

- zhdou usloviyami vyrashchivaniya, stroeniem i opticheskimi svoistvami kristallov langasita —  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  / Perspekt. Mater. 2004. N 4. P. 17 – 30 [in Russian].
11. **Buzanov O. A., Didenko I. S., Kozlova N. S., Skryleva E. A., Kozlova A. P., Siminel N. A.** Vliyanie izotermicheskogo otzhi-ga na opticheskie parametry lantan-gallievogo tantalata / Izv. Vuzov. Mater. Élekt. Tekhn. 2012. N 1. P. 22 – 25 [in Russian].
  12. Fiziko-khimicheskie svoistva oksidov / G. V. Samsonov (ed.). — Moscow: Metallurgiya, 1978. — 472 p. [in Russian].
  13. **Kugaenko O. M., Petrakov V. S., Sagalova T. B., et al.** Rentgenostrukturnye issledovaniya temperaturnoi ustoychivosti struktury kristallov semeistva langasita / Papers of the Third Int. Youth Sci. School-Sem. “Modern methods of analyzing the diffraction data (diffraction methods for nanotechnology) and topical issues of X-ray optics.” — Novgorod, 2011. P. 68 – 69 [in Russian].
  14. **Akchurin M. Sh., Galstyan V. G., Regel' V. R., Rozhanskii V. N.** Mikrokadotoluminescentnoe issledovanie peremeshcheniya tochechnykh defektov pri indentirovanii tugo-plavkikh kristallov / Poverkhn. Fiz. Khim. Mekh. 1983. N 3. P. 119 – 123 [in Russian].
  15. **Akchurin M. Sh., Galstyan V. G., Regel' V. R.** O prirode deformirovaniya kristallov sosredotochennoi nagruzkoi. RĖM issledovaniya / Izv. AN SSSR. Ser. Fiz. 1991. V. 5. N 8. P. 1556 – 1567 [in Russian].

УДК 53.082.6

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

© А. И. Шевченко<sup>1</sup>

*Статья поступила 12 марта 2014 г.*

Изложен метод измерения коэффициента температуропроводности образца круглого длинного стержня металлов и сплавов в режиме импульсного нагревания. Основной целью метода является повышение точности измерения температуропроводности металлов и уменьшение времени его проведения с помощью оценки термограммы нагревания образца.

Рассмотрено параболическое уравнение теплопроводности для полуограниченного тонкого стержня с теплоизолированной боковой поверхностью. Оценены два варианта метода. Первый базируется на определении второй производной от температуры по координате, второй — на использовании первой производной по времени.

Предложенный метод может найти применение в металлургии и литейном производстве при измерении температуропроводности металлов.

**Ключевые слова:** измерения; металлы; температуропроводность; импульсный метод нагревания.

Коэффициент температуропроводности образца круглого сечения используют в металлургии и литейном производстве, а также в тепловой энергетике, химической и машиностроительной отраслях промышленности.

Метод определения теплофизических характеристик материалов изложен в работе [1]. При данном методе на поверхность исследуемого материала воздействуют тепловым импульсом от линейного источника теплоты и регистрируют температуру в двух точках поверхности в фиксированный момент времени.

Коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле  $a = 0,36x_1^2/\tau_1$ , где  $x_1$  — координата, которая отсчитывается от оси линейного источника;  $\tau_1$  — момент времени, когда разница  $\Delta T(\tau_1)$  равняется избыточной температуре в точке контроля, которая измеряется на линии нагревания и на заданном расстоянии от этой линии. К недостаткам этого способа относится то, что измерение расстояния в двух точ-

ках образца для двух температур повышает величину погрешности контроля. Кроме этого, образец не является одномерным и теплота распространяется не только по поверхности, но и в глубину образца.

Известен метод [2, 3], при котором по термограмме нагревания и охлаждения тыльной поверхности образца определяется температуропроводность. В основе его лежит тепловое воздействие импульса лазера длительностью  $\tau_u = 1 - 2$  мс на фронтальную поверхность образца и измерение температур на его тыльной поверхности. Коэффициент температуропроводности (если теплообменом можно пренебречь) в интервале  $0 < Fu < 1$  ( $Fu$  — критерий Фурье) составляет  $a = 1,37(1 + 0,561\tau_u/\tau_{1/2})l^2/(\pi^2\tau_{1/2})$ , где  $\tau_{1/2}$  — время достижения температуры тыльной стороны образца, равной половине максимальной температуры образца,  $l$  — длина образца, м.

