



УКРАЇНА

(19) UA (11) 55165 (13) U  
(51) МПК (2009)  
G01N 33/36

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМКОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ СЕНСОРАМИ

1

2

(21) u201005728

(22) 12.05.2010

(24) 10.12.2010

(46) 10.12.2010, Бюл. № 23, 2010 р.

(72) ПОЛЬКА ТЕТЯНА ОЛЕКСІЇВНА, КОЛОСНІЧЕНКО МАРИНА ВІКТОРІВНА, СКРИПНИК ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ, КОСТЕНКО НАТАЛІЯ ІГОРІВНА

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Спосіб визначення теплоємності текстильних матеріалів термоелектричними сенсорами, який полягає в приведенні робочого кінця термопари в тепловий контакт з матеріалом, що досліджується, вимірюванні термоЕДС на вільних кінцях термопари, монотонному нагріванні матеріалу, що досліджується, охолодженні та вимірюванні двох значень термоЕДС в процесі охолодження матеріалу, що досліджується, та визначенні його теплоємності, який **відрізняється** тим, що монотонне нагрівання матеріалу, який досліджується, здійснюють пропусканням через термопару змінного струму, збільшують струм до досягнення температури нагрівання на 35-40 °С вище температури навколишнього середовища, вимірюють встановлений струм нагрівання та напругу нагрітої термопари, при охолодженні матеріалу, що досліджується, вимірюють напругу термопари при двох значеннях

термоЕДС, розділених заданим часовим інтервалом, а питому теплоємність матеріалу, що досліджується, визначають з виразу:

$$C_p = \frac{I_H^2 R}{2gF_e(T_c - T_o)} \cdot \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot \frac{\Delta t_{ox}}{\ln \left[ \frac{U_3(t_1) - U_1}{U_3(t_2) - U_1} \right]},$$

де  $I_H$  - змінний струм нагрівання;

$R$  - опір електродів термопари;

$g$  - поверхнева густина матеріалу;

$F_e$  - ефективна площа матеріалу, який нагрівається;

$T_c$  і  $T_o$  - температура навколишнього середовища та вільних кінців термопари;

$U_1$  - напруга термопари при початковій температурі матеріалу;

$U_2$  - напруга нагрітої термопари;

$\Delta t_{ox}$  - заданий часовий інтервал охолодження;

$U_3(t_1)$  і  $U_3(t_2)$  - напруга термопари в процесі її охолодження на початку і кінці встановленого інтервалу  $\Delta t_{ox}$ .

Корисна модель належить до області оцінки фізичних властивостей текстильних матеріалів та може бути використана для визначення теплоємності матеріалів термоелектричними сенсорами.

Однією з важливих теплових характеристик текстильних матеріалів є теплоємність, яка визначає здатність матеріалу акумулювати теплову енергію при різних процесах, які супроводжуються підведенням або відведенням тепла. Теплоємність також характеризує теплову інерцію матеріалу і визначає цю поведінку при різких змінах температури, що є важливим фактором для оцінки захисних властивостей текстильних виробів в екстремальних умовах (пожежі, вибухи та різного виду опромінення). Для фіксації температурних змін всередині та на поверхні текстильних матеріалів

широко використовуються термоелектричні сенсори (термопари), які завдяки своїй голкоподібній формі легко проникають в глибину матеріалу.

Відомий спосіб визначення теплоємності термоелектричними сенсорами [Авт.св. СРСР №1693547, МПК G01N33/04, 1991р.], що полягає в приведенні робочого кінця термопари в тепловий контакт з матеріалом, який досліджується, вимірюванні термоЕДС на вільних кінцях термопари, монотонному нагріванні матеріалу електричним струмом до температури вище температури навколишнього середовища, вимиканні електричного струму, вимірюванні часового інтервалу між двома спадаючими значеннями термоЕДС, що вимірюються, та визначенні теплоємності матеріалу за допомогою математичного виразу.

