

УДК 621.823

О.П. Гук², Б.І. Стадник¹, С.П. Яцишин¹, О.І. Лах², М.М. Процев'ят²¹НУ „Львівська Політехніка”, Україна, Львів²НВО „Термоприлад” ім.В.Лаха, Україна, Львів

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ЕНЕРГОНАПРУЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація

Вивчаються термоелектричні перетворювачі температури для енергонапружених умов, коли практично неможливо здійснити їх перевірку "in situ", а існує непрогнозований дрейф номінальних статичних характеристик.

Abstract

Thermo transducers for heavy energetic branch have been studied. Investigations "in situ" of nominal static performances (drift and restoring) have been especially important, considering the impossibility of pulling them out of controlled objects.

Вступ.

Складність високоточного вимірювання температури за допомогою контактних перетворювачів температури (далі – ПТ), включно з термоелектричними й термочувливими перетворювачами, полягає у тому, що вимірювання з їхньою допомогою необхідно здійснювати у широкому температурному інтервалі, а також часто в умовах енергонапружених об'єктів, які унеможливають їх перевірку.

При цьому переважно нехтують змінами термодинамічного стану як самого матеріалу чутливого елемента (далі – ЧЕ), так і контрольованого середовища, які істотно впливають на номінальні статичні характеристики перетворення (далі – НСХ) ПТ. ЧЕ переводиться у нерівноважний термодинамічний стан. Зворотній перехід далеко не завжди можливий, оскільки реальні нерівноважні процеси передавання енергії мають певну направленість і супроводжуються необоротними явищами, тобто змінами, які не можна усунути протилежно направленними процесами такого самого характеру. Тому НСХ ПТ, у вигляді $T = aU_n$, для термоелектричних ПТ (a – нелінійний коефіцієнт передачі), змінюється, зумовлюючи похибку вимірювання.

Місце праці. Термоелектричні ефекти, на яких ґрунтується робота ПТ, визначаються особливостями протікання вихрових термоелектричних струмів [1]. Формування останніх відображає реальність явищ перенесення потоків заряду та тепла у мікрооб'єктах речовини, що описується на основі енергетично-термодинамічного підходу [2]. Квантово-енергетичні обмеження згаданих явищ перенесення визначають підстави застосування статистичних підходів до розгляду термоелектричних явищ і обґрунтовують виникнення в них шумових ефектів. Особливо це позначається на стабільності НСХ ПТ [3]. Шуми існують завжди й

відображають той факт, що тепло та робота є якісно нерівноцінними формами обміну енергією. Втрати роботи внаслідок необоротності процесів пропорційні зміні ентропії [4]. Для енергетичної оцінки процесів, які відбуваються у матеріалі ЧЕ, можна скористатися узагальненими рівняннями термодинаміки [5; 6].

Використовуючи термодинаміку необоротних процесів із складним математичним апаратом, можна, в окремих випадках [7], визначити вплив складних процесів перенесення речовини за рахунок хемічних і фазових перетворень, ініційованих пластичною деформацією, на зміни НСХ.

Мета праці полягає у визначенні можливостей застосування узагальненого термодинамічного підходу стосовно проблеми стабільності НСХ ПТ, що експлуатуються у складних енергетично-напружених умовах, які включають можливість їх перевірки.

Експериментальна частина. Для термоелектричних ПТ енергетичний підхід є неявним, оскільки основним параметром НСХ є електрична напруга. Проте оцінювання потоків перенесення тепла і заряду та інших перехресних потоків може слугувати базою визначення змін НСХ, а сама ентропія вважається мірою температурної зміни хемічного потенціалу термоелектродних матеріалів, що визначає рівень внутрішніх термометричних шумів.

До прикладу, у вольфрамрениєвих стопів – чутливих елементів високотемпературних ПТ, де перенесення маси за високих температур здійснюється вакансійним шляхом внаслідок виходу вакансій на поверхню, первинно порушена металокерамічна структура ущільнюється, що спостерігається металографічно. На противагу цьому у вольфрамових тілах розжарення, що нагріваються до високих температур шляхом пропускання струму, відбувається "розрихлення" матеріалу внаслідок нагрівання й розвитку пор [8]. Це пояснюється тим, що направленості процесів тепло і масоперенесення, як і потоків ентропії у обох випадках є протилежними.

Для практичної реалізації вищезазначеного було запропоновано вивчити можливість і реалізувати метод стабілізації НСХ кабельних ПТ. В основу методу покладено періодичну дію струмом на термоелектроди ПТ, що можна виконувати без демонтажу ПТ з об'єкту. Термодинамічна сутність зазначеного підходу полягає у зміні на протилежні напрямки поширення радіальних потоків тепло- та масоперенесення у кожному окремому термоелектроді та фіксуванні НСХ (інтегральної термо-ЕРС) на певному сталому рівні, тобто у заданому полі допусків шляхом стабілізації мікропоруватості. При цьому

вимагалося періодично перемикаєи електричне коло термопар у режим відновлення НСХ, яка змінилась за попередній період експлуатації. Для відомих діаметра та питомої електропровідності дротів можна розрахувати тривалість пропускання електричного струму τ_h з виразу:

$$\tau_h = \frac{10C r^2}{I^2 \rho} t_e \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_h}\right)\right], \quad (1)$$

де I — електричний струм; C — коефіцієнт переходу, рівний 0,008...0,016; r — радіус термоелектроду; ρ — питомий електричний опір термоелектродного матеріалу; t_e — тривалість експлуатації термопари до моменту відпалювання струмом; T_e — температура експлуатації; T_h — температура термообробки; E_a — енергія активації дифузійних змін, що визначається переважно матричними атомами, зокрема нікелем.