Недостатком указанного метода является небольшая точность измерения температуры термопреобразователем, поскольку необходимо точно зафиксиро-

<sup>1</sup> Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина; e-mail: soi\_51@ukr.net

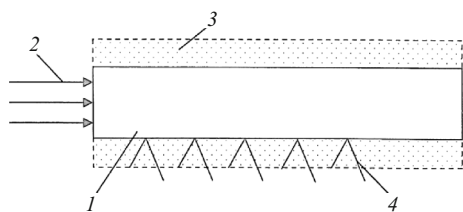


Рис. 1. Схема образца с термопреобразователями: 1 — исследуемый образец в виде стержня; 2 — источник теплоты (нагреватель); 3 — боковая теплоизоляция; 4 — термопреобразователи

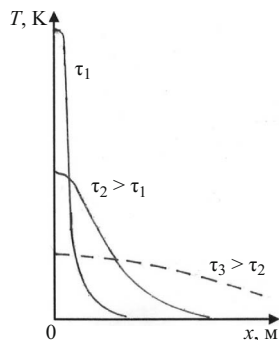


Рис. 2. Распределение температуры вдоль образца в моменты времени  $\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$  в точках [6]

вать длительность импульса  $\tau_{\text{л}}$  лазера и максимальную температуру нагревания.

Основная цель предлагаемого метода — повышение точности измерения температуропроводности металлов и уменьшение времени его осуществления с помощью оценки термограммы нагревания исследуемого образца.

Рассмотрим решение параболического уравнения теплопроводности для полуограниченного тонкого стержня с теплоизолированной боковой поверхностью [4, 5]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (1)$$

где  $T$  — температура;  $\tau$  — время;  $x$  — пространственная координата.

В начальный момент времени  $\tau = 0$  действует мгновенный источник теплоты  $Q$  (Дж/м<sup>3</sup>) на расстоянии  $\zeta$  от конца стержня ( $x = 0$ ), на котором расположен источник теплоты. Теплота  $Q = bc\rho$ , где  $b$  — коэффициент;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>. Это задача по определению распределения температур при охлаждении стержня, получившего кратковременный тепловой импульс [3 – 6]. Функция  $T(x, \tau)$  является частным решением уравнения теплопроводности и представляет собой температуру в точке  $x$ , если в начальный момент времени в точке  $x = 0$  выделяется тепловой импульс. При заданном времени  $\tau$  кривая распределения температуры в направлении  $x$  имеет максимум, который находится на расстоянии  $x = 0$ . Рассмотрим случай, когда  $\zeta = 0$ .

Начальные условия:  $T(x, 0) = 0$ ,  $T(\infty, 0) = 0$ ; граничные условия:

$$-\frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} + HT(0, \tau) = 0,$$

где  $H = \alpha/\lambda$  — относительный коэффициент теплообмена, 1/м ( $\alpha$  — коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности);  $T$  — температура, К;  $\tau$  — время, с;  $x$  — пространственная координата, м.

Распределение температуры в длинном цилиндре описывается формулой

$$T(x, \tau) = \frac{b}{\sqrt{4\pi a \tau}} \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4a\tau}\right], \quad (2)$$

где  $b = Q/(c\rho)$ .

*Вариант 1 метода.* Данный вариант заключается в облучении тепловым импульсом от нагревателя 2 (рис. 1) торца исследуемого теплоизолированного по бокам цилиндрического образца 1 с теплоизоляцией 3. В основу метода положено измерение температур пятью термопреобразователями 4 на выбранных расстояниях  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$  от торца образца на боковой поверхности. По этим точкам строится зависимость температуры  $T$  от  $x$  при фиксированном моменте времени  $\tau_{\text{ф}}$ , находятся вторая производная от  $T''$  по координате  $x$  и координата точки  $x_1$ , в которой  $T''' = 0$ . Коэффициент температуропроводности определяется по формуле

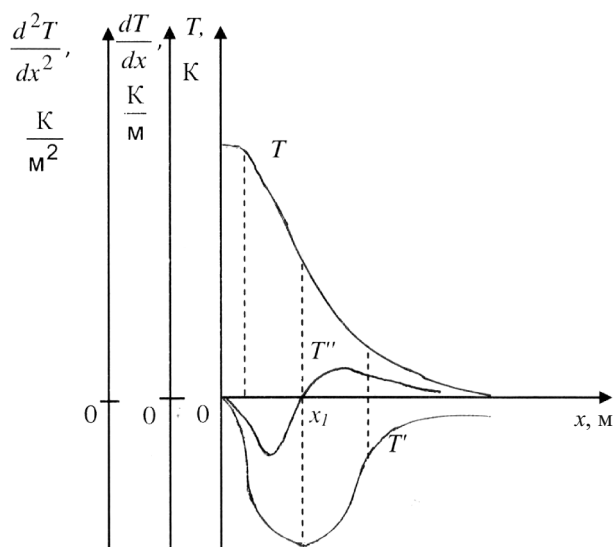
$$a = x_1^2 / 2\tau_{\text{ф}}. \quad (3)$$

Предложенный метод контроля температуропроводности материалов реализуется следующим образом.