(13) U

(11) 55165

(19) UA

У математичний вираз, який пов'язує шукану теплоємність з величинами, які вимірюються, входить також коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище. Значення коефіцієнта тепловіддачі складно стабілізувати або точно виміряти. Тому цьому способу властива велика похибка у визначенні теплоємності матеріалу.

Відомий спосіб визначення питомої теплоємності текстильних матеріалів, при якому здійснюють порівняльні виміри темпа охолодження матеріалу, що досліджується, та еталону [Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества: Справочник / Гущина К.Г., Беляева С.А., Командрикова Е.Я. и др. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - с. 246-250]. Цей спосіб полягає в заповненні крихтами матеріалу, який досліджується, циліндричної ємкості, підвішуванні її в камері спокійного повітря, розміщенні робочого кінця термопар в крихті матеріалу та вимірюванні різниці температур між матеріалом, який досліджується, та стінкою камери спокійного повітря, поступовому охолодженні матеріалу з фіксацією темпа охолодження. Аналогічні операції виконуються з еталоном у вигляді металевого циліндру, який має такі самі розміри, як циліндрична ємкість з матеріалом, який досліджується, виготовленого з металу з відомою теплоємністю. Питому теплоємність матеріалу, який досліджується, розраховують за формулою з урахуванням темпів охолодження циліндру з подрібненим матеріалом та металевого циліндру - еталону.

Проте, цей спосіб потребує подрібнення текстильного матеріалу, тривалого часу вимірів та знання коефіцієнта теплопровідності матеріалу, який досліджується, що в свою чергу залежить від об'ємної маси матеріалу. Тому відомий спосіб мало придатний для швидкого експрес - аналізу складу та властивостей текстильних матеріалів.

Відомий також спосіб визначення теплоємності текстильних матеріалів термоелектричними сенсорами [Патент України № 23640А, МПК G01N33/00, 1998р.], полягає в приведенні робочого кінця термопар в тепловий контакт з матеріалом, що досліджується, вимірюванні термоЕДС на вільних кінцях термопар, монотонному нагріванні матеріалу, що досліджується, відключенні джерела нагрівання, поступовому охолодженні матеріалу з фіксацією темпа охолодження та визначенні теплоємності матеріалу, що досліджується.

Монотонне нагрівання у відомому способі здійснюють пропусканням через робочий кінець термопар постійного струму, зміною напрямку протікання струму через робочий кінець та охолодженням термопар протягом часу, який дорівнює тепловій постійній зразка матеріалу, та визначенні питомої теплоємності матеріалу  $C_p$  з виразу:

$$C_p = \frac{2\Pi\P}{M(T_c - T_0)} \frac{N_1}{N_2 - N_3} \Delta t_{\text{нагр}},$$

де  $\Pi$  - коефіцієнт Пельтьє робочого кінця термопар;

$I$  - струм, який пропускають через термопару;

$M$  - маса матеріалу, який досліджується;

$T_c$  - температура навколишнього середовища;

$T_0$  - температура вільних кінців термопар;

$N_1, N_2, N_3$  - виміряні значення термоЕДС термопар при початковій температурі, додатковому нагріванні та охолодженні термопар;

$\Delta t_{\text{нагр}}$  - час нагрівання матеріалу від навколишнього середовища при відключенні струму.

Аналіз розрахункової формули показує, що результат визначається значенням коефіцієнта Пельтьє, який залежить як від температури нагріву, так і від температури охолодження. Тому його точне значення не відоме. Процес вимірювання тривалий, так як спочатку необхідне монотонне нагрівання, потім монотонне охолодження і потім знову нагрівання від навколишнього середовища. Переривання струму через термопару, що необхідно для вимірювання термоЕДС нагрітої та охолодженої термопар, викликає велику похибку через швидке розсмоктування теплоти Пельтьє, яка виділяється або поглинається лише в контактному шарі робочого кінця термопар. Мале значення коефіцієнту Пельтьє для металевих термопар не дозволяє охолодити матеріал, який досліджується, більше ніж на декілька градусів, і отже, забезпечити достатньо точне вимірювання часового інтервалу, який дорівнює тепловій постійній термопар.

