

# ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 536.532

## ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІ ОПОРУ З МЕТАЛЕВИХ СТЕКОЛ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗТОПІВ МЕТАЛІВ

© Стадник Богдан, Скоропад Пилип, Маньковська Емілія, 2011

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра інформаційно-вимірвальних технологій,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Доведено перспективність застосування як чутливих елементів термоперетворювачів серії ТПР/ТВР-2085 термоперетворювачів опору з металевих стекол.*

*Доказана перспективність применения в качестве чувствительных элементов термопреобразователей серии ТПР/ТВР-2085 термопреобразователей сопротивления из металлических стекол.*

*It is proved an availability of using resistance thermoconverter made of metallic glasses as sensors for thermoconvertors of TPR/TWR-2085 series.*

**1. Вступ.** Сьогодні у багатьох галузях промисловості, як і під час наукових досліджень, необхідно вимірювати високі температури з високою точністю. Проблема загострюється ще й тим, що численні технологічні процеси, або їхні окремі стадії проходять в агресивних середовищах в умовах високої температури і в чітко визначених температурних інтервалах. Зокрема, це стосується технології виготовлення високоякісних сталей. Звичайно оптимальний інтервал температур не перевищує 20К на рівні 1600...1700°C, його розширення істотно погіршує якість одержуваного металу. Так, у разі випуску сталі 19Г найменшу частку браку (0,1 %) отримано при температурі 1630±2,5°C, при температурі 1630±10°C ця частка становить 0,2 %, а при температурі 1630±20°C – вже 0,5 %. Виявлено також, що заміна засобів вимірювання температури з відтворюваністю ±10°C на засоби з відтворюваністю ±2,5°C в умовах конверторного цеху збільшує продуктивність праці на кілька відсотків на рік.

**2. Постановка проблеми.** Сьогодні для вимірювання високих температур ще широко використовують розроблені у 80-х роках минулого століття у Львівському НВО «Термоприлад» термоперетворювачі, які дають змогу вимірювати температуру понад 2000°C контактним методом і, зокрема,

термоперетворювачі серії ТПР/ТВР-2085 для вимірювання температури розтопів металів з чутливими елементами (ЧЕ) на основі термопар типів ПР(В) і ВР(А), відповідно. Однак вони не позбавлені певних недоліків, а саме: 1) спостерігається інтенсивна рекристалізація вольфрамренієвих термоелектродів за високих температур, що погіршує їхні механічні та електрофізичні властивості й надалі спричиняє руйнування термопари навіть за незначних механічних навантажень; 2) в окиснювальному середовищі вольфрамренієві перетворювачі можна застосовувати тільки для короткочасного одноразового вимірювання температури, а у вакуумі ж, за високих температур, відбувається селективне випаровування ренію, особливо в стопах з великим вмістом ренію, що погіршує метрологічні характеристики виготовлених з них ЧЕ; 3) через конструктивні особливості термоперетворювачів серії ТПР/ТВР-2085 в процесі вимірювання ними температури відзначається:

- нестабільність температури контактних кілець ЧЕ, зумовлена, зокрема, нестабільністю і невідтворюваністю умов теплообміну в системі: розтоп – теплозахисна гільза – термопара;

- нестабільність електричного контакту в робочому з'єднанні термопар типу ВР(А), що, своєю чергою, викликає нестабільність метрологічних характеристик засобів вимірювання температури на їх основі, а також

незадовільний тепловий контакт між робочим злупом термопары і вимірюваним середовищем.

**3. Аналіз причин виникнення похибок вимірювання температури термоперетворювачами серії ТПР/ТВР-2085.** Як відомо, конструктивною особливістю ЧЕ цих термоперетворювачів є те, що їхні контактні кільця рознесені за довжиною термопары на відстань близько 10...15 мм. Таке вирішення, з позицій теорії термоелектрики, не є коректним, оскільки приєднання до контактних кілець подовжувальних проводів не впливає на номінальну статичну характеристику перетворення термопары (НСХ), лише якщо (закон проміжного металу) [1] додаткові місця контактів мають ту саму температуру (рис. 1).

