

О. В. Кочан, М. М. Микийчук

Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна

КОНСТРУЮВАННЯ РЕПЕРНИХ ТОЧОК ТЕМПЕРАТУРИ

The method for designing and investigating the ad hoc (made of improvised materials) temperature fixed point cell has been considered in the paper. There are developed the fixed point cell based on lead as well as the simple setup for its investigation. The feature of the developed fixed point cell is minimization of the action of the stray thermal flows distorting a temperature plateau. Experimental evidence has shown that even such a temperature fixed point ensures the change of the thermo-e.m.f. at melting and freezing of the reference material no greater than 0,05°C. The difference between the temperatures of melting and freezing does not exceed 0,15°C.

Ключові слова: термopара, термоелектричний перетворювач, реперна точка, температурне плато.

Постановка проблеми

Реперна точка (РТ) для перевірки термоелектричних перетворювачів була запропонована ще у 80-х роках 19 століття Ле-Шательє [1]. РТ — капсула, що містить реперний матеріал і розміщена біля робочого кінця термopари (ТП) для визначення похибки термоелектричного перетворювача (ТЕП) під час фазового переходу топлення або тверднення. Реперними матеріалами виступають чисті метали, або стопи (як правило евтектичні), температура фазового переходу яких відома з високою точністю і залишається сталою під час фазового переходу [2]. Ця стала температура під час фазового переходу отримала назву «температурного плато» (рис. 1).

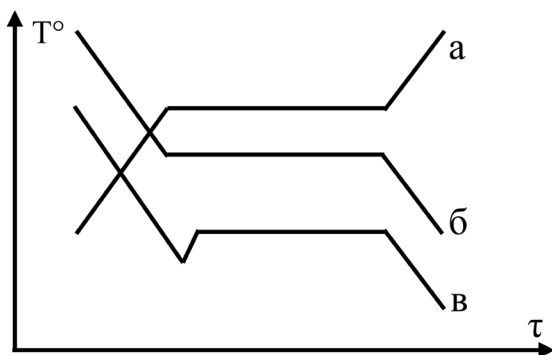


Рис. 1. Різні види температурного плато

Порівняння термо-е.р.с. ТП, перетвореною у температуру, з відомою температурою фазового переходу дає змогу визначити похибку цієї ТП. Процедура реалізується на місці експлуатації ТЕП.

Через технологічні проблеми РТ поки що не знайшли широкого застосування у промисловості. Їх застосовують, як правило, у лабораторіях. Однак, в останнє десятиліття, у цій галузі з'явилося багато публікацій у провідних журналах світу та конференціях. Зокрема, на міжнародній конференції ТЕМПМЕКО 2016 темі створення РТ було присвячено понад 40 до-

повідей. Такий інтерес науковців до РТ дав підстави фахівцям прогнозувати значне зростання сфери застосування РТ у діапазоні середніх і високих температур [3]. Але, через ряд проблем, РТ поки що не випускаються серійно.

Аналіз відомих технічних рішень

Відома (типова для багатьох джерел) реалізація РТ описана в [4]. На рис. 2 показані зміни термо-е.р.с. в часі в режимах сталого нагріву і охолодження, подані в [4]. З рис. 2 видно, що температурне плато при фазових переходах важко ідентифікувати. Скоріше можна зробити висновок, що зменшується або збільшується швидкість наростання е. р.с. Крім того, видно, що температура топлення не рівна температурі тверднення. Додаткову невизначеність може внести переохолодження реперного матеріалу.

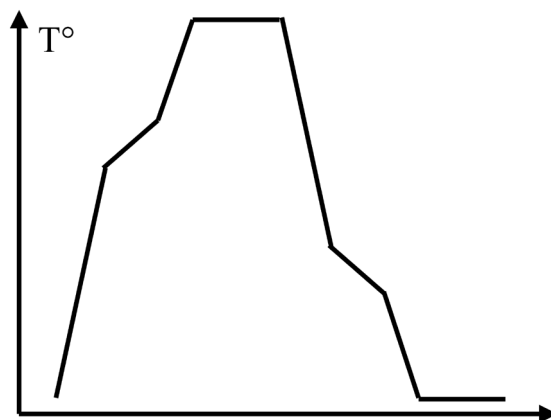


Рис. 2. Реальне «температурне плато» [4]

Слід відзначити, що вид такої температурних плато (див. рис. 2) не узгоджується з фізикою [2], де вказано, що температури топлення та тверднення є, по-перше, сталими, а, по-друге, однаковими.

