

15

## Определение температуропроводности материалов методом нестационарного точечного нагрева

© Д.Ю. Головин<sup>1</sup>, А.И. Тюрин<sup>1</sup>, А.А. Самодуров<sup>1</sup>, Ю.И. Головин<sup>1,2,†</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский институт «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

† E-mail: yugolovin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 30 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2019 г.

Принято к публикации 4 октября 2019 г.

Описан термографический экспресс-метод определения коэффициента температуропроводности  $a$  пластинчатых изделий, который можно рассматривать как модификацию и дальнейшее развитие метода лазерной вспышки, при этом в отличие от последнего предложенный метод не требует вырезки образцов и двустороннего доступа к объекту. Он заключается в точечном ступенчатом нагреве объекта сфокусированным лазерным пучком ( $\sim 0.1 \text{ mm}^2$ ) с одновременной высокоскоростной регистрацией картины нестационарного температурного поля тепловизором. Разработанный алгоритм извлечения величины  $a$  из первичных данных исключает необходимость определения абсолютных температур и мощности поглощенной энергии падающего потока энергии.

**Ключевые слова:** температуропроводность, нестационарный точечный нагрев, тепловизор.

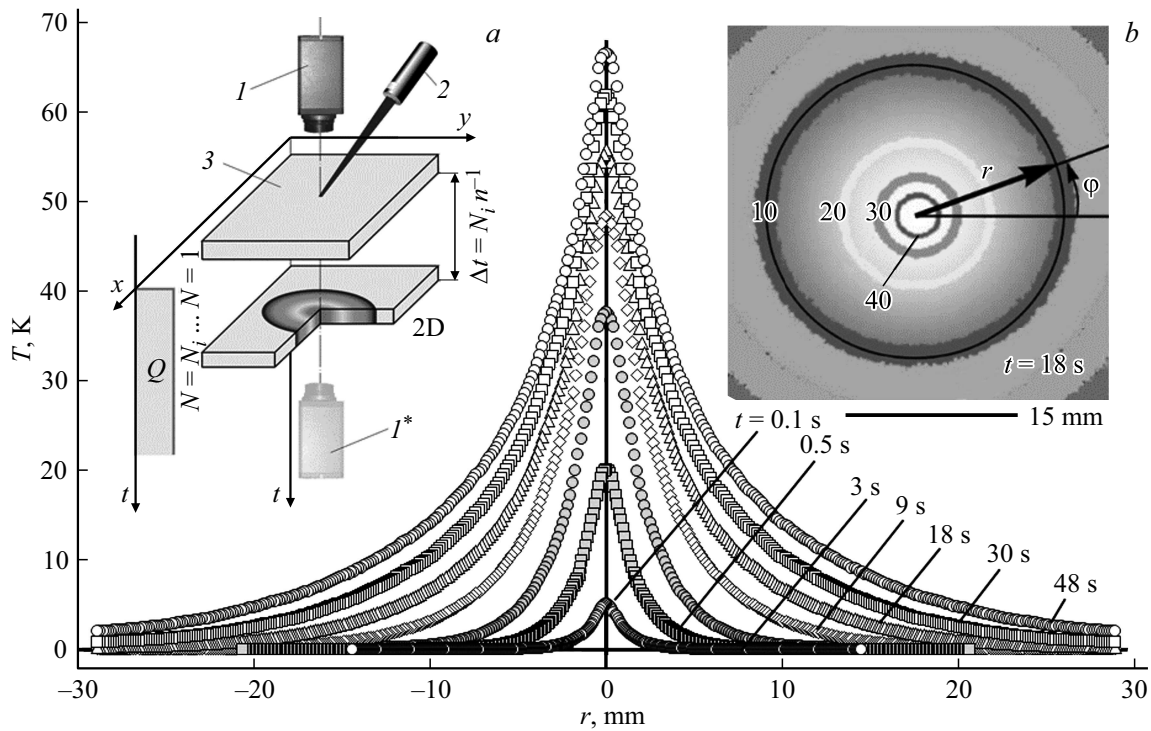
DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48863.18052

Знание теплофизических характеристик (ТФХ) материалов и изделий необходимо при проектировании и эксплуатации энергетического оборудования, мощной лазерной техники, наземных и аэрокосмических транспортных средств, оборудования химических производств, радио- и электротехнических изделий и др. Известны две большие группы методов измерения ТФХ: стационарные и нестационарные [1–5]. Первые в принципе не позволяют измерять прямыми способами коэффициент температуропроводности  $a$ , необходимый для расчета распространения теплового фронта в условиях импульсного нагрева изделия. Среди нестационарных способов большое распространение получил метод лазерной вспышки (МЛВ), принципы которого предложил У. Паркер с соавторами еще в 1961 г. [6]. С тех пор этот метод значительно усовершенствовался и вошел в международные стандарты [7–9], но сохранил неустраняемые недостатки: необходимость вырезки образца определенной формы и размеров и двустороннего доступа к нему. Эти особенности делают МЛВ весьма трудоемким, малопроизводительным и снижающим выпуск готовой продукции.