В основу корисної моделі покладена задача створити такий спосіб визначення теплоємності текстильних матеріалів термоелектричними сенсорами, в якому введенням нових операцій, забезпечилося б підвищення точності визначення значення теплоємності текстильних матеріалів та зменшення часу випробувань.

Поставлена задача вирішується тим, що в спосіб визначення теплоємності текстильних матеріалів термоелектричними сенсорами, заснований на приведенні робочого кінця термопар в тепловий контакт з матеріалом, що досліджується, вимірюванні термоЕДС на вільних кінцях термопар, монотонному нагріванні матеріалу, що досліджується, охолодженні та вимірюванні двох значень термоЕДС в процесі охолодження матеріалу, що досліджується, та визначенні його теплоємності, який відрізняється тим, що згідно корисної моделі, монотонне нагрівання матеріалу, який досліджується, здійснюють пропусканням через термопару змінного струму, збільшують струм до досягнення температури нагрівання на 35-40 °С вище температури навколишнього середовища, вимірюють встановлений струм нагрівання та напругу нагрітої термопар, при охолодженні матеріалу, що досліджується, вимірюють напругу термопар при двох значеннях термоЕДС, розділених заданим часовим інтервалом, а питому теплоємність матеріалу, що досліджується, визначають з виразу:

$$C_p = \frac{I_h^2 R}{2gF_e(T_c - T_0)} \cdot \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot \frac{\Delta t_{\text{ох}}}{\ln \left[ \frac{U_3(t_1) - U_1}{U_3(t_2) - U_1} \right]},$$

де  $I_h$  - змінний струм нагрівання;

$R$  - опір електродів термопар;

$g$  - поверхнева густина матеріалу;

$F_e$  - ефективна площа матеріалу, який нагрівається.;

$T_c$  і  $T_o$  - температура навколишнього середовища ті вільних кінців термопари;

$U_1$  - напруга термопари при початковій температурі матеріалу;

$U_2$  - напруга нагрітої термопари;

$\Delta t_{ox}$  - заданий часовий інтервал охолодження;

$U_3(t_1)$  і  $U_3(t_2)$  - напруга термопари в процесі її охолодження на початку і кінці встановленого інтервалу  $\Delta t_{ox}$ .

Завдяки введенню операцій з нагрівання матеріалу, який досліджується, пропусканням через термопару змінного струму, збільшенню струму до досягнення температури нагріву на 35-40°C вище температури навколишнього середовища, вимірюванню встановленого струму нагріву та напруги нагрітої термопари, вимірюванню напруги термопари, яка охолоджується, після відключення струму нагріву, при двох її значеннях, розділених заданим часовим інтервалом, в запропонованій двохетапній послідовності вказаних операцій забезпечується нагрівання матеріалу, який досліджується, поблизу робочого кінця термопари із змінним струмом нагріву, який вимірюється, і дозволяє визначити електричну потужність нагрівання, яке розсіюється в навколишнє середовище поверхнею матеріалу, який досліджується, що в свою чергу дозволяє оцінити тепловіддачу нагрітою ділянкою тканини, яка досліджується. Наступне відключення струму, що нагріває, і повільне охолодження матеріалу, який досліджується, разом з термопарою, вимірювання напруги термопари, яка зменшується, при двох значеннях термоЕДС, які відповідають початку та кінцю заданого часового інтервалу, дозволяє оцінити теплову інерційність матеріалу, який досліджується, а отже, і його теплоємність. Запропонована розрахункова формула пов'язує питому теплоємність матеріалу, який досліджується, з вимірюваною напругою термопари та струмом її нагріву, а також з відомими параметрами термопари та масою матеріалу поблизу її робочого кінця, що дає можливість визначити значення теплоємності текстильних матеріалів з підвищеною точністю та меншим часом дослідження.

На кресленні наведена електрична функціональна схема, за допомогою якої здійснюється запропонований спосіб.