Такий вид графіків [4] можна пояснити наявністю у конструкції РТ значного паразитного теплового потоку (рис. 3), який нагріває робочий кінець ТП при топленні (коли температура оточуючого середовища вища за температуру фазового переходу) та охолоджує при твердненні (коли згадана температура нижча за температуру фазового переходу). Цей потік, показаний штриховими лініями (див. рис. 3), не проходить через границю фазового переходу реперного матеріалу [4, 5]. Тому температура робочого кінця ТЕП не відповідає температурі фазового переходу. Отже підвищення точності вимірювання температури за рахунок визначення похибки ТП при температурі фазового переходу (калібрування ТП) за допомогою описаної у [4] РТ є сумнівним.

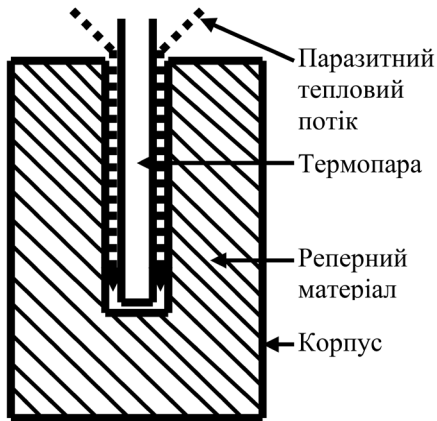


Рис. 3. Переріз конструкції РТ [333]

Таким чином, як видно з проведеного аналізу, основною причиною поганого виду температурних плато, притаманних описаній у [4] РТ може бути її невдала конструкція. Конструкції інших відомих РТ є різними [6–8], однак аналогічні недоліки повторюють багато з них.

Теорію конструювання РТ запропоновано у [9], де розглянуті основні особливості їх конструкцій. Однак, як видно з [4, 5], при конструюванні РТ конструктивні фактори часто не враховуються. Мало того, при підготовці міжнародної конференції ТЕМП-МЕКО 2016 були висловлені думки, що значний нахил температурних плато притаманний РТ, що пошук конструкції РТ подібний до пошуку «Святого Грааля».

Метою даної публікації є підготовка та проведення експериментальних досліджень імпровізованої (виготовленої із підручних матеріалів) реперної точки для демонстрації того, що зменшення дії паразитних теплових потоків дає можливість отримати високоякісні температурні плато навіть для такого простого варіанту реперної точки.

Конструктивна схема РТ

Для того, щоби «температурне плато», яке формує термо-е.р.с. ТП, відповідало температурі фазового переходу РТ з високою точністю, слід суттєво зменшити (бажано звести до нуля) паразитний тепловий потік,

що проникає до робочого кінця ТП із зовнішнього середовища (див. рис. 3). РТ має забезпечити для робочого кінця ТП умови адиабатності, теплообмін має відбуватися між реперним матеріалом та робочим кінцем ТП і між реперним матеріалом і зовнішнім середовищем. Теплообмін між робочим кінцем ТП і зовнішнім середовищем має прямувати до нуля.

Цього можна досягнути, по-перше, за рахунок максимального охоплення зони робочого кінця ТП межею фазового переходу реперного матеріалу (межею його топлення або тверднення), а, по-друге, за рахунок максимального видовження шляху проходження паразитного теплового потоку. Механізм забезпечення цих умов показано на рис. 4. Робочий кінець ТП глибоко занурений у реперний матеріал, який його охоплює з усіх сторін. При стаціонарному нагріві температура середовища (печі) зростає, як це показано стрілками на рис. 4. Через те, що ТП разом з РТ мають значно вищу теплоємність від оточуючого середовища, температура РТ відстає, а тепловий потік іде на нагрів РТ та робочого кінця ТП.

