

УДК 536.2.023

## Измерение температуропроводности полимерных материалов

Веснин Владимир Романович

vesninvr@bmstu.ru

Гембар Максим Игоревич<sup>(\*)</sup>

gem@student.bmstu.ru

Данилов Вадим Максимович

danilovad@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена экспериментальному исследованию температуропроводности полимерных материалов: полиамида 6, поливинилхлорида, полиэтилена, полиуретана, фторопласта-4, полипропилена, полиоксиметилена и поликарбоната. Исследование проводилось методом световой вспышки, который обладает высокой точностью измерений и является наиболее распространенным на сегодняшний день. В процессе работы были определены значения температуропроводности полимеров при комнатной температуре. Полученные данные значимы для моделирования процесса абляции полимеров и могут использоваться для расчета теплопроводности при известных плотности и изобарной теплоемкости.

**Ключевые слова:** полимеры, теплофизические свойства, температуропроводность, метод световой вспышки, абляция

## Polymers thermal diffusivity measurement

Vesnin Vladimir Romanovich

vesninvr@bmstu.ru

Gembar Maksim Igorevich

gem@student.bmstu.ru

Danilov Vadim Maksimovich

danilovad@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** This work is devoted to the experimental measurement of the polymer materials thermal diffusivity: polyamide 6, polyvinyl chloride, polyethylene, polyurethane, polytetrafluoroethylene, polypropylene, polyoxymethylene and polycarbonate. The work was carried out using the light flash method, which has high measurement accuracy and is the most common method today. During the work, the values of the thermal diffusivity of polymers at room temperature were determined. The data obtained is significant in modeling the polymers ablation process and can be used to calculate thermal conductivity at known densities and heat capacities.

**Keywords:** polymers, thermophysical properties, thermal diffusivity, light flash analysis, ablation

**Введение.** В настоящее время одним из самых популярных классов конструкционных материалов являются полимеры, их используют в машиностроении, строительстве, медицине, пищевой промышленности и в других отраслях. Явление абляции полимерных материалов представляет интерес для промышленности с точки зрения лазерной резки, литографии, нанесения

тонких покрытий и иных технологических процессов. Однако несмотря на то, что абляция полимеров достаточно широко распространена в инженерной практике, она остается малоизученной и плохо поддается моделированию ввиду своей сложности и многопараметричности. В лаборатории УЦ ФЭ, на базе которой выполнялась работа, абляция активно изучается, но для ее описания требуются знания о теплофизических свойствах полимерных материалов. Свойства полимеров определяются не только составом, но и условиями изготовления и хранения. По этой причине характеристики полимерных материалов различаются в зависимости от конкретной партии, а заявленные производителем параметры не всегда точны. С другой стороны, базы данных теплофизических свойств содержат информацию не о всех полимерах из-за их разнообразия. Цель работы: провести исследование температуропроводности ряда полимерных материалов.

**Материалы и методы.** Определение температуропроводности полимеров проводилось методом световой вспышки (анг. Light Flash Analysis (LFA)). В качестве экспериментальной установки применялась LFA500 от компании Linseis. Предварительно для проведения измерений были подготовлены цилиндрические образцы диаметром от 11 до 12 мм и толщиной от 1 до 2 мм из полимерных стержней. На поверхность образцов наносился тонкий слой графита при помощи графитового аэрозоля для обеспечения равномерного поглощения энергии импульса электромагнитного (ЭМ) излучения и защиты инфракрасного (ИК) детектора в LFA500 от прямого ЭМ излучения в случае прозрачного образца (рис. 1). Исследования проводились для полиамида 6 (ПА6), поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилена низкой плотности (ПЭ) и низкого давления (ПЭНД), полиуретана (ПУ), политетрафторэтилена (ПТФЭ), полипропилена (ПП), полиоксиметилена гомополимерного (ПОМ-Н) и сополимерного (ПОМ-С), поликарбоната (ПК).

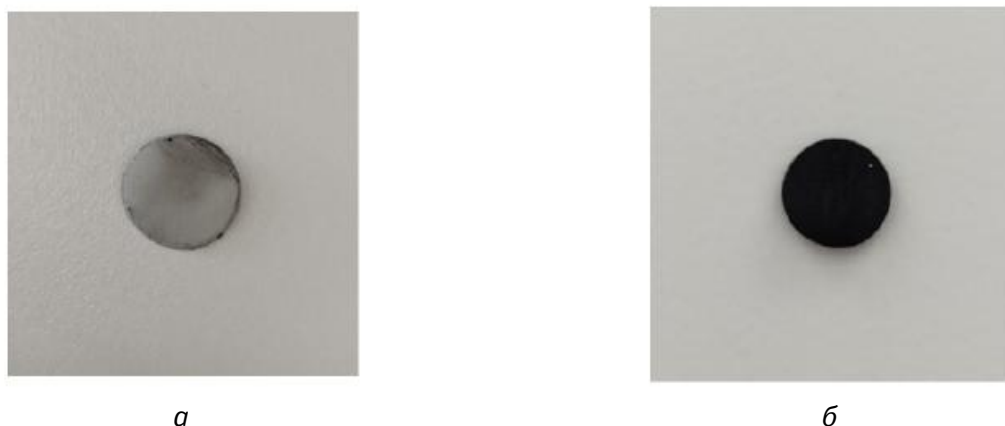


Рис. 1. Внешний вид образца из ПА6 до (а) и после (б) нанесения графита

В ходе измерений температуропроводности полимерных материалов длительность импульса ЭМ излучения составляла  $10^{-3}$  с. Всего было проведено по десять измерений температуропроводности каждого образца. При