На торце исследуемого образца 1 закрепляют нагреватель 2, который подключен к источнику напряжения. Термопреобразователи 4 соединяют с самописцем НЗ031 (или компьютером). Включают источник напряжения и самописец. Распределение температур вдоль образца в моменты времени  $\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$  (рис. 2) приведено в работе [5].

На самописце (или компьютере) записывают функцию температуры  $T$  (рис. 3) от  $x$  в точках  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$  при фиксированном моменте времени  $\tau_{\text{ф}}$ . Данные заносят в компьютер, аппроксимируют кривую нагревания и осуществляют двойное дифференцирование  $T$  по координате  $x$ , находят координату  $x_1$ , в которой  $T''' = 0$ ; подсчитывают значение коэффициента температуропроводности  $a$  по формуле (3). На рис. 3 точка  $x_1$  — координата, в которой  $T''' = 0$ .

*Вариант 2 метода.* В основу этого варианта, который включает облучение тепловым импульсом торца исследуемого цилиндрического образца, положено измерение температуры одним термопреобразователем на фиксированном расстоянии  $\sigma_{\text{ф}}$  на боковой поверхности теплоизолированного по бокам образца. Строят



**Рис. 3.** Термограмма нагрева исследуемого образца в момент времени  $\tau_\phi$  в точках  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$  (вариант 1 метода):  $T$  — температура в фиксированный момент времени  $\tau_\phi$  в зависимости от координаты  $x$ ;  $T'$  — первая производная от температуры по координате  $x$ ;  $T''$  — вторая производная от температуры по координате  $x$ ;  $x_1$  — координата точки, в которой  $T'' = 0$

зависимость температуры  $T$  от  $\tau$ . Находят первую производную  $T'$  по времени  $\tau$  в точке  $\sigma_\phi$ . После этого определяют момент времени  $\tau_1$ , при котором  $T' = 0$ , и вычисляют коэффициент температуропроводности  $a$  по формуле

$$a = \sigma_\phi^2 / 2\tau_1. \quad (4)$$

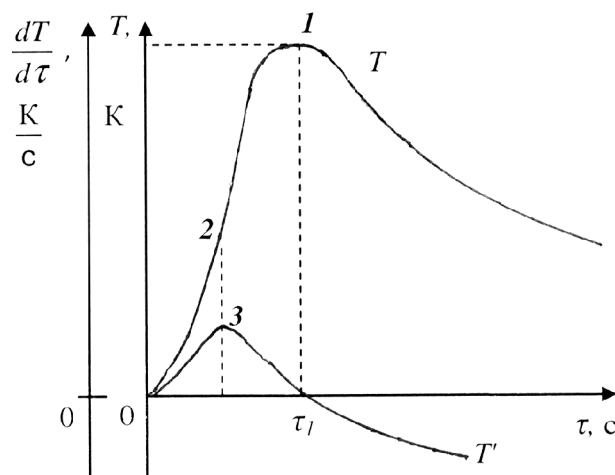
Сигнал одного термопреобразователя в фиксированной точке  $\sigma_\phi$  записывают на самописце и компьютере. На рис. 4 показана функция экспериментальной температуры  $T$  от времени  $\tau$  в точке  $\sigma_\phi$ . Находят первую производную  $T'$  от  $\tau$  и приравнивают ее к нулю. На рис. 4 показано максимальное значение температуры  $T$  (точка 1) и значение  $\tau_1$ , при котором производная  $T' = 0$ . Подставляют полученные значения в формулу (2) и находят  $a$ .

Диапазон измерений температуропроводности металлов в данном методе от  $1,12 \cdot 10^{-4}$  (медь) до  $4,0 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (сталь).

Метод измерения температуропроводности металлов, который предложен в двух вариантах, имеет следующие преимущества по сравнению с прототипом: не требует измерения теплового потока и температуры в двух точках образца на разных расстояниях, а также учета времени достижения температурной волной противоположного торца стержня. Это повышает точность измерений и уменьшает время контроля.

Сравним два варианта метода между собой.

В варианте 1 наличие нескольких термопар увеличивает погрешность за счет сложения погрешностей определения расстояния размещения термопреобразователей, а также потерь в проводах термопреобразова-



**Рис. 4.** Термограмма  $a(T)$  нагревания образца (термопреобразователь в точке  $\sigma_\phi$ ) в зависимости от времени  $\tau$ , первая производная по времени  $T'$  и точка  $\tau_1$  в которой  $T' = 0$  (вариант 2 метода)

телей. Менее трудоемким, более быстрым и простым в реализации является вариант 2 метода. По сложности обработки термограмм при наличии компьютера оба варианта метода сравнимы между собой. При записи термограмм на самописец в варианте 1 необходимо пользоваться многоканальным самописцем.

