

Вона складається із двох джерел струму, двох каскадів підсилення, порогового елемента, фазообертача, що містить подільник частоти на 2, та вихідного ключового каскаду. Для забезпечення симетрії вхідного опору схеми щодо НК перший каскад підсилення диференційний. На його обох входах встановлено два джерела струму.

У фазообертачі цієї схеми використано фазочастотні співвідношення між механічними коливаннями НК та його електричним сигналом (див. рис. 2).

Оскільки ці співвідношення зберігаються на будь-якій резонансній частоті, то фазообертач, в якому вони використовуються, забезпечує необхідний фазовий зсув  $-\pi/2$  у широкому діапазоні частот.

1. Никитин Н. Н. Курс теоретической механики // Учебное издание. – М.: Высшая школа, 1990. – 607 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы // Учебное издание. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с

УДК 539.226

## САМОКАЛІБРАЦІЯ КАБЕЛЬНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕВТЕКТИЧНОГО МІКРОРЕПЕРА

© Гук Олександр<sup>1</sup>, Навоцька Юлія<sup>2</sup>, Прохоренко Віктор<sup>2</sup>, Прохоренко Сергій<sup>2</sup>, 2008

<sup>1</sup> АТЗТ “НВО “Термоприлад” ім.В.Лаха”, вул. Наукова, 3, Львів, Україна [thermo@mail.lviv.ua](mailto:thermo@mail.lviv.ua)

<sup>2</sup> Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна [vprokhor@polynet.lviv.ua](mailto:vprokhor@polynet.lviv.ua)

*Розроблено конструкцію самокалібратора термомпарі з використанням мінімальної маси евтектичного функціонального матеріалу.*

*Разработано конструкцию самокалибратора термомпары с использованием минимальной массы функционального эвтектического материала.*

*It is developed a design of the self-calibrator thermocouple with use of the minimal weight of functional eutectic material.*

Згідно з чинними стандартами практично у всіх галузях промисловості вимірювання середніх температур здійснюється за допомогою хромель-копелевих та хромель-алюмелевих термоперетворювачів. Зокрема, довготривалі температурні вимірювання у відповідальних вузлах енергетичного обладнання (зокрема, атомних електростанцій) реалізуються з використанням кабельних термоперетворювачів. Допустима похибка з огляду на дрейф, термометричної характеристики, що наростає у часі, як на сучасні вимоги, має надто високе значення. Так, можлива похибка вимірювання температури (в інтервалі 500÷600 °С) становить 5К [1]. Настільки значна похибка не дає можливості знизити рекомендовану мінімальну різницю між температурою використовуваної перегрітої пари та максимальним розрахунковим значенням температури для трубопроводів парової установки, що, своєю чергою, знижує можливість підвищення коефіцієнта корисної дії електростанцій [1].

Часовий дрейф термоелектричної характеристики сенсора при довготривалих вимірюваннях зумовлений поступовою деградацією структури в результаті штучного старіння термоелектричного матеріалу. Проте не можна вилучати і малопередбачувані стресові ситуації, пов'язані з механічним, радіаційним та складнішого типу пошкодженням термоперетворювачів [2].

Згідно з [2] існує зворотна та незворотна нестабільності службових властивостей термоелектродів. Зворотна нестабільність термометричних характеристик виникає у інтервалі 250÷550 °С у хромель-алюмелевій термомпарі. Цей вид нестабільності пояснюється ближнім впорядкуванням атомів хрому у кристалічній ґратці нікелю і її частково уникають попереднім відпалом хромелю. Незворотна нестабільність зумовлена зміною хімічного складу у ході тривалої експлуатації термоелектродів, а тому її уникнути неможливо. Щоправда, вона сягає лише  $\pm 1\%$ , і враховується у похибці вимірювання.

Значно вищою є нестабільність, зумовлена локальними термомеханічними напруженнями — її рекомендують зменшувати проміжними відпалами. Але це питання сьогодні ще недостатньо вивчене, зокрема, принциповим є те, за якого ступеня пластичної деформації структуру ще можна повернути до вихідного стану. Отже, сумарна похибка вимірювання температури може досягти настільки великих значень, що не лише порушиться оптимальність технологічного процесу (як це показано в [1]), але і унеможливиться сама його безпечна реалізація. Останнє особливо стосується теплових вимірювань на атомних електростанціях (АЕС).