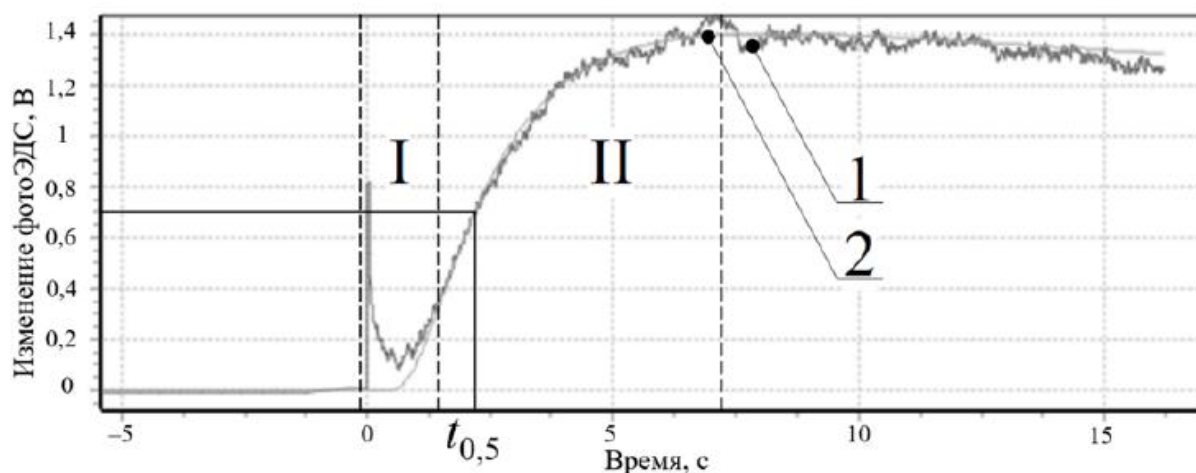
исследовании полимера выдерживалась пауза между измерениями не менее двух минут для достижения состояния теплового равновесия. Перед серией измерений температуропроводности следующего образца пауза составляла не менее двадцати минут для термостатирования.

**Результаты.** Согласно теории, лежащей в основе LFA, расчет температуропроводности можно провести по следующей формуле [1]:

$$\alpha = \frac{1,38L^2}{\pi^2 t_{0,5}} = \frac{0,1398L^2}{t_{0,5}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L$  — толщина образца,  $\text{м}$ ;  $t_{0,5}$  — время, соответствующее полувысоте функции фотоЭДС, сгенерированного ИК-детектором,  $\text{с}$ .

По результатам измерений для каждого образца было получено по десять графиков зависимости фотоЭДС, генерируемого ИК детектором, от времени. После этого было проведено аппроксимирование и сглаживание всех экспериментальных кривых. Затем по полученным данным (рис. 2) определяется  $t_{0,5}$ . Температуропроводность рассчитывалась по формуле (1) исходя из измеренной толщины образца. Итоговое значение температуропроводности полимера определялось как среднее арифметическое всех полученных результатов измерений.



**Рис. 2.** График зависимости фотоЭДС от времени для ПА6:

1 — экспериментальная кривая; 2 — аппроксимированная кривая; участок I — всплеска от импульсной ксеноновой лампы; участок II — рост температуры

Стоит отметить, что пик, расположенный в начале участка I, обусловлен всплеской от импульсной ксеноновой лампы: ИК детектором регистрируется импульс ЭМ излучения. По этой причине на всем участке I могут быть искажены показания прибора. Однако это не критично, поскольку для определения температуропроводности важен только участок II, в котором находится значение  $t_{0,5}$ . Все, что расположено за участком II не представляет интереса для анализа. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты измерений температуропроводности**

| Полимер | Диаметр, мм | Толщина, мм | $T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$ |
|---------|-------------|-------------|---------------------|------------------------------------------|
| ПА6     | 11,6        | 1,90        | 31                  | 2,07                                     |
| ПВХ     | 11,9        | 1,72        | 31                  | 1,86                                     |
| ПЭ      | 11,7        | 1,80        | 30                  | 3,12                                     |
| ПУ      | 11,5        | 2,10*       | 33                  | 1,08                                     |
| ПТФЭ    | 11,3        | 1,00        | 33                  | 1,12                                     |
| ПП      | 11,5        | 1,52        | 28                  | 1,63                                     |
| ПОМ-Н   | 11,7        | 1,52        | 32                  | 2,19                                     |
| ПОМ-С   | 11,6        | 1,67        | 29                  | 1,50                                     |
| ПК      | 11,9        | 1,72        | 30                  | 1,87                                     |
| ПЭНД    | 11,6        | 1,80        | 32                  | 2,64                                     |