У вказаному ж конструктивному виконанні ЧЕ велика ймовірність того, що температура додаткових місць контактів не буде однаковою ( $t_3 \neq t_4$ ) і в такому випадку вихідний сигнал термопары відрізнятиметься від її НСХ на певне значення  $\Delta E$ :

$$\Delta E = e_{BC}(t_3) - e_{BC}(t_4), \quad (1)$$

де  $e_{BC}(t_3)$  та  $e_{BC}(t_4)$  – термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС) термопары, утвореної, відповідно, електродами  $B$  і  $C$  за температур  $t_3$  і  $t_4$ .

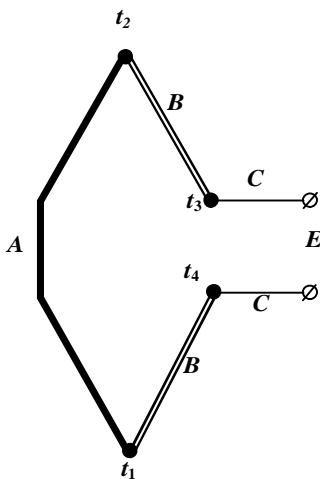


Рис. 1. Класична схема термоелектричного кола:  
*A* і *B* – термоелектроди термопары; *C* –  
 подовжувальні дроти; *E* – термо-ЕРС термопары,  
 що відповідає її НСХ

Отже, аналізуючи залежність (1), з метою оцінювання похибок вимірювання температури термоперетворювачем цього конструктивного виконання, треба оцінити ступінь невідповідності температур  $t_3$  і  $t_4$  контактних кілець його ЧЕ.

Для цього розглянемо процес теплопередачі в ЧЕ з термопарою типу ВР(А) у разі вимірювання температури розтопів металів, оскільки термоелектроди ВР5 і ВР20 являють собою, відповідно, однорідний стрижень скінченної довжини  $l$  діаметром  $d$  і теплопровідністю  $\lambda$ . Тоді, за відомого чинника тепловідатності  $\alpha$ , розподіл температури  $t_i$  по довжині термоелектродів ЧЕ можна оцінити на підставі залежності [1]:

$$t_i = t_0 \cdot \frac{\cosh[m \cdot (l_i - l)]}{\cosh(m \cdot l)}, \quad (2)$$

тут  $m$  визначають як:

$$m = \sqrt{a \cdot \frac{p}{I \cdot S}}, \quad (3)$$

де  $t_0$  – температура робочого злупу термопары;  $l_i$  – поточне значення відстані, що відраховується від робочого злупу термопары (дискретність  $l_i$  в цьому випадку становить 5 мм);  $p$  і  $S$  – відповідно, периметр і площа термоелектрода.

Результати моделювання розподілу температури вздовж термоелектродів термопары ВР(А) термоперетворювачів типу ТПР/ТВР-2085 подано на рис. 2.

Під час моделювання прийнято такі значення параметрів:  $t_0$  – температура робочого злупу термопары – 1600°C;  $l$  – довжина термоелектрода – 50 мм (дискретність  $l_i$  в нашому випадку становить 5 мм); діаметр  $d$  термоелектрода – 0,5 мм; теплопровідність  $\lambda$  термоелектродів термопары ВР(А) становить, відповідно:  $\lambda_{ВР5} = 117 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  і  $\lambda_{ВР20} = 104 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . З метою аналізу впливу на похибку вимірювання температури умов теплообміну в самому ЧЕ, реалізованому на базі термопары ВР(А), моделювання виконано для двох значень чинника  $\alpha$ , що становили, відповідно, 60 Вт/м<sup>2</sup>К і 30 Вт/м<sup>2</sup>К.

Аналіз результатів моделювання (рис. 2) розподілу температури вздовж термоелектродів термопары ВР(А) показує наявність невідповідності температур  $t_3$  і  $t_4$  контактних кілець її ЧЕ, а також істотний вплив на значення цієї невідповідності умов теплообміну в самому термоперетворювачі.