У результаті, метрологічна надійність ПТ збільшилась у 3...4 рази для ресурсу роботи за температур 1100...1300 К, що свідчить про дифузійний характер зафіксованих змін (табл. 1).

Даний підхід може бути також ефективним для прогнозування змін НСХ ПТ [9]. Змінюючи температурно-часові умови роботи ПТ у межах 1,05...1,15 припустимої температури експлуатації, можна досягнути наступного: а) скоротити тривалість розробки ПТ на підприємствах виробничого циклу; б) підвищити метрологічну надійність виготовлених ПТ в процесі їх експлуатації, дотримуючись приведених умов та режимів.

Для цього достатньо відпалити ПТ за температур, вищих на 5—15% від експлуатаційних на протязі часу, приблизно на порядок меншого за заданий ресурс роботи. Значення, на яке необхідно підвищити температуру відпалювання, при цьому слід визначати з умови забезпечення однакової довжини дифузійного шляху $X = (Dt)^{1/2}$, де $D = D_0 \exp(-aT)$, для умов відпалювання та експлуатації:

$$e^{-aT_1} t_1 = e^{-aT_2} t_2, \quad (2)$$

Тут a — стала, зв'язана з енергією активації; T_p , T_2 — відповідно температура відпалювання й експлуатації; t_p , t_2 — відповідно тривалість відпалювання й експлуатації. Тобто, за період часу t_2 значення нестабільності інтегральної термо-ЕРС за температури T_2 є тотожним нестабільності інтегральної термо-ЕРС

матеріалу, який експлуатувався протягом часу t_1 за температури T_1 .

Теоретична частина. У межах класичної термодинаміки ($dS \rightarrow 0$) загальний вираз реологічного рівняння стану ґрунтується на теорії деформування Вайсенберга. Сума змін роботи зовнішніх сил A , вільної енергії F та дисипованого тепла Q_{dis} системи за одиницю часу прямує до нуля (взагалі робота зовнішніх сил A виражається добутком механічних напружень σ на швидкість деформування

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \Big): \frac{dF(\sigma; \varepsilon)}{dt} + \frac{dQ_{dis}(\varepsilon; d\varepsilon/dt; \sigma; d\sigma/dt)}{dt} = \frac{dA}{dt}$$

У найпростішому випадку, коли на матеріал ЧЕ не діють зовнішні сили або коли останні є незначними ($\frac{dA}{dt} \rightarrow 0$), можна вивчати проблеми надійності ПТ, у тому числі метрологічної надійності, шляхом співставлення змін вільної енергії з процесом розсіювання тепла.

Коли у даному рівнянні зміни вільної енергії матеріалу виразити через зміни основного параметра передавальної функції Z — напруги ПТ, то останнє рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{dF}{d\sigma} \Big/ \frac{dZ}{d\sigma} \frac{dZ}{dt} + \frac{dQ_{dis}(\varepsilon; d\varepsilon/dt; \sigma; d\sigma/dt)}{dt} = 0 \quad (3)$$

Зміни вільної енергії та зміни НСХ (за модулем) не залежать від того, поглинається тепло чи виділяється, що

описується $C \left(\frac{dZ}{dt} \right) = \left| \frac{dQ_{dis}}{dt} \right|$, де C — стала. У разі поглинання тепла модуль береться зі знаком "+", а в разі виділення тепла — зі знаком "-", так що в цілому можна отримати:

$$\left(\frac{dZ}{dt} \right)_+ + \left(\frac{dZ}{dt} \right)_- = 0, \quad (4)$$

Звідки, за однакових термодинамічних параметрів температури і тиску зміни НСХ ПТ у часі — протилежні за знаком для виділення та поглинання тепла. Регулюючи потужність виділення або поглинання енергії у вигляді тепла, можна цілеспрямовано впливати на службові характеристики ПТ і стабілізувати їх на певному заздалегідь заданому рівні, що підтверджено експериментально.

Таблиця 1
Температурно-часові особливості експлуатації ПТ, стабілізованих за пропонуваним методом

Характеристика ПТ	Температура, К	Тривалість, год
ХА	1100	0...0,05 t_{pec1} через кожні 100 год. нагрівання струмом на протязі 10 год. до перегрівання гарячого з'льоту на 30–40 К
	1200	0...0,05 t_{pec2} через кожні 100 год. нагрівання струмом на протязі 10 год. до перегрівання гарячого з'льоту на 30–40 К
	1300	0...0,05 t_{pec3} через кожні 100 год. нагрівання струмом на протязі 10 год. до перегрівання гарячого з'льоту на 30–40 К

За вищої інтенсивності дії зовнішніх сил на термометричний матеріал шляхи дисипації енергії й відповідно зміни НСХ в обох вище викладених випадках суттєво відрізнятимуться. Цим можна скористатися як у експериментальних дослідженнях, так і в умовах експлуатації.