В работе предложена экспресс-модификация МЛВ, не требующая вырезки образцов из изделия, двустороннего доступа к нему и подготовки поверхности к испытанию. Она заключается в точечном ступенчатом нагреве поверхности объекта сфокусированным лазерным пучком (с гауссовым радиусом  $r_0 = 0.1\text{--}0.3 \text{ mm}$ ) с одновременной высокоскоростной регистрацией тепловизором картины нестационарного температурного поля (рис. 1). Особенностью способа, поддерживаемого оригинальным алгоритмом обработки первичных данных и разработан-

ным программным обеспечением, являются использование радиальной симметрии картины изотерм (на поверхности однородного материала) и накопление за время теста, занимающего единицы-десятки секунд, большого массива первичных данных (10–100 МВ). Усреднение сигналов по такому массиву данных позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум и таким образом обеспечить среднеквадратическое отклонение конечного результата в 2–4%.

Опытный образец портативного прибора содержал тепловизор FLIR A35sc, установленный на направляющих, снабженных датчиком продольного перемещения Vogel-150 (для изменения поля зрения и точного масштабирования изображения). Точечный нагрев осуществлялся Nd:YAG-лазером (лазерный модуль LSR445CP-FC-10W с регулируемой непрерывной мощностью излучения от 1 до 10 W), снабженным коллиматором. Лазер не создавал короткую вспышку, как в МЛВ и его латеральных (in plane) модификациях [10], а работал непрерывно в течение всего процесса измерения. Это позволяло значительно уменьшить локальный перегрев в центре пятна нагрева, одновременно увеличив температуру во всей инспектируемой области, а также снизить требования к мощности лазера. Тепловизор мог располагаться как на одной стороне с лазером, так и с противоположной от него (см. вставку *a* на рис. 1), что не вносит принципиальных различий в существо метода, а приводит лишь к небольшим техническим изменениям в реализации. Кадры фильма преобразовывались в двумерные карты распределения температуры. Для уменьшения влияния неоднородности оптических свойств поверхности образца из каждой такой карты



**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость температуры  $T$  от расстояния до центра пятна нагрева  $r$  в листе нержавеющей стали 12X18H9T толщиной  $\delta = 1$  mm для разных моментов времени  $t$ . На вставке  $a$  приведена схема эксперимента: 1 и 1\* — тепловизор и его положение при реализации одностороннего и двустороннего тестов соответственно, 2 — лазер, 3 — исследуемый образец;  $n = 10\text{--}60\text{ s}^{-1}$  — скорость кинофильмирования,  $N$  — номер кадра. На вставке  $b$  — пример отдельного кадра термограммы со схемой усреднения температуры (в К) по углу  $\phi$ .

попиксельно вычиталась карта начального состояния до начала нагрева. В последующем оперировали величиной разницы  $T = T_h - T_0$ , где  $T_h$  — мгновенная локальная температура,  $T_0$  — температура перед испытанием. Затем определялось положение центра симметрии изотерм и производилось усреднение величины  $T$  по углу  $\phi$  до  $360^\circ\text{C}$  (вставка  $b$  на рис. 1) при наборе фиксированных расстояний  $r$  от центра пятна нагрева, что сильно снижало шумы и помехи при измерениях. Для определения  $a$  в однородных изотропных материалах было принято  $\phi = 360^\circ\text{C}$ . Верификация метода проведена на пластинах толщиной  $b = 1\text{--}2$  mm из трех металлических материалов: стали Ст 35, нержавеющей стали 12X18H9T и титанового сплава ОТ4-2, различающихся теплофизическими и оптическими свойствами поверхности.