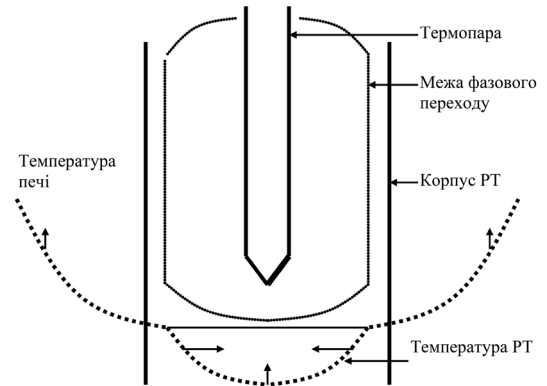


Рис. 4. Пропонувана РТ та її теплові потоки

Коли реперний матеріал почне розтоплюватися, температура поверхні фазового переходу залишається постійною. Тоді єдиний тепловий потік, що нагріває РТ, розпадається на два незалежні. Перший іде від печі до поверхні фазового переходу та забезпечує продовження його подальше проходження (руйнування кристалічної ґратки). Другий іде від поверхні фазового переходу до центра РТ і робочого кінця ТП. Він забезпечує вирівнювання температури в середині РТ (див. рис. 4, показано стрілками в межах поверхні фазового переходу). Безпосередній тепловий потік від печі до робочого кінця ТП можуть проводити лише самі термоелектроди ТП, але вони достатньо довгі, а теплообмін між ними і реперним матеріалом повинен бути хорошим. Тому паразитний тепловий потік, що спотворює температурне плато (див. рис. 2, 3) має мінімальне значення.

Конструкція пропонуваної РТ

Пропонується проста конструкція РТ, в якій вжито заходів для того, щоб паразитний тепловий потік від чи до реперного матеріалу мав мінімальний вплив на температурне плато.

Для початку було підготовлено саму ТП згідно рис. 5. Було використано ТП типу хромель-алюмель (ХА) з діаметром термоелектродів 1,2 мм. На неї було одягнуто довгу керамічну трубку (бусу) зовнішнім діаметром 8 мм. При цьому робочий кінець ТП виставив на приблизно 35 мм. Цей виступаючий робочий кінець ТП було покрито двома тонкими шарами суміші рідкого скла (силікатний клей) з гіпсом (сумарна товщина приблизно 0,5 мм).

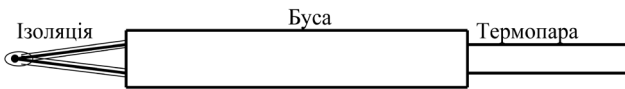


Рис. 5. ТП, підготовлена до встановлення РТ

Потім підготовлено РТ — у мідну трубку внутрішнім діаметром 8 мм та довжиною 100 мм, завальцьовану з одного боку, закручено гвинт М4×35 так, щоби він, разом із шайбами та гайкою закупорив завальцьований кінець. У трубку було засипано мілко нарізаний свинець, який потім було розплавлено на газовій конфорці. Кількість свинцю вибиралася такою, щоби трубка була заповнена на 75...80 мм.

Далі свинець у трубці був розплавлений і у трубку з натягом і на максимальну можливу глибину (не менше 20 мм) була вставлена підготовлена ТП (див. рис. 5). Зовнішній вид отриманої РТ з вставленою ТП подано на рис. 6.



Рис. 6. Термопара з РТ

Пропонована для дослідження конструкція ТП з РТ відповідає конструктивній схемі рис. 4. Робочий кінець ТП практично повністю охоплений реперним матеріалом. А термоелектроди занурені у реперний матеріал приблизно на 20 їх діаметрів і покриті тонким шаром ізоляції, тобто мають з реперним матеріалом добрий тепловий контакт. Відношення довжини корпусу РТ до діаметру близьке 10, тобто, корпус можна вважати безмежно довгим.

При такій конструкції паразитні теплові потоки повинні мати мінімальний вплив на температурне плато. Робочий кінець ТП перебуває ніби у «термосі», що зберігає в середині РТ температуру фазового переходу незалежно від зміни температури у печі.

Слід відзначити, що приведені вище міркування носять в основному якісний характер, а тому вимагають експериментального підтвердження.

Стенд дослідження пропонованої РТ

Для проведення експериментальних досліджень пропонованої конструкції РТ було виготовлено стенд, фотографія якого подана на рис. 7.

