

DOI 10.36074/logos-19.12.2025.020

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вірич Світлана Олександрівна¹, Камчатний Ростислав Вячеславович²

1. канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри прикладної механіки
Донецький національний технічний університет, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0003-4734-345

2. магістр кафедри прикладної механіки
Донецький національний технічний університет, УКРАЇНА

Основою отримання газифікованих моделей є теплова обробка гранул полістиролу гарячою водою або паром. Слабка інтенсивність фільтрації пари через гранули полістиролу, що швидко розширюються, навіть за наявності хорошої вентиляції, не може забезпечити безперервної та тривалої подачі тепла в усі периферійні порожнини прес-форми. Тому основний розігрів і спінювання гранул відбувається головним чином за рахунок тепла перших порцій пари. У зв'язку з цим необхідно створити умови максимально ефективної тепловіддачі від пари до гранул полістиролу, а не до самої оснастки. Для цього необхідно забезпечити швидкий прогрів поверхневого шару робочої частини оснастки при малому теплопоглинанні її внутрішніх шарів. Зазначеним умовам повною мірою відповідають металеві прес-форми, які в даний час використовують для отримання газифікованих моделей.

Поліуретани мають дуже низьку теплопровідність (0,01–0,6 Вт/(м·°C)) і досить високу теплоємність (близько 2000 Дж/(кг·°C)). Іншими словами, вони погано проводять тепло і дуже довго нагріваються. Оскільки теплофізичні властивості поліуретану не повною мірою відповідають вимогам технології виготовлення газифікованих моделей, то для їх поліпшення прийнято рішення модифікувати поліуретан на стадії його приготування добавками алюмінію, заліза, графіту, міді, здатними впливати на його теплофізичні властивості.

В цій статті, представлені результати досліджень основних теплофізичних характеристик полімерних матеріалів, в тому числі модифікованих зазначеними вище добавками, для виготовлення елементів оснастки.

В основу методики досліджень визначення теплофізичних властивостей покладено відомий метод за допомогою виключення змінних.

Основними величинами, що характеризують теплофізичні властивості матеріалу, є коефіцієнти теплопровідності $\lambda_{обр}$ і питомої теплоємності $C_{обр}$. Знаючи їх і густину досліджуваного матеріалу $\rho_{обр}$, можна визначити коефіцієнт теплової активності $b_{обр}$

$$b_{обр} = \sqrt{\lambda_{обр} \cdot C_{обр} \cdot \rho_{обр}}$$

і температуропровідність $a_{обр}$

$$a_{обр} = \frac{\lambda_{обр}}{C_{обр} \cdot \rho_{обр}}$$

Для проведення досліджень з вихідного поліуретану, а також поліуретану з добавками алюмінію, заліза, вуглецю, міді, виготовляли образки (рис. 1) у вигляді невеликих плиток розмірами 70x70, товщиною 25 мм, які поміщали в експериментальну комірку спеціальної конструкції (рис. 3.2). Товщина образка в 25 мм обумовлена економічною доцільністю та ергономічністю виготовлення прес-форм з товщиною стінки не більше 15–25 мм.

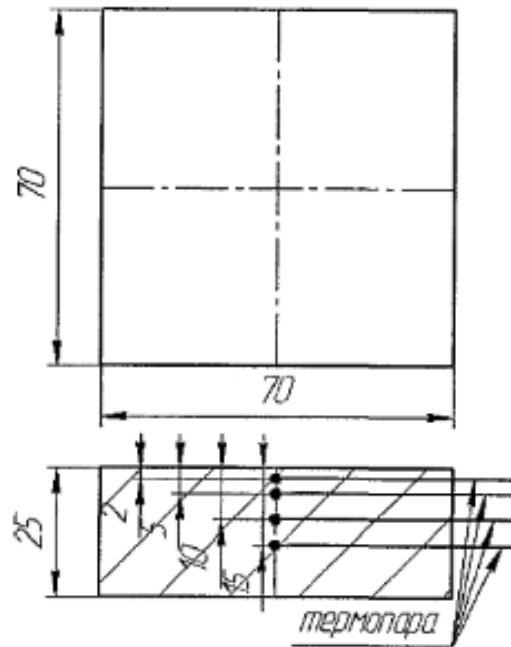


Рис. 1. Досліджуваний зразок

Основу експериментальної комірки (рис. 3.2) становить корпус, набраний з азбестоцементних плит товщиною 25 мм, скріплених металевими



SEZIONE 10.