До матеріалу 1, який досліджується, торкаються робочим кінцем термопари 2, вільні кінці якої розташовані на клемній колодці 3. Подовжувальними дротами 4 клемна колодка 3 з'єднана з компенсаційною коробкою 5, яка забезпечує постійність температури вільних кінців термопари. Виходи компенсаційної коробки 5 з'єднані через фільтр 6 нижніх частот з входами диференційного підсилювача 7, до виходу якого підключений вольтметр 8. Джерело змінної напруги 9 через змінний резистор 10 і ключ 11 з'єднане з одним кінцем клемної колодки 5 і через амперметр 12 з'єднане з іншим кінцем клемної колодки.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Вимірювання термоЕДС термопари 2 здійснюється в два етапи. Спочатку ключ 11 розмикають, і

показання амперметру 12 дорівнює нулю. Температура матеріалу, який досліджується,  $T_m$  визначається температурою навколишнього середовища  $T_c$ . Температура вільних кінців  $T_o$  термопари менше за температуру навколишнього середовища ( $T_o < T_c$ ) та стабілізується компенсаційною коробкою 5. ТермоЕДС, яка розвивається термопарою 2 при  $T_m = T_c$ ,

$$E_1 = S(T_c - T_o), \quad (1)$$

де  $S$  - чутливість термопари, що визначається коефіцієнтом Зеебека.

ТермоЕДС (1) через фільтр 6 нижніх частот діє на входи диференційного підсилювача 7. Вольтметром 8 вимірюється підсилене значення термоЕДС.

$$U_1 = K_1 K_2 S (T_c - T_o), \quad (2)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт передачі фільтра 6 нижніх частот;

$K_2$  - коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 7.

На другому етапі вимірювань замикають ключ 11 і через термопару 2 пропускають змінний струм. В термоелектродах термопари 2 починає виділятися тепло Джоуля, яке завдяки теплопровідності термоелектродів надходить в робочий кінець термопари та в клемну колодку 4. В останній це тепло розсіюється масивною клемною колодкою, деяке збільшення температури вільних кінців термопари компенсується схемою компенсаційної коробки 5. Інша половина тепла Джоуля надходить в робочий кінець термопари 2 та нагріває матеріал 1, який досліджується, поблизу робочого кінця.

Рівняння теплового балансу робочого кінця термопари 2:

$$C \frac{dT_m}{dt} + \alpha F (T_m - T_c) = 0,5 I^2 R, \quad (3)$$

де  $C$  - повна теплоємність матеріалу, який досліджується, в об'ємі теплового поля робочого кінця;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі матеріалу, який досліджується;

$F$  - площа поверхні теплообміну;

$I$  - діюче значення змінного струму;

$R$  - опір термоелектродів термопари.

Надамо рівняння (3) у вигляді:

$$\tau \frac{dT_m}{dt} + T_m - T_c = \frac{0,5 I^2 R}{\alpha F}, \quad (4)$$

де  $\tau = \frac{C}{\alpha F}$  - тепла постійна часу, яка має

розмірність часу.

Вирішенням рівняння (4) є експоненціальна функція нагрівання.

$$T_m'(t) = T_c + \Delta T_n \left[ 1 - \exp(-t/\tau) \right] \quad (5)$$

де  $\Delta T_n$  - температура нагрівання матеріалу відносно температури навколишнього середовища.

Температуру нагрівання матеріалу  $\Delta T_n$  визначимо із виразу (4) за умови, що  $\frac{dT_m}{dt} = 0$ :

$$\Delta T_n = \frac{0,5 I^2 R}{\alpha F}. \quad (6)$$

Змінний струм  $I$  пропускають через термопару до досягнення значення температури нагрівання, яке встановилося ( $\Delta t \approx 4\tau$ ). При цьому термоЕДС термопари 2 досягає значення:

