образца, сигнал снимается с обратной поверхности)

Зависимость безразмерной температуры от критерия Фурье представлена на рис. 2. В работах [5–8] представлено применение импульсного метода для образца в виде цилиндра и шара.

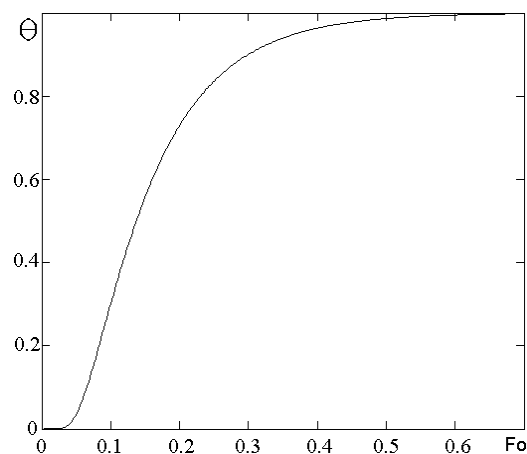


Рис. 2. Зависимость безразмерной температуры от критерия Фурье для метода Паркера

Использование образцов в форме пластины широко представлено в литературе. Так, в работах [9–13] исследовалось влияние теплообмена с окружающей средой, конечности длительности теплового импульса, пространственного распределения теплового импульса.

Как правило, при определении коэффициента температуропроводности предполагается, что вся тепловая энергия импульса поглощается очень тонким поверхностным слоем образца, толщина которого не учитывается. Однако при воздействии им-

пульсного лазера на поверхность лазерное излучение может проникнуть в глубь образца и вследствие скин-эффекта поглотиться в тонком скин-слое. В работах [14, 15] проведена оценка погрешности измерения температуропроводности импульсным методом, вызванная влиянием скин-эффекта и его влиянием на температурное поле внутри пластины. Показано, что погрешность, вносимая скин-эффектом, будет менее 0,1 %, если измерения проводить на массивных пластинах. Протекание температурного импульса с течением времени будет существенно меняться в тонких металлических пленках. При измерении температуропроводности металлических пленок необходимо делать поправку в критерий Фурье, учитывающую толщину скин-слоя.

К основным параметрам при измерении температуропроводности шарообразных тел импульсным методом можно отнести температуру перегрева, текущее время, геометрические размеры образца, расстояние между источником тепла и точкой, в которой производится измерение температурного перепада. Погрешности, возникающие при их определении, и допущения в математической модели определяют в конечном итоге ошибку определения температуропроводности. Для образца в форме шара

пренебрежение учетом теплообмена и конечной длительностью теплового импульса может значительно упростить расчеты, однако в этом случае возникают дополнительные методические погрешности, связанные с определением $Fo_{1/2}$.

На рис. 3 представлено относительное изменение критерия $Fo_{1/2}$ от критерия Bi . Как видно из графика, не представляется возможным пренебрегать теплообменом. Так, по нашим оценкам, значение критерия Bi уже при температуре $T = 300$ К достигает значения $Bi = 0,01$, при этом относительная ошибка определения критерия $Fo_{1/2}$ (азимутальный угол $\theta = 180^\circ$) достигает 13 %. Следовательно, нужно построить градуировочную кривую, которая позволила бы учесть значения критерия Bi при различных температурах.

Кроме этого значительный вклад в суммарную погрешность может вносить неточность определения азимутального угла. На рис. 4 представлена зависимость отношения абсолютной ошибки $Fo_{1/2}$ к значению этого критерия при $\theta = 180^\circ$, соответствующих воздействию мгновенного точечного теплового импульса, от абсолютной погрешности $\Delta\theta$. Видно, что относительная ошибка определения $Fo_{1/2}$ ($\theta = 180^\circ$) при $\Delta\theta = 10^\circ$ не превысит 1 %.