Зрозуміло, що в умовах наявності непередбачуваного дрейфу термометричної характеристики необхідною стає періодична метрологічна перевірка сенсора, що, однак, є проблематичним в умовах довготривалого і неперервного контролю температури, особливо в технологічних процесах АЕС. Разом з тим, нам відомі роботи з практичного вирішення проблеми використання фазових переходів (ФП) топлення — кристалізація для самоконтролю термометричних характеристик термопар у ході їхнього використання в екстремальних умовах експлуатації [1, 3]. Для самокалібрації використовувались вбудовані у конструкцію сенсора керамічні комірки з функціональним матеріалом (ФМ), у котрому температура ФП була близька до контрольованої, перевищуючи її на (10÷50) К. Додатково вбудований в конструкцію нагрівний елемент дає змогу здійснювати калібрацію вимірювального кола у режимах топлення або кристалізації ФМ.

Теоретично показано і практично доведено, що для самокалібрації найефективнішими ФМ є сплави евтектичної концентрації, котрі характеризуються ізотермічним перетворенням кристал–розплав зі значною теплою ФП [4]. Оскільки необхідна температура ФП визначається технологічними параметрами контрольованого процесу, то практично це означає, що склад евтектики з низькою температурою топлення належить розрахувати. Сьогодні у фізиці конденсованого стану речовини відсутня стисла теорія залежності: температура топлення — концентрація компонентів. Однак існує низка емпіричних співвідношень, за допомогою котрих з точністю 3–5% можна передбачити склад евтектики з необхідною температурою топлення.

Важливою умовою реалізації ФП у реперах температури вважається наявність термодинамічної

рівноваги між кристалічною та рідкою фазами. Практично ця умова виконується лише для достатньо великої маси речовини (у стандартних реперах температури маса ФМ становить  $\geq 2$  кг).

У нашому ж випадку під час вибору оптимальної маси функціонального матеріалу калібратора визначальними стають конструкційні та теплофізичні обмеження. Калібратор за розмірами повинен вписуватись у конструкцію сенсора, відповідно ФП повинен супроводжуватись тепловим ефектом, достатнім для надійної його реєстрації. Нескладні розрахунки показують, що необхідна маса ФМ калібратора не може перевищувати 0,5 г. Для такої малої маси рівноважна кристалізація недосяжна — завжди буде спостерігатися значне передкристалізаційне переохолодження. Навпаки, топлення евтектичних сплавів не супроводжується об'ємним перегріванням зразка, оскільки контактне топлення відбувається одночасно по всій міжзерній поверхні [4]. Отже, самокалібрація повинна здійснюватись в режимі топлення (а не кристалізації!) евтектичного сплаву. Під час створення калібратора основними проблемами є конструкційна мініатюризація та сумісність конструкційного матеріалу з функціональним матеріалом.

У роботах Бернгарда [1, 3] використовуються корозійностійкі коаксіальні керамічні контейнери, простір між котрими заповнений функціональним калібрувальним матеріалом. Така конструкція повинна бути високопрецизійною, а відповідно — вартісною. Інший її недолік зумовлений низькою теплопровідністю кераміки, що розмиває краї плато топлення або істотно зменшує пік диференціальної термопар.

Ґрунтуючись на результатах раніше виконаних досліджень [5], ми пропонуємо використовувати металеві контейнери, виготовлені зі сталі 0X18H10T, контактна поверхня якої попередньо пасивується за допомогою високотемпературної дифузійної обробки в робочому (функціональному) розплаві. Схему комірки сталевого самокалібратора наведено на рис. 1, а. У цьому разі використовуються термоелектричний кабель без сталеві зачисної арматури.

Інша конструкція калібратора випробувана для кабельної термопар у завареному сталевому зачисному кожусі (рис. 1, б). Термопара з ізольованим від зачисного кожуха гарячим спаєм поміщається безпосередньо у гніздо комірки, виготовленої зі спектрально чистого графіту, у котру попередньо поміщено функціональний матеріал розрахованої маси.