$$E_2 = S(T_c + \frac{0,5I^2 R}{\alpha F} - T_o), \quad (7)$$

а напруга, яка вимірюється вольтметром,

$$U_2 = K_1 K_2 S(T_c + \frac{0,5I^2 R}{\alpha F} - T_o). \quad (8)$$

Змінний струм збільшують змінним резистором 10 до значення, при якому нагрівання матеріалу 1 здійснюється на 35-40 °С відносно температури навколишнього середовища ( $U_2 / U_1 \geq 2$ ). Вимірюють напругу  $U_2$  при встановленому на амперметрі 12 струмі нагрівання  $I_H$ . Визначають перевищення напруги

$$U_2 - U_1 = K_1 K_2 S \frac{0,5I^2 R}{\alpha F}. \quad (9)$$

Після визначення перевищення напруги (9) розмикають ключ 12, відключають струм нагрівання, і термопара 2 з матеріалом 1 починають охолоджуватись.

Процес охолодження описується експоненціальною функцією виду:

$$T_m''(t) = T_c + \Delta T_H \exp(-t/\tau). \quad (10)$$

Покази вольтметра 8 при цьому почнуть зменшуватися також із експоненціального закону:

$$U_3(t) = K_1 K_2 S [T_c + \Delta T_H \exp(-t/\tau) - T_o]. \quad (11)$$

Визначимо зниження напруги термопари як функцію часу:

$$U_4(t) = U_3(t) - U_1 = K_1 K_2 S \Delta T_H \exp(-t/\tau). \quad (12)$$

Проведемо логарифмування виразу (12):

$$\ln U_4(t) = \ln(K_1 K_2 S \Delta T_H) - t/\tau. \quad (13)$$

Вимірюють вольтметром 8 два спадаючі значення напруги  $U_3(t)$ , розділених заданим часовим інтервалом  $t_2 - t_1$ :

$$U_3(t_1) = K_1 K_2 S [T_c + \Delta T_H \exp(-t_1/\tau) - T_o]. \quad (14)$$

$$U_3(t_2) = K_1 K_2 S [T_c + \Delta T_H \exp(-t_2/\tau) - T_o]. \quad (15)$$

Відповідно виразу (13) визначають логарифми різниць напруг:

$$\ln U_4(t_1) = \ln(K_1 K_2 S \Delta T_H) - t_1/\tau, \quad (16)$$

$$\ln U_4(t_2) = \ln(K_1 K_2 S \Delta T_H) - t_2/\tau. \quad (17)$$

Різниця логарифмів (16) і (17):

$$\ln U_4(t_1) - \ln U_4(t_2) = \frac{t_2 - t_1}{\tau} = \frac{\Delta t_{ox}}{\tau}, \quad (18)$$

де  $\Delta t_{ox}$  - заданий, наприклад, секундоміром час охолодження термопари.

Враховуючи значення теплової постійної  $\tau$  із (4), отримаємо:

$$\ln \frac{U_4(t_1)}{U_4(t_2)} = \frac{\alpha F}{C} \Delta t_{ox}, \quad (19)$$

звідки шукана теплоємність:

$$C = \frac{\alpha F \Delta t_{ox}}{\ln[U_4(t_1)/U_4(t_2)]}. \quad (20)$$

Якщо у вираз (20) підставити добуток  $\alpha F$  із (9), то отримаємо:

$$C = \frac{K_1 K_2 S 0,5I_H^2 R \Delta t_{ox}}{(U_2 - U_1) \ln[U_4(t_1)/U_4(t_2)]}. \quad (21)$$

Добуток коефіцієнтів  $K_1 K_2 S$  можна визначити з виразу (2). Тоді повна теплоємність:

$$C = \frac{I_H^2 R}{2(T_c - T_o)} \cdot \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot \frac{\Delta t_{ox}}{\ln[U_4(t_1)/U_4(t_2)]}. \quad (22)$$

Слід врахувати, що:

$$\ln \frac{U_4(t_1)}{U_4(t_2)} = \ln \frac{U_3(t_1) - U_1}{U_3(t_2) - U_1}. \quad (23)$$

Враховуючи (23) остаточно отримаємо:

$$C = \frac{I_H^2 R}{2(T_c - T_o)} \cdot \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot \frac{\Delta t_{ox}}{\ln \left[ \frac{U_3(t_1) - U_1}{U_3(t_2) - U_2} \right]}, \quad (24)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  - початок і кінець інтервалу охолодження  $\Delta t_{ox}$ .