Тут на графічних залежностях (рис. 2):  $t_1, t_2$  – відповідно, криві розподілу температури по довжині  $l$  термоелектродів ВР5 і ВР20 при  $\alpha = 60 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $t_3, t_4$  – відповідно, криві розподілу температури по довжині  $l$  термоелектродів ВР5 і ВР20 при  $\alpha = 30 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ; у таблицях наведено числові дані результатів моделювання розподілу температури вздовж термоелектродів

термопары з дискретністю по довжині, що становить 5мм.

Сказане вище, своєю чергою, дає всі підстави стверджувати, що непевність вимірювання, зумовлена лише конструктивними особливостями термоперетворювачів серії ТПР/ТВР-2085, дає істотний внесок у баланс сумарної непевності вимірювання температури і, окрім того, має випадковий характер.

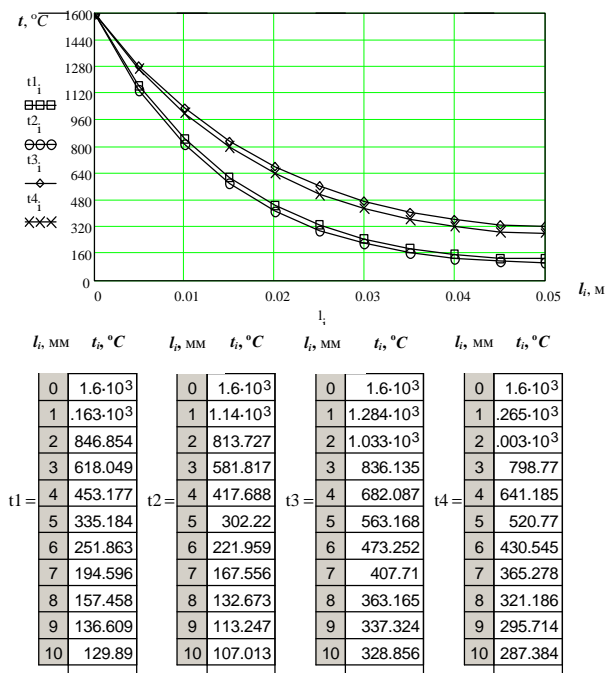


Рис. 2. Результати моделювання розподілу температури вздовж термоелектродів термопары ВР(А)

**4. Пошук способів покращення метрологічних характеристик термоперетворювачів для вимірювання високих температур.** Щоб усунути проаналізовані вище недоліки, пропонуємо для виготовлення ЧЕ термоперетворювачів замість термопар використовувати термоперетворювачі опору. Відомо, що термоперетворювачі опору на основі платинових ЧЕ – одні з найпрецизійніших серійних приладів для вимірювання температури, серед більшості використовуваних нині. Однак і платина має властивості, які не повністю відповідають вимогам до матеріалів ЧЕ прецизійних високотемпературних термоперетворювачів, зокрема:

- платина – активний каталізатор хімічних процесів, які проходять з виділенням значної кількості теплоти, що призводить до додаткової похибки;
- платинові ЧЕ бояться ударів, вібрацій, механічних напружень;

- дослідження прецизійних термоперетворювачів опору показали, що взаємодія платини з киснем при високих температурах доволі інтенсивні, а утворення оксиду  $PtO_2$  може призвести до істотної похибки вимірювання температури;

- значна довжина і маса дроту, з якої виготовлено ЧЕ, відповідно визначають інерційність і габарити термоперетворювача опору на його основі, що в багатьох випадках є основною причиною, що обмежує їх ширше застосування;

- висока вартість, дефіцитний матеріал.

Попередні дослідження, з метою пошуку оптимального матеріалу для виготовлення ЧЕ високотемпературних прецизійних термоперетворювачів, показують, що таким матеріалом з успіхом можуть слугувати металеві стекла (МС). Оскільки МС характеризуються високою хімічною однорідністю, відсутністю меж між зернами і лінійних дефектів у структурі, що характерно для матеріалів з гомогенною структурою і априорі вказує на високу стабільність їх електрофізичних параметрів, що, своєю чергою, вказує на перспективність їх застосування в прецизійній електротермометрії як матеріал ЧЕ [2].