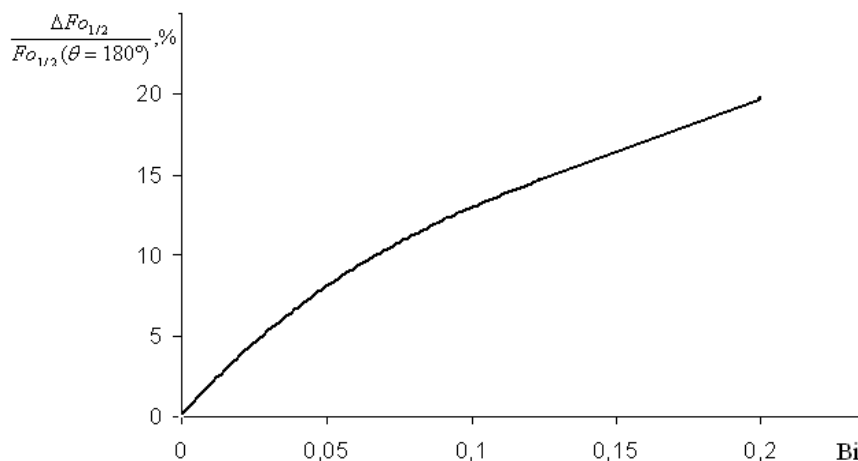


Рис. 3. Относительное изменение критерия $Fo_{1/2}$ от критерия Bi

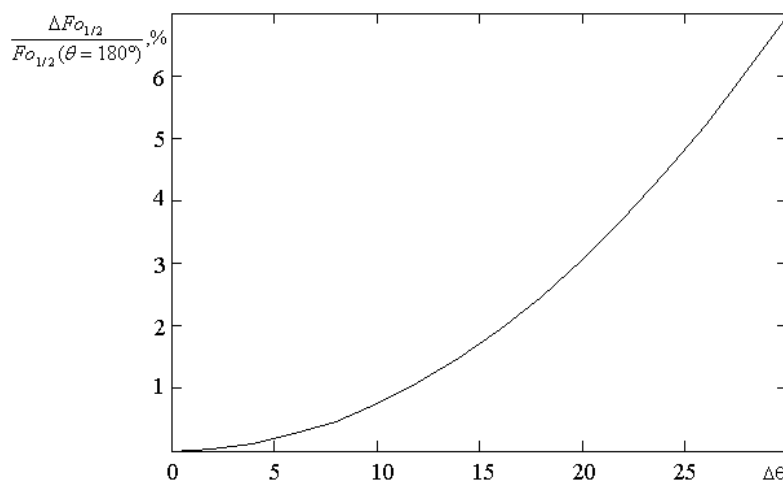


Рис. 4. Зависимость относительного изменения критерия $Fo_{1/2}$ от абсолютной погрешности $\Delta\theta$

На рис. 5 приведена структурная схема экспериментальной установки для измерения коэффициента температуропроводности.

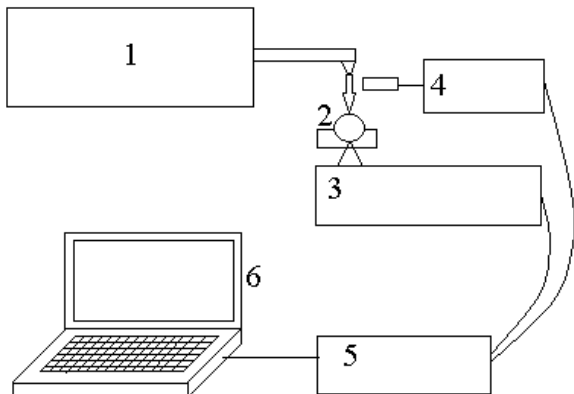


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки

Тепловой импульс, полученный с помощью установки СУ-1 1, в состав которой входит твердотельный оптический квантовый генератор, поступает на образец 2. Сигнал с образца поступает на блок предварительных усилителей 3 и далее поступает на вход компьютерного осциллографа АСК-3106 5, синхронизация запуска осциллографа и излучения лазера осуществляется синхронизатором 4. Дальнейшая обработка сигнала осуществляется на компьютере 6.

Для усиления, нормирования и выделения постоянной составляющей сигнала с датчиков служит блок предварительных усилителей (в дальнейшем БПУ). Его структурная схема показана на рис. 6. БПУ имеет два режима работы: калибровка (К) и измерение (И). В режиме калибровки переключатель S1 замкнут, при этом интегратор (И) включен в цепь обратной связи схемы выделения постоянной составляющей, поддерживая на выходе (DC) нулевой потенциал. В режиме измерения переключатель S1 разомкнут, интегратор (И) находится в режиме хранения, в схеме выделения постоянной составляющей из сигнала датчика вычитается постоянная составляющая температуры, образуя сигнал, соответствующий температуре перегрева образца.

Переключатель S2 служит для ступенчатого изменения коэффициента усиления БПУ (1,10, 100).