З виразу (24) видно, що в розрахунковий вираз для повної теплоємності входять виміряні величини: напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3(t_1)$ ,  $U_3(t_2)$  і струм  $I_H$ . Опір термоелектродів  $R$  попередньо вимірюють. Температура середовища  $T_c$  та вільних кінців термопари  $T_o$  також відома. Фільтр 6 нижніх частот повністю розв'язує ланцюг нагрівання термопари змінним струмом і ланцюг вимірювання термоЕДС у вигляді постійної напруги, так як фільтр нижніх частот не пропускає падіння змінної напруги від струму, який протікає по термоелектронах 2, на вольтметр 8.

Питому теплоємність  $C_p$  текстильних матеріалів можна визначити за формулою з врахуванням повної теплоємності із (24):

$$C_p = \frac{C}{g F_e}, \quad (25)$$

де  $g$  - поверхнева густина тканини, г/м<sup>2</sup>;

$F_e$  - ефективна площа накопичення тепла в тканині, м<sup>2</sup>.

Ефективна площа  $F_e$  являє собою площу кола, в центрі якого знаходиться точковий випромінювач - робочий кінець термопари 2. Радіус кола визначається пороговим значенням температурного поля, яке зменшується від центра до периферії. За порогове значення приймають температуру нагріву тканини, яка складає 1 - 2 % від температури центра. В цьому випадку 95 % теплової енергії зосереджено в межах площі кола.

Значення ефективної площі залежить від товщини тканини і її структури. Її можна визначити аналітичне, виходячи з конфігурації температурного поля. Проте, її можна визначити і експериментальне за значенням  $C'_p$ , отриманим для текстильного матеріалу одним з відомих способів:

$$F_e = \frac{C'}{g C'_p}, \quad (26)$$

де  $C'$  - повна теплоємність матеріалу.

В подальшому значенням  $F_e$  можна користуватися при експрес - аналізі текстильних матеріалів за питомою теплоємністю.

Якщо згідно виразу (26) для кожного артикула тканини визначити значення ефективної площі нагріву, то питому теплоємність матеріалу, який

досліджується, при експрес - аналізі можна оцінити з виразу:

$$C = \frac{I_n^2 R}{2gF_e(T_c - T_0)} \cdot \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot \frac{\Delta t_{ox}}{\ln \left[ \frac{U_3(t_1) - U_1}{U_3(t_2) - U_2} \right]}, \quad (27)$$

де  $I_n$  - змінний струм нагрівання;  
 $R$  - опір електродів термопар;  
 $g$  - поверхнева густина матеріалу;  
 $F_e$  - ефективна площа матеріалу, який нагрівається.;  
 $T_c$  і  $T_0$  - температура навколишнього середовища ті вільних кінців термопар;  
 $U_1$  - напруга термопар при початковій температурі матеріалу;  
 $U_2$  - напруга нагрітої термопар;  
 $\Delta t_{ox}$  - заданий часовий інтервал охолодження;

$U_3(t_1)$  і  $U_3(t_2)$  - напруга термопар в процесі її охолодження на початку і кінці встановленого інтервалу  $\Delta t_{ox}$ .

Запропонований спосіб визначення теплоємності текстильних матеріалів в порівнянні із способом - найближчим аналогом підвищення точності визначення теплоємності в заявленому способі досягнуто за рахунок виключення із розрахункової формули змінних і малостабільних параметрів термопар (коефіцієнта Пельтьє, коефіцієнта Зеебека, критерію для визначення часу нагрівання), а також методичних похибок, пов'язаних з необхідністю переривання струму нагрівання на час вимірювання термоЕДС. Зменшення тривалості досліджень обумовлено виключенням операції додаткового охолодження термопар після її нагрівання, відключення нагрівача і охолоджуючого струму на час вимірювання термоЕДС, повторного нагрівання матеріалу від навколишнього середовища.