Оскільки МС мають високий питомий електричний опір, (на порядок величини вищий, ніж для платини) [2], то це дає змогу істотно зменшити габарити та інерційність ЧЕ термоперетворювача опору такої конструкції і звести його до петлі дроту з МС діаметром 0,05 мм і довжиною всього 5...8 см, що, своєю чергою, дає змогу розмістити його у базовій конструкції термоперетворювачів ТПР/ТВР-2085. До вимірювального кола вторинного приладу такий термоперетворювач слід під'єднувати за чотирипровідною схемою, усуваючи тим самим вплив опору перехідних контактів і комутаційних дротів на його метрологічні характеристики. Однак температура кристалізації МС  $t_{кр} \approx 400...800^\circ\text{C}$ , що обмежує їх тривале використання за високих температур. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні динамічного методу вимірювання температури [3].

**5. Висновки.** Для того, щоб зменшити рівень непевності вимірювання високих температур, проаналізовано процеси теплопередачі, що відбуваються в термоперетворювачах серії ТПР/ТВР-2085, та виявлено основні джерела виникнення непевності вимірювання. Показано, що застосування термопар як ЧЕ термоперетворювачів такого конструктивного

виконання в перспективі не забезпечує подальшого підвищення їх метрологічних характеристик.

Доведено перспективність використання як ЧЕ термоперетворювачів серії ТПР/ТВР-2085 термоперетворювачів опору з металевих стекло.

Термоперетворювачі такого конструктивного виконання можна успішно застосовувати для вимірювання високих температур в агресивних середовищах, зокрема в хімічній промисловості та металургії.

1. *Вимірювання температури: теорія та практика* / Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. – Львів: Бескид Біт, 2006. – 560 с. 2. *Металлические стекла* / Под ред. Гилмана Дж.Дж. и Лими Х.Дж., США, 1978; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – 264с. 3. *Енциклопедія термометрії* / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2003. – 428 с.

УДК 536.532

## КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ В УСТАНОВКАХ РЕАКТИВНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОМЕТРА ВИПРОМІНЕННЯ

© Гоц Наталія<sup>1</sup>, Кривенчук Юрій<sup>2</sup>, 2011

Національний університет «Львівська політехніка»,  
<sup>1</sup>кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
<sup>2</sup>кафедра інформаційно-вимірвальних технологій,  
 вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна  
 natana@lp.edu.ua, proffessional@meta.ua

*Процес виготовлення елементів мікроелектроніки на основі процесу іонно-плазмового напилення потребує неперервного контролю температури кремнієвої підкладки. Запропоновано використовувати для цього термометр випромінювання. Розглянуто особливості вимірювання температури підкладки термометром випромінювання у процесі іонно-плазмового напилення.*

*Процесс создания элементов микроэлектроники на основе процесса ионно-плазменного напыления требует непрерывного контроля температуры кремниевой подкладки. Предложено использовать для этого термометра излучения. Рассмотрены особенности измерения температуры подкладки термометром излучения в процессе ионно-плазменного напыления.*

*The process of creation of elements of microelectronics on the base of process of ion – plasma spraying process needs continuous control of lining temperature. In the article the use is offered for this thermometer of radiation. The features of measuring of temperature of lining of radiation thermometer are considered in the process of spraying process.*

**Актуальність.** Мікроелектронні сенсори фізичних величин та мікросхеми різних видів широко використовують у техніці та промисловості. Це транзистори, фотодіоди, фоторезистори, різні види мікросхем. Є два основні способи виготовлення цих елементів: складання за допомогою мікророботів та методом напилення. Перший спосіб ефективний, але занадто дорогий. Для нанесення тонких плівок найширше використовують метод іонно-плазмового напилення шарів тонких плівок на підкладку, роль якої відіграє кремній. Основною перевагою методу іонно-

плазмового розпилення є його низька інерційність – розпилення починається одразу після подавання напруги живлення, а після її припинення розпилення припиняється майже миттєво. Для забезпечення якості виготовлення елементів мікроелектроніки важливим є контроль параметрів процесу напилення тонкої плівки, а саме: контроль зміни товщини плівки, електричного опору плівки, адгезії, швидкості нанесення плівки, а також температури кремнієвої підкладки. Температура підкладки впливає на деякі параметри процесу напилення, що визначає якість напилення. Отже, вимірю-