Кратко опишем расчетную модель извлечения из этих данных величины  $a$ . В однородной пластине точечный нагрев генерирует радиально симметричное тепловое поле  $T(r, t)$ . Оно может быть описано наиболее простым образом, когда тепловой фронт распространится от центра пятна нагрева на расстояние  $r \gg r_0$  и  $r \gg b$ , а картины изотерм на передней и тыльной поверхностях стенки станут практически одинаковыми и симметрия поля приобретет цилиндрический характер. Для этого необходимо выполнение двух условий:

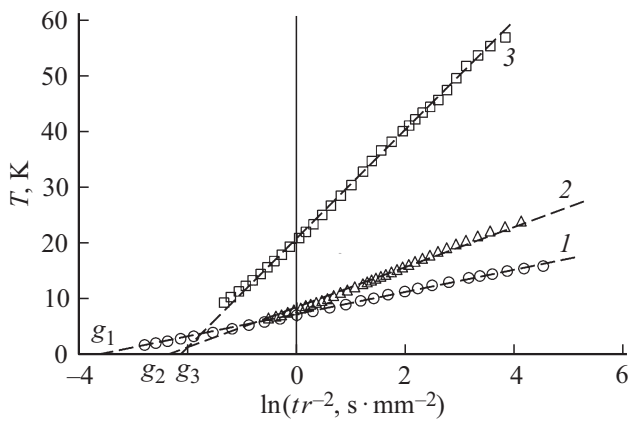
$$\text{Fo}_b = ta/b^2 \gg 1, \quad \text{Fo}_{r_0} = ta/r_0^2 \gg 1, \quad (1)$$

где  $\text{Fo}_b$  и  $\text{Fo}_{r_0}$  — критерии Фурье, соответствующие размерам  $b$  и  $r_0$ . Тогда при нагреве тепловым потоком  $Q$  поле  $T(r, t)$  в пластине может быть описано выражением [11]:

$$T(r, t) = (Q/4\pi\lambda\delta) \ln(4at/Cr^2) + O(r_0^2/at), \quad (2)$$

где  $\ln C = \gamma \approx 0.5772$  — постоянная Эйлера,  $O(x)$  — некоторая функция, лимитированная значением своего аргумента, умноженного на конечную константу. При выполнении условий (1) вторым членом в (2) можно пренебречь, и  $T(r, t)$  будет расти со временем логарифмически. В принципе для вычисления  $a$  достаточно измерения двух значений  $T$  при  $r_1, t_1$  и  $r_2, t_2$ , что обычно и делают в методе горячей проволоки [12,13] с точечными сенсорами температуры. Однако, располагая большим объемом данных о динамике поля температур, величину  $a$  можно получить гораздо более точным способом — путем линейной регрессии функции  $y = d(x + g)$  (рис. 2). Здесь  $d$  — наклон аппроксимирующей прямой,  $g$  — отрезок, отсекаемый ею на оси абсцисс в координатах  $T - \ln(tr^{-2})$ . Тогда в соответствии с выражением (2) искомая величина  $a$  может быть найдена с помощью выражения

$$a = \exp(g + \gamma)/4. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Экспериментальные данные (точки) и их линейные аппроксимации (штриховые линии) при 2D-испытаниях для стали Ст 35 при  $t = 40$  с (1), титанового сплава при  $t = 48$  с (2) и нержавеющей стали при  $t = 48$  с (3).  $g_1$ ,  $g_2$  и  $g_3$  — отрезки, отсекаемые аппроксимирующей прямой на оси абсцисс для стали Ст 35, титанового сплава ОТ4-2 и стали 12Х18Н9Т соответственно.

В результате обработки от 500 до 800 кадров описанным способом для стали Ст 35 получено среднее значение  $a = 13.37 \pm 0.33 \text{ мм}^2/\text{с}$ , среднеквадратическое отклонение составило всего  $\pm 2.5\%$ . (см. таблицу). Оно хорошо согласуется со значением, полученным по соотношению  $a^* = \lambda/\rho c_p$  исходя из табличных значений материальных констант для стали Ст 35 (плотность  $\rho = 7796 \text{ кг}/\text{м}^3$ , удельная теплоемкость  $c_p = 462 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda = 48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  [14]). Найденное расчетное значение составило  $a^* = 13.33 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Аналогичные данные получены для нержавеющей стали и титанового сплава (см. таблицу).