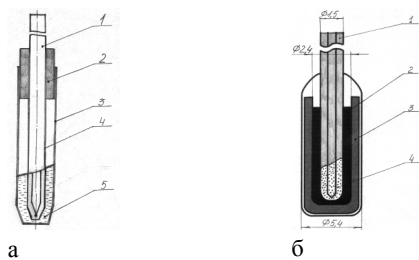


Рис. 1. Схеми комірок калібраторів:

а – 1 - термоелектричний кабель без сталевий захисної арматури; 2 - перехідна обтискна втулка; 3, 4 - внутрішня і зовнішня сталеві ємності; 5 - функціональний матеріал калібратора.  
 б – 1 - термоелектричний кабель з ізолюваним від захисного кожуха гарячим спаєм; 2 - графітова ампула; 3 - функціональний матеріал калібратора; 4 - дрібнодисперсний ізолювальний матеріал калібратора.

Графіт характеризується дуже високою корозійною стійкістю у розплаві, а безпосередній контакт термопар з розплавом забезпечує найкращий теплообмін, що дуже важливо у разі електро-, а значить і теплоізолюваності гарячого спаю.

У комірці рис. 1, б з використанням як ФМ евтектичного сплаву In-In<sub>2</sub>Ві досліджено можливості самокалібрації при  $t_{\text{топл}} = 74,0^\circ\text{C}$ . На рис. 2 наведено диференціальну (рис. 2, а) та інтегральну (рис. 2, б) термо-ЕРС для мінімально досяжної маси функціонального матеріалу. Вона становить 0,29 г, що з урахуванням питомої ваги компонентів відповідає 0,03 см<sup>3</sup>.

При такій малій масі принциповим стає питання рівномірності розміщення ФМ навколо гарячого спаю термопар. З порівняння кривих випливає, що в умовах повільного монотонного нагрівання термостата топлення починається після  $\approx 5$  хв і завершується після  $\approx 23$  хв. На диференціальній кривій (рис. 2, а) відзначається немонотонність перед завершенням фазового переходу, котра збігається зі спостережуваною в експериментах з диференціально-термічного аналізу та диференціально-сканувальної калориметрії [6] та інтерпретується нами як високотемпературне фазове перетворення інтерметаліду In<sub>2</sub>Ві перед топленням евтектики.

На інтегральній кривій (рис. 2, б) фазовий перехід проявляється сингулярністю; спостерігається гістерезис між кривими нагрівання і охолодження, котрий свідчить про реалізацію очікуваного переохолодження перед початком кристалізації.

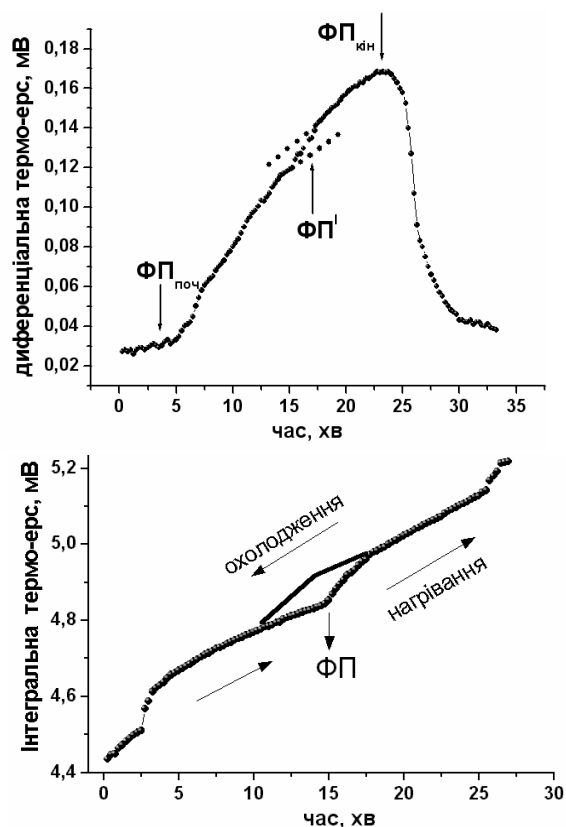


Рис. 2. Диференціальна (а) та інтегральна (б) термо-ЕРС сплаву In-In<sub>2</sub>Ві масою 0,29 г

**Висновки.** Запропоновано два варіанти конструкції комірок:

а) для самокалібрації кабельних термоперетворювачів з незахищеним; б) захищеним, але ізолюваним від захисної арматури гарячими спаями термопар.

Показано, що в умовах доступної технології досяжним є зменшення маси функціонального матеріалу до 0,3 г. Встановлений тепловий ефект на термометричній характеристиці є цілком достатнім для самокалібрації термопар і допускає подальше зменшення маси функціонального матеріалу. Останнє дасть змогу монтувати самокалібратор в околі гарячого спаю без істотного порушення конструкції термопар.