MECCANICA GENERALE E INGEGNERIA MECCANICA

шпильками і гайками. У бічній частині виконані спеціальні отвори під термопари. Температуру образка, що імітує стінку прес-форми ЛГМ, вимірювали термопарами, розташованими в його центрі, в ізотермічних площинках, тобто в площинках, розташованих в площині поверхні нагрівача, на відстані 2, 5, 10, 15 мм. Випробовуваний образец зі встановленими термопарами (рис. 3.1) поміщали в робочий простір корпусу і потім на нього укладали заздалегідь рівномірно прогрітий до температури 120°C зливоч розмiром 70x70 мм, товщиною 25 мм із вмонтованою в нього термопарою. Даний зливоч з відомими теплофізичними властивостями в експерименті імітував процес подачі пари через інжектор при виготовленні газифікованих моделей методом внутрішнього теплового удару.

Для зниження впливу теплових опорів на результат експерименту в зазорі між нагрітим зливком і образком, а також між гарячими спаями термопар і контрольованими тілами всі поверхні контакту обробляли кремнійорганічною теплопровідною фарбою (пастою) КПТ-8. Експеримент проводили до тих пір, поки показання термопари, розташованої на відстані 15 мм від поверхні контакту, не почнуть відрізнятися від початкових, тобто до початку прогріву досліджуваного матеріалу на глибину 15 мм. Розмір 15 мм відповідає середньостатистичній товщині стінки металевих прес-форм ЛГМ. В експерименті використовували ХА термопари з діаметром електродів 0,5 мм, підключені до ПК через контролер Omron S8FS-C01505CD і нормуючий перетворювач температури НРТ 1,2А, з діапазоном вимірювання 0–200°C.

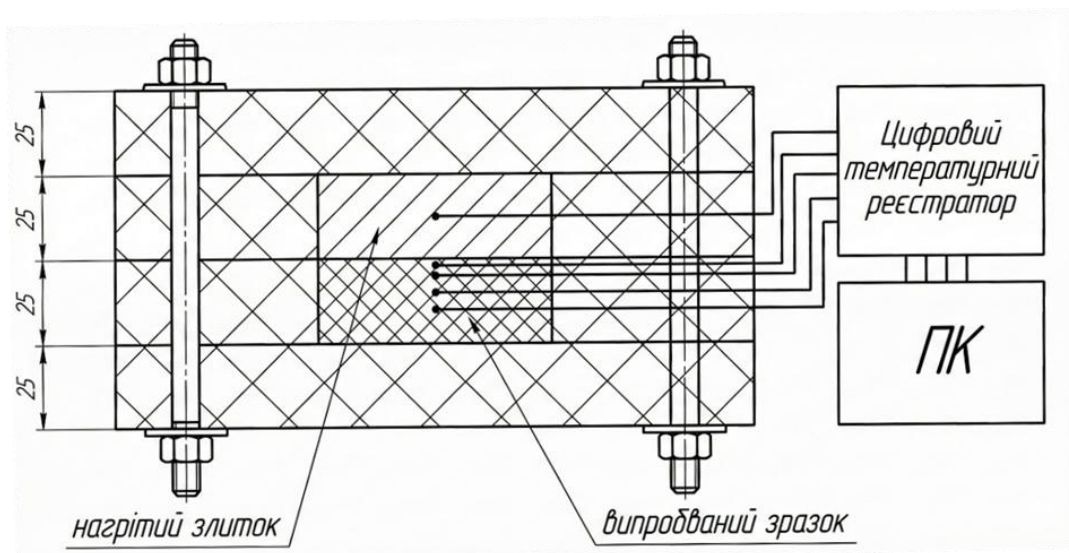


Рис. 2. **Експериментальна установка для визначення теплофізичних властивостей досліджуваних зразків**

Показання термопару в вигляді графіків температурних полів фіксували на персональному комп'ютері і потім обробляли.