В случае значительной зависимости температуропроводности металла от температуры можно выбрать варианты 1 или 2 в зависимости от задачи исследования. Если необходимо найти усредненное значение коэффициента  $a$  по длине образца, то предпочтительнее использовать вариант 1, а если следует определить функцию зависимости коэффициента  $a$  от температуры, то более достоверным будет вариант 2 метода.

Оценку погрешностей определения коэффициента температуропроводности выполняли в соответствии с ГОСТ Р 8.736 [6].

За оценку результата измерений принимали среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений  $x_{ср}$ . Измеряли среднее квадратическое отклонение  $s$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, и среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины)  $s_{x_{ср}}$ .

Оценивали границу неисключенной систематической погрешности (НСП)  $\Theta_\Sigma$  оценки измеряемой величины при наличии менее трех ( $m < 3$ ) НСП, каждая из которых представлена границами  $\Theta_i$ , по формуле

$$\Theta_\Sigma = \pm \sum_{i=1}^m |\Theta_i|.$$

При числе составляющих НСП, большем или равном трем ( $m \geq 3$ ), доверительные границы НСП оценки измеряемой величины вычисляли путем построения композиции НСП. Суммарное среднее квадратич-

ческое отклонение  $s_{\Sigma}$  оценки измеряемой величины вычисляли по формуле

$$s_{\Sigma} = \sqrt{s_{\Theta}^2 + s_{\text{хсп}}^2},$$

где  $s_{\Theta}$  — среднеквадратическое отклонение НСП.

Величины погрешностей составили:  $\delta_t$  (за счет неплотного прилегания термопреобразователя к исследуемому образцу) — 2 %;  $\delta_r$  (измерения температуры) — 3 %;  $\delta_b$  (за счет боковых потерь в цилиндрах) — 1 %;  $\delta_d$  (за счет потерь в проводах термопреобразователей) — 1 %;  $\delta_{\tau}$  (за счет инерции нагревателя) — 2 %;  $\delta_L$  (за счет нарушения температурного поля вследствие сверлений отверстий в образце) — 2 %; погрешность за счет отклонения формы теплового импульса нагревателя от мгновенного нагрева — 1 %; граничная относительная погрешность  $\delta_a$  измерения коэффициента теплопроводности по варианту 1 метода — 8,4 %; по варианту 2 — 7 %.

Таким образом, метод измерения теплопроводности металлов, который предложен в двух вариантах, имеет следующие преимущества по сравнению с прототипом: реализация его не требует измерения теплового потока, а также времени достижения температурной волны противоположного торца стержня. Это позволяет повысить точность и уменьшить время измерения.

Предложенный метод может найти применение в металлургии и литейном производстве при измерении теплопроводности металлов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 1712849 А1 СССР, кл. G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Арю-

тюнов Б. Ф., Граzdовский Т. Я., Фесенко А. И., Штейнбрехер В. В. — № 4802513/25; заявл. 15.03.90; опубл. 15.02.92, Бюл. № 6.

2. **Круглов А. Б., Круглов В. Б., Тенишев А. А.** Измерение теплопроводности материалов ядерной энергетики методом импульсного нагрева / Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 1. С. 145 – 148.
3. **Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbot G. L.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, thermal conductivity / J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. N 9. P. 1679 – 1683.
4. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
5. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
6. ГОСТ Р 8.736–2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 23 с.

## REFERENCES

1. Pat. 1712849 A1 SSSR, kl. G 01 N 25/18. Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov / Aryutyunov B. F., Grazdovskii T. Ya., Fesenko A. I., Shteinbrekher V. V. — № 4802513/25; appl. 15.03.90; publ. 15.02.92, Byul. № 6. [in Russian].
2. **Kruglov A. B., Kruglov V. B., Tenishev A. A.** Izmerenie temperaturoprovodnosti materialov yadernoi énergetiki metodom impul'snogo nagreva / Teplofiz. Vysok. Temper. 2010. Vol. 48. N 1. P. 145 – 148 [in Russian].
3. **Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbot G. L.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, thermal conductivity / J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. N 9. P. 1679 – 1683.
4. **Karslou G., Eger D.** Teploprovodnost' tverdykh tel. — Moscow: Nauka, 1964. — 488 p. [in Russian].
5. **Lykov A. V.** Teoriya teploprovodnosti. — Moscow: Vysshaya shkola, 1967. — 599 p. [in Russian].
6. GOST R 8.736–2011. GSI. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenii. Osnovnye polozheniya. — Moscow: Standartinform, 2013. — 23 p. [in Russian].