1. Бернгард Ф., Богун Д., Августин С., Маммен Х., Донин А. Применение самокалибрующихся термоэлементов с реперным материалом при температурах 500, 650 °С в парогенераторах // Вимірювальна техніка та метрологія, № 63, 2003. – С. 55 – 61.  
 2. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / Под ред.

А. В. Каржавина / Обнинск "Тесей". – 2001. 3. Voguhn D., Augustin S., Bernhard F., Mammen H. Phase transformations of technically pure metals and two-component alloys in miniature fixed-point crucibles. //High temperature – High pressure, 33 (2001). – № 4. – С. 419-426. 4. Прохоренко С.В. Теплофізичні засади стабілізації процесів топлення-кристалізації евтектичних сплавів для створення реперних точок температури: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.04 / Національний університет "Львівська політехніка" – Львів, 2005. –

38 с. 5. Прохоренко В., Прохоренко С., Бояр З., Навоцька Ю., Борисяк А., Кушнір В. Особливості корозії сталей 12Х18Н10Т та Х25Т в евтектичному розплаві Ga-In-Sn // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спеціальний випуск № 5 Т.1 – С. 204–208. 6. Prokhorenko V., Prokhorenko S., Mudryj S., Kochubei V., Navotska J., Panas A. The thermal physical properties and structure of In-In<sub>2</sub>Bi eutectic at melting-crystallization process //Archives of Foundry Engineering. – 2/2007. – V.7, № 36/2 – P. 173–176.

УДК 532.536

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИННИКА ВИПРОМІНЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

© Стадник Богдан<sup>1,2</sup>, Скоропад Пилип<sup>1</sup>, Семенистий Арсен<sup>1</sup>, 2008

<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка", кафедра інформаційно-вимірювальних технологій  
вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна

<sup>2</sup>Ряшівська політехніка, кафедра метрології та вимірювальних систем, Польща

*Проаналізовано особливості визначення коефіцієнта випромінювальної здатності матеріалів у діапазоні низьких температур.*

*Проанализированы особенности определения коэффициента лучеиспускающей способности материалов в диапазоне низких температур.*

*Analysed features of determination of coefficient of radiating of materials at low temperatures.*

**Вступ.** Ще донедавна при вимірюваннях низьких температур пірометри не мали широкого застосування. Це обмеження було викликано, зокрема, певним найнижчим рівнем температури самого теплочутливого елемента пірометра, значення якого визначалося, переважно, температурою довкілля. Проте сьогодні, внаслідок застосування у пірометрії новітніх технологій, стало можливим безконтактне вимірювання низьких температур навіть портативними пірометрами [1].

**Постановка проблеми.** Однак є ще одна, не менш істотна обставина, що гальмує широке впровадження низькотемпературної пірометрії, а саме – недостатня вивченість, а то й просто відсутність інформації про коефіцієнти випромінювальної здатності  $\epsilon$  об'єктів термометрії в тій чи іншій ділянці низькотемпературного діапазону. Так, аналізуючи значення поправки  $\Delta T$ , яку необхідно додати до значення виміряної пірометром повного випромінювання радіаційної температури  $T_p$  певного об'єкта для

визначення його дійсної термодинамічної температури  $T$ , яке знаходять із залежності  $\Delta T = T_p \left( \sqrt[4]{1/\epsilon} - 1 \right)$ , при зміні значення  $\epsilon$  в діапазоні від 0.1 до 0.9, та  $T_p$  у діапазоні від 50...500 К отримуємо, відповідно,  $\Delta T$  від 1.3 К до 13.3 К та від 38.9 К до 389 К (рис. 1).

Отже, як бачимо, визначення випромінювальної здатності  $\epsilon$  об'єктів термометрії набуває першорядного значення для вирішення проблеми підвищення точності та метрологічної достовірності безконтактних температурних вимірювань, зокрема, у низькотемпературному діапазоні.

**Аналіз стану дослідженості проблеми.** З огляду на сказане вище, у роботі аналізуються основні проблеми, що повинні вирішуватись при створенні методик визначення випромінювальних властивостей матеріалів у криогенному діапазоні температур та їхній технічній реалізації.

Так, поширена методика визначення інтегрального значення випромінювальних властивостей