Основним елементом стенду є шахтна піч, виготовлена на основі дротового трубчатого резисто-

ра типу ПЕВ, потужністю 50 Вт. Він розміщений у центрі скляного слоїка та залитий гіпсом. Коло живлення печі складається з автотрансформатора типу ЛАТР-1, вихідна напруга якого вимірювалася тестером типу Ц20. Температуру печі вимірювали додатковою ТП типу ХА. Вимірювання температури вільних кінців здійснювалося за допомогою термістора, індивідуальна функція перетворення якого визначена за ртутним термометром типу ТЛ18.

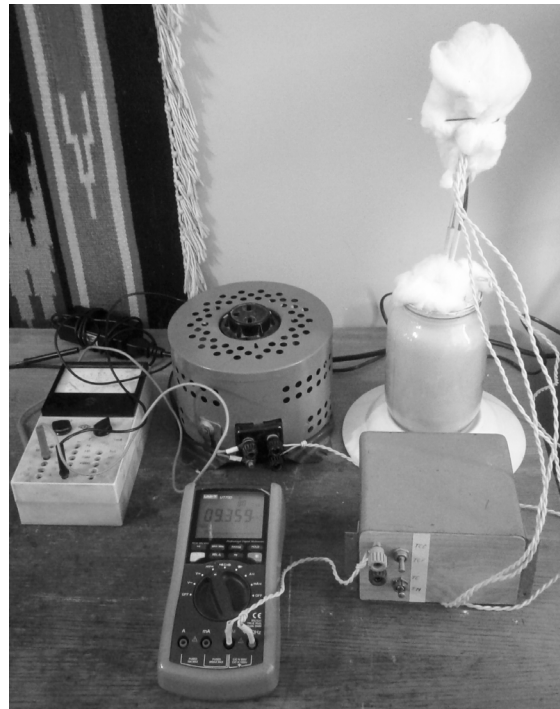


Рис. 7. Стенд досліджень пропонованої РТ

Досліджувана РТ з ТП розміщувалася в центрі печі. Відстань до дна печі задана згаданим гвинтом М4×35, на його кінці була закріплена центруюча пластина. Для зменшення температурного градієнта у печі та змін температури вільних кінців (як видно з рис. 7, у РТ занурено коротку ТП довжиною 40 см) прийнято заходи: 1) піч закрита гіпсовою кришкою з отворами для ТП; 2) кришка додатково ущільнена ватою; 3) на вільні кінці обох ТП одягнуто мідну коробку; 4) мідна коробка покрита шаром вати.

Схема вимірювальної частини стенду приведена на рис. 8. Вона включає ТП, оснащений РТ і позначений ТС+FPC, ТП вимірювання температури в печі ТС, термістор R_t вимірювання температури вільних кінців, перемикач S1 термопар, перемикач S2 між ТП і термістором та прецизійний тестер типу UT70D. Дослідження випадкової похибки вимірювання термо-е.р.с. вимірювальної частини стенду показали, що вона не перевищує ± 1 мкВ.

Методика досліджень

Для дослідження температурного плато на піч подавали напругу 60...70 В, тоді швидкість нагріву не перевищувала 10 °С з хвилину. При підході до

температури топлення або тверднення записувався опір термістора, а потім записувалася термо-е.р.с. TC+FPC з періодом 10 с. Після закінчення температурного плато знову записувався опір термістора.

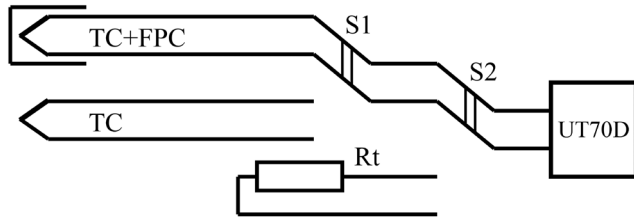


Рис. 8. Схема виміральної частини стенду

При обробленні результатів вимірювання: 1) визначалася температура вільних кінців TC+FPC на початку та кінці температурного плато; 2) проводилася лінійна інтерполяція температури вільних кінців TC+FPC для кожного результату вимірювання термо-е.р.с.; 3) значення температури вільних кінців перераховували у термо-е.р.с. та додавали до результатів вимірювання термо-е.р.с. Всі розрахунки проводилися у табличному процесорі EXCEL.

Результати досліджень

На рис. 9 і 10 подано графіки зміни термо-е.р.с. TC+FPC при топленні та твердненні свинцю в РТ відносно початкової. Як видно з графіків, нестабільність ерс температурного плато є меншою за 2 мкВ, що для ТЕП типу ХА становить менше 0,05°C.