В ході досліджень було виконано по 10 замірів для кожного значення. Отримані результати були піддані статистичній обробці. Розглянемо принцип обчислення цих параметрів на прикладі розрахунків на теплоємність поліуретанового компаунда АДВ 13-2. Для визначення середнього значення теплоємності, величини квадратичного відхилення зводимо дані в таблицю 1.

Розрахуємо середнє арифметичне цих даних за формулою:

$$C_{\text{пр}} = \frac{\sum C_i}{n},$$

де C_i — значення i -го вимірювання; n — число вимірювань (обсяг вибірки).

$$C_{\text{пр}} = \frac{2086 + 2075 + 2081 + 2093 + 2088 + 2097 + 2080 + 2077 + 2089 + 2095}{10} = 2086,1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$$

Таблиця 1

Статистична обробка результатів експерименту

№ з/п	C_i , Дж/(кг · °C)	$C_i - C_{\text{ср}}$, Дж/(кг · °C)	$(C_i - C_{\text{ср}})^2$, Дж/(кг · °C)
1	2086	-0,1	0,01
2	2075	-11,1	123,21
3	2081	-5,1	26,01
4	2093	6,9	47,61
5	2088	1,9	3,61
6	2097	10,9	118,81
7	2080	-6,1	37,21
8	2077	-9,1	82,81
9	2089	2,9	8,41
10	2095	8,9	79,21

Відхилення від середнього значення $C_i - C_{\text{ср}}$ і квадрати отриманих відхилень $(C_i - C_{\text{ср}})^2$ представлені в таблиці 3.1.

Середнє квадратичне відхилення розраховували за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (C_i - C_{\text{ср}})^2}{n - 1}}; \sigma = \sqrt{\frac{526,9}{10 - 1}} = 7, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$$

Виключення грубих помилок здійснювали за допомогою правила «трьох сигм».

Для цього знаходили максимальне відхилення отриманих експериментальних значень від середньої величини: $|C_i - C_{\text{ср}}| = 11,1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ і порівнювали зі значенням $3\sigma = 3 \cdot 7,6 = 22,9 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$, $11,1 < 3\sigma = 22,9$, отже, грубої помилки в проведеної серії дослідів немає.



SEZIONE 10.

MECCANICA GENERALE E INGEGNERIA MECCANICA

Точність оцінки вимірювань (довірчу оцінку) визначали за формулою

$$\varepsilon = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}},$$

де t — значення критерію Стюдента при певній надійності оцінки вимірювання P і числі ступенів свободи $k = n - 1$. Критерій Стюдента при надійності вимірювань 95% становить $t=2,82$.

$$\varepsilon = \frac{2.85 \cdot 7.6}{\sqrt{10}} = 6,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}),$$

Знаходимо межі довірчого інтервалу

$$C_H = C_{cp} - \varepsilon; C_B = C_{cp} + \varepsilon;$$

$$C_H = 2086,1 - 6,7 = 2079,4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$C_B = 2086,1 + 6,7 = 2092,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

Аналогічним чином визначали довірчі інтервали для всіх експериментальних досліджень.

Висновки. Результати проведеного аналізу достовірності показали, що надійність вимірювання значень при дослідженні теплоємності, теплопровідності, теплоакумуючої здатності та температуропровідності поліуретанового компаунда АДВ 13-2 з добавками міді, вуглецю, алюмінію, заліза становить 95%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Берчук, Д. М., & Савеленко, О. К. (2019). Підвищення експлуатаційних характеристик ливарного оснащення з полімерних композиційних матеріалів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, (3), 15–22
- [2] Яковлев, А. П., & Руденко, О. В. (2018). Теплофізичні властивості полімерних композиційних матеріалів з металевими наповнювачами для ливарного оснащення. *Фізика і хімія твердого тіла*, 19(2), 210–216.
- [3] Xu, Y., & Mielewski, D. F. (2015). Sustainable polyurethane composites with recycled metal fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(4), 41356.