Модель цилиндрического фронта накладывает ограничения на толщину образца  $b$ . Снизу оно определяется увеличением роли теплоотвода, характеризуемой от-

ношением энергии, покинувшей пластину посредством теплообмена на поверхностях, к запасенной энергии  $a\tau/c\rho b$  на единице площади пластины, где  $a$  — суммарный коэффициент теплоотдачи (как конвективной, так и радиационной для обеих свободных поверхностей пластины). Увеличение  $b$  приводит к пропорциональному росту необходимой мощности источника тепла для разогрева образца до той же температуры и квадратично большему времени для распространения теплового фронта на минимальное расстояние  $\sim 10b$ , необходимое для получения точности измерения порядка единиц процентов при использовании модели цилиндрического теплового фронта. Максимальный нагрев в области тестирования зависел от плотности потока в пятне нагрева, его радиуса и длительности процедуры измерения. Ни в каких опытах он не превышал нескольких десятков градусов Цельсия, а в области измерения — единиц градусов Цельсия, что позволяет считать метод неразрушающим и относить полученные значения  $a$  к температуре окружающей среды.

Подчеркнем, что в предложенном подходе не требуется знания абсолютных значений температур поверхности и тепловых потоков, поскольку они не входят в формулу (3) для вычисления  $a$ . Достаточно лишь допущения оптической однородности поверхности, а именно постоянства коэффициента испускания.

Итак, в работе предложен новый экспрессный неразрушающий способ определения коэффициента температуропроводности пластинчатых объектов. Экспериментальное тестирование показало, что определенные этим способом значения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности с хорошей точностью совпадают со справочными данными. Описанный подход можно рассматривать как дальнейшее развитие МЛВ. Низкая погрешность при невысоких требованиях к условиям измерений в значительной мере обусловлена возможностями анализа не однократно регистрируемой функции одного аргумента  $T(t)$  в каждом отдельном опыте, как в МЛВ, а большого ансамбля первичных данных

Полученные и справочные значения  $a$  для исследованных материалов

Материал	Измеренные и справочные значения $a$ , $\text{мм}^2/\text{с}$	Номер теста					
		1	2	3	4	5	6
Сталь Ст 35	$a$	12.93	13.14	14.06	11.92	14.09	14.09
	$a_6$	$13.37 \pm 0.33$					
	$a^*$	13.33					
Титановый сплав ОТ4-2	$a$	3.82	3.90	3.73	4.04	4.21	3.65
	$a_6$	$3.89 \pm 0.15$					
	$a^*$	3.81					
Сталь 12Х18Н9Т	$a$	3.68	3.39	3.16	3.60	3.97	3.45
	$a_6$	$3.54 \pm 0.10$					
	$a^*$	3.63					

Примечание. Значения  $a^*$  получены с помощью соотношения  $a^* = \lambda/\rho c_p$  на основании данных, взятых из работы [14].

в виде двухпараметровой матрицы  $T(r, t)$  в каждом кадре, а затем — анализа нескольких сотен кадров.

### Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ТГУ им. Г.Р. Державина.

### Финансирование работы

Разработка методики и портативного прибора для определения ТФХ выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00181), а разработка численных моделей и программного обеспечения — при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-48-680817).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Скворцов Л.А.* Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии. М.: Техносфера, 2017. 220 с.
- [2] Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
- [3] *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2013. 542 с.
- [4] *Hammerschmidt U., Hameury J., Strnad R., Turzó-Andras E., Wu J.* // Int. J. Thermophys. 2015. V. 36. P. 1530–1544.
- [5] *Yüksel N.* The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials // Insulation materials in context of sustainability / Eds A. Almusaed, A. Almssad. London: InTech, 2016. Ch. 6. P. 113–140.
- [6] *Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.* // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. P. 1679–1684.
- [7] ISO 22007-4:2017. Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Pt 4. Laser flash method.
- [8] ISO 18755:2005. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method.
- [9] ASTM E1461-13. Standard test method for thermal diffusivity by the flash method.
- [10] *Kruczek T., Adamczyk W.P., Bialecki R.A.* // Int. J. Thermophys. 2013. V. 34. P. 467–485.
- [11] *Carslaw H.C., Jaeger J.C.* Conduction of heat in solids. Oxford University Press, 1959. 510 p.
- [12] *Assael M.J., Antoniadis K.D., William A.* // Int. J. Thermophys. 2010. V. 31. P. 1051–1072.
- [13] *Guo W., Li G., Zheng Y., Dong C.* // Thermochim. Acta. 2018. V. 661. P. 84–97.
- [14] *Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф.* Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наук. думка, 1985. 438 с.