У вихідному стані матеріали ЧЕ переважно однорідні; термоелектроди характеризуються однаковим термодинамічним станом по довжині. Переміщуючи їх у енергетичне поле (температурне, силове, електричне, звукове, радіаційне тощо), тобто в області з наявним просторовим градієнтом одного або декількох термодинамічних потенціалів, виводимо певні ділянки термометричного матеріалу з локального енергетичного мінімуму. Специфічність різних матеріалів ЧЕ і залежність їх від передісторії визначають ефективність дії зовнішніх полів і параметри дисипації набутої матеріалами енергії. Базуючись на вище викладених аспектах, можна визначати і обговорювати у кожному конкретному випадку дестабілізуючий чи, навпаки, стабілізуючий характер впливу певних факторів на НСХ ПТ.

Шляхи досягнення даної мети забезпечуються:

- відтворюваністю технології виготовлення матеріалів ЧЕ, що неможливе без вивчення впливу низки технологічних факторів на зміни їх металофізичного, структурного та термодинамічного станів [10];
- попереднім вивченням умов експлуатації чутливих елементів і створенням наперед розрахованого розподілу термодинамічного стану вздовж ПТ;
- регулярним вивченням указанного розподілу з допомогою імпульсного або інших методів в процесі експлуатації ПТ [11];
- розробкою різноманітних видів перехресних методів коригування та направленої зміни розподілу термодинамічного стану самих термометричних матеріалів.

Висновки

Виявлення ефективних методів дії на матеріали полягає на вивченні перехресних термодинамічних ефектів, особливо тих, які включають механічну складову основного рівняння термодинаміки. У останньому випадку слід враховувати всі обставини пружно-пластичного деформування матеріалу з його механічними, термічними і фізико-хімічними особливостями.

Так, завдяки перехресному ефекту та проявленню його ефективного впливу на провідні характеристики конструктивних елементів ПТ вдалося досягти підвищення надійності матеріалів за високих температур [12]. На об'єктах з циклічною багаторазовою зміною температури рекомендовано впровадження спеціальних режимів виходу

на максимальну температуру експлуатації, що дозволило за рахунок істотного зменшення рівня механічних напружень термоструктурного походження істотно зменшити дрейф НСХ та підвищити надійність ПТ.

Література

1. *Лусте О.Я.* Фізика вихрових термоелементів і вимірювальних приладів на їх основі. Автореферат дис. докт.фіз.-мат.наук. – Чернівці. – 2003. – 40 с.
2. *Постников В.С.* Фізика і хімія твердого состояния. – Москва: Металлургия. – 1978. – 544 с.
3. *Домінюк Т.І., Яцишин С.П.* До вивчення можливості термодинамічного врахування впливу механічних напружень і деформацій на термо-ерс. // Вимірювальна техніка і метрологія. 2002. – № 59. – С. 66–69.
4. *Исаев С.И.* Курс химической термодинамики. – Москва: Машиностроение. – 1975. – 256 с.
5. *Новиков И.И.* Термодинамические аспекты пластического деформирования и разрушения металлов // Физико-механические и теплофизические свойства металлов. – Москва: Наука. – 1976. – С. 176–179.
6. *Скоруход В.В.* Реологические основы теории спекания. – Киев. – Наукова думка. – 1972. – 191 с.
7. *Стадник Б.І., Яцишин С.П., Домінюк Т.І.* Вплив хемічних і механічних шумів на метрологічні характеристики первинних перетворювачів температури. // Вимірювальна техніка і метрологія. – 2003. – № 62. – С. 59–64.
8. *Лахоцкий Т.В., Литвинов В.С., Пасычнюк О.В.* и др. Влияние дефектности проволоки на долговечность тела накала // Светотехника. – 1984. – № 8. – С. 14–15.
9. *Бардыла В.И., Гук А.П., Копаницкий М.В.* Диагностика термоэлектрических преобразователей без демонтажа и измерение температуры при длительных дестабилизирующих воздействиях // Тезисы докладов 1-ой Всероссийской конф-ии по проблемам термометрии. Россия. – Подольск. – 2001. – С.45.
10. *Куритный И.П., Бурханов Г.С., Стадник Б.И.* Материалы высокотемпературной термометрии. – Москва: Металлургия. – 1986. – 205 с.
11. *Войтурський Я., Ковальчик А., Дорожовець М.* Диагностика статичних характеристик промислових резистивних сенсорів температури методом внутрішнього збудження. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – № 61. – С. 76–82.
12. *Гук А.П.* Физическая модель отказов термопреобразователей. // Тез.докл. 6-й Всесоюз. конф-ции "Электротермометрия-88". – Львов-Луцк. – Ч. 1. – 1988. – С. 128.