*Примечание:* \* — ввиду сложностей, связанных с механической обработкой эластичных полимерных материалов, исследовался образец ПУ толщиной 2,10 мм

**Обсуждение полученных результатов.** Для верификации полученных результатов использовались значения температуропроводности полимеров, найденные в литературе. Данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Литературные данные температуропроводности**

| Полимер | $T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$ | Источник |
|---------|---------------------|------------------------------------------|----------|
| ПВХ     | 20                  | 1,03                                     | [2]      |
| ПЭ      | 30                  | 1,45*                                    | [3]      |
| ПТФЭ    | 30                  | 1,10                                     | [4]      |
| ПП      | 28                  | 1,10                                     | [5]      |
| ПОМ-Н   | 32                  | 2,12                                     | [6]      |
| ПОМ-С   | Нет данных          | 1,90                                     | [7]      |
| ПК      | 27                  | 1,71                                     | [8]      |
| ПЭНД    | 32                  | 2,40                                     | [5]      |

*Примечания:* \* — значение получено в ходе линейной интерполяции [9]. При расчетах использовались данные из работы [3] по температуропроводности полиэтилена при температурах 17 и 45  $^\circ\text{C}$

Измеренные значения температуропроводности большей части полимеров отличаются от литературных данных не более чем на 20 %. В связи с этим методику проведения измерений можно считать корректной. Для ПВХ, ПЭ и ПП отклонения составляют не менее чем 48 %. Поскольку мето-

дика проведения измерений верна, можно сделать вывод о том, что образцы из ПВХ, ПЭ и ПП обладают иными теплофизическими свойствами в отличие от образцов, исследуемых в работах [2, 3, 5]. Для ПАб и ПУ найти значения температуропроводности в источниках не удалось. Отсутствие данных, а также расхождения полученных значений с литературными (в частности, для ПВХ, ПЭ и ПП) лишь подтверждают необходимость самостоятельно измерять свойства полимеров для научных исследований.

**Заключение.** В ходе работы были успешно проведены измерения температуропроводности методом LFA десяти полимерных образцов. Достоверность результатов подтверждена сравнением со справочными данными. Значения температуропроводности полимеров можно использовать при моделировании процесса абляции и для определения теплопроводности при известных плотности и изобарной теплоемкости по следующей зависимости [1]:

$$\lambda(T) = \alpha(T) \cdot C_p(T) \cdot \rho(T), \quad (2)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  $T$  — температура, К;  $C_p$  — изобарная теплоемкость, Дж/К.

В дальнейшем планируется измерить скорость абляции полимеров под действием ультрафиолетового излучения, поскольку предполагается, что она имеет ярко выраженную корреляцию с температуропроводностью. Дополнительно будут проведены измерения изобарной теплоемкости посредством термического анализа и получены значения теплопроводности рассмотренных материалов.

*Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2024-0007.*

## Список источников

- [1] Gschwandl M., Kerschbaumer R.C., Schritteser B., Fuchs P.F. Thermal Conductivity Measurement of Industrial Rubber Compounds using Laser Flash Analysis: Applicability, Comparison and Evaluation. *IP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2065 (1), art. no. 030041. <https://doi.org/10.1063/1.5088299>
- [2] Maksimov R., Ivanova T., Zicans J., Negreeva S. Thermal and elastic properties of polyvinyl chloride (PVC) + chlorinated polyethylene (CPE) blends. *Materials Research Innovation*, 2003, vol. 7 (5), pp. 326–330. <https://doi.org/10.1007/s10019-003-0272-0>
- [3] Zhang X., Hendro W., Fujii M., Tomimura T. Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Polymer Melts with the Short-Hot-Wire. *Int. J. Thermophys.*, 2002, vol. 23, pp. 1077–1090. <https://doi.org/10.1023/A:1016394104244>
- [4] Agari Y., Ueda A., Nagai S. Measurement of thermal diffusivity and specific heat capacity of polymers by laser flash method. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, 1995, vol. 33, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1002/polb.1995.090330104>
- [5] Santos W. Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques. *Polymer Testing*, 2007, vol. 26, pp. 556–566. <https://doi.org/10.1016/J.polymertesting.2007.02.005>

- 
- [6] Chen F., Poon Y., Choy C. Thermal diffusivity of polymers by the flash method. *Polymer*, 1977, vol. 18, pp. 129–136. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(77\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0032-3861(77)90027-1)
  - [7] Zhao X., Ye L. Study on the thermal conductive polyoxymethylene/graphite composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009, vol. 111, pp. 759–767. <https://doi.org/10.1002/app.29065>
  - [8] Suleiman B. Thermal Conductivity and Diffusivity of Polymers. *International Journal of Physics: Study and Research*, 2018, vol. 1 (1), pp. 54–58. <https://doi.org/10.18689/ijpsr-1000107>
  - [9] Pagliarini G., Piva S. Thermal Property Estimation by Comparison between Experimental Results and Analytical or Numerical Solutions. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 1993, vol. 4, pp. 1–10. <https://doi.org/10.2495/cm930301>