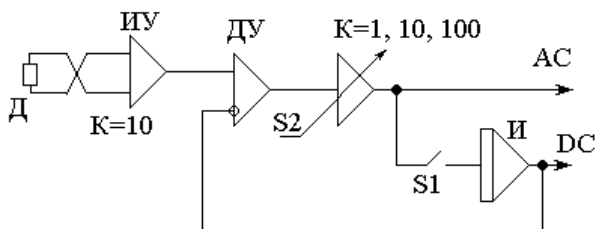


Рис. 6. Структурная схема блока предварительных усилителей

Таким образом, на основе анализа погрешностей можно сделать выводы об обязательном учете скин-эффекта в случае измерения коэффициента темпера-

туропроводности тонких пленок, а в случае шарообразного образца необходимо учитывать влияние теплообмена с окружающей средой.

Погрешность измерения температуропроводности на созданной установке, по нашим расчетам, не превышает 6 %.

Библиографические ссылки

1. Каракулов О. Е., Загребин Л. Д., Шабанова И. Н. Измерение температуропроводности образцов в виде шара. Система Fe-Sn // Теплофизика высоких температур-2010. – Т. 48. – № 3. – С. 368–372.
2. Chun-jing Liu, Fang-hong Xue, Hao Huang, Xiu-hong Yu, Chang-jiang Xie, Meng-shi Shi, Guo-zhong Cao, Young-guan Jung, Xing-long Dong Preparation and electrochemical properties of Fe-Sn (C) nanocomposites as anode for lithium-ion batteries // Electrochimica Acta 129 (2014) 93–99.
3. Wang Z. H., He X., Wang X., Han Z., Geng D. Y., Zhu Y. L. and Zhang Z. D. Magnetic and microwave-absorption properties of SnO-coated α -Fe(Sn) nanocapsules // J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010) 495404 (8pp)
4. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P. and Abbott G. L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32. – P. 1679–1684.
5. Волкова А. А., Костокрыз В. Н., Гальперин Л. Г., Зиновьев В. Е. Импульсный метод определения температуропроводности для сферических и цилиндрических образцов // Сб. физические свойства металлов и сплавов : труды вузов, Свердловск. – 1976. – Вып. 1. – С. 102–107.
6. Загребин Л. Д., Байметов А. И. Измерение температуропроводности твердых тел с осесимметрично расположенным источником теплового импульса // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. – С. 75–80.
7. Бузилов С. В., Загребин Л. Д. Импульсный метод измерения температуропроводности сферических образцов // ИФЖ. – 1999. – Т. 72, № 2. – С. 236–239.
8. Загребин Л. Д., Бузилов С. В. Измерение температуропроводности и теплопроводности металлов вблизи точки плавления // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 1. – С. 153–157.
9. Heckman R. C. Finite pulse-time and heat-loss effects in pulse thermal diffusivity measurements // J. Appl. Phys. – 1973. – Vol. 44, No.4. – P. 1455–1460.
10. Taylor R. E. and Clarke L. M. Finite pulse time effects in flash diffusivity method // High Temp.–High Press. – 1974. – Vol. 6. – P. 65–72.
11. Clarke L. M. and Taylor R. E. Radiation loss in the flash method for thermal diffusivity // J. Appl. Phys. – 1975. – Vol. 46, No.2. – P. 714.
12. Azumi T., Takahashi Y. Novel finite pulse-width correction in flash thermal diffusivity measurement // Rev. Sci. Instrum. – 1981. – Vol. 52, № 9. – P. 1411–1413.
13. Перевозчиков С. М., Загребин Л. Д. Погрешности измерения температуропроводности импульсным методом, вызванные случайными флуктуациями формы лазерного импульса // Измерительная техника. – 2006. – № 11. – С. 37–39.
14. Бузилов С. В., Перевозчиков С. М., Прыхин В. В. Тепловое действие лазерного излучения на тонкие металлические пленки // В мире научных открытий. – 2010. – № 4-4. – С. 34–36.
15. Buzilov S. V., Pryakhin V. V. The influence of skin effect on the error in the measurement of thermal diffusivity by laser flash method // French Journal of Scientific and Educational Research. – 2014. – № 2, Vol. III. – P. 577–583.

* * *

O. E. Karakulov, Senior Lecturer, Kalashnikov ISTU

S. V. Buzilov, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU

Analysis of Errors When Measuring the Heat Diffusivity Coefficient of Alloys by Pulse Method

The paper presents the analysis of systematic errors when measuring the heat diffusivity of alloys by pulse method. Experimental stand for measuring the heat diffusivity coefficient for samples of various shape is also described.

Keywords: systematic errors, heat diffusivity coefficient, pulse method, experimental stand.

Получено: 29.05.2015