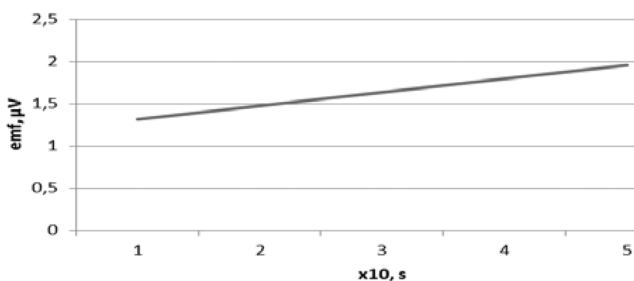


Рис. 9. Зміна термо-е.р.с. ТП при топленні

Графік, поданий на рис. 11, показує різницю між температурами топлення і тверднення, викликану, швидше всього, залишковим паразитним тепловим потоком. Але цей потік доволі малий, він викликає різницю температур не більше 0,15°C.

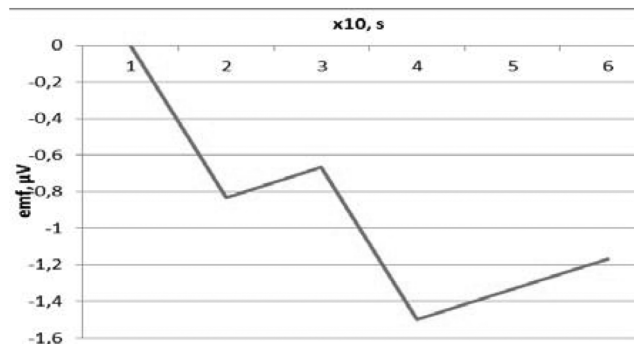


Рис. 10. Зміна термо-е.р.с. ТП при твердненні

Висновки

Якщо проектувати РТ з врахуванням паразитних теплових потоків, то навіть виготовлена із підручних матеріалів РТ дає змогу чітко ідентифікувати температурне плато [10]. Тому зміна термо-е.р.с. ТП при фазових переходах і різниця їх температур мають бути критерієм придатності конструкції РТ.

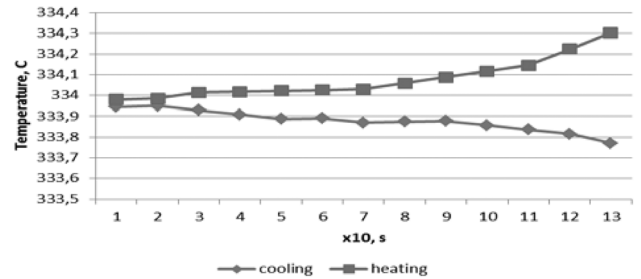


Рис. 11. Температура фазового переходу при топленні та твердненні

Список літератури

- [1] Hunt L. B. The Early History of the Thermocouple / L. B. Hunt // *Platinum Metals Review*. — 1964. — № 8 (1). — С. 23–28.
- [2] Halliday D. *Fundamentals of physics* / D. Halliday, R. Resnick, J. Walkerю — Wiley, 2011. — 1330 с.
- [3] Machin G. A european roadmap for thermometry / G. Machin та інші // *Int. J. Thermophys.* — № 35. — Р. 385–394.
- [4] Ongrai O. Pd-C eutectic fixed point cells for a self-validating type C thermocouple / O. Ongrai, J. V. Pearce, G. Machin, S. J. Sweeney — [електронний ресурс]. — режим доступу: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/4_%20-%20Ongrai.pdf.
- [5] Rudtsch S. Stray thermal influences in zinc fixed-point cells / S. Rudtsch, A. Aulich C. Monte // *Proceedings of the AIP conference Temperature: its measurement and control in science and industry*. — 2013. — № 8. — Р. 265–270
- [6] Kalemci M. Construction of home-made tin fixed-point cell at TUBITAK UME / M. Kalemci, N. Arifovic, A. Bagçe, S. Aytakin, A. Ince // *Int. J. Thermophys.* — 2015. — № 36. — Р. 1968–1979.
- [7] Zvizdić D. Tin-filled multi-entrance fixed point / D. Zvizdić, D. Šestan // *Proceedings of the AIP conference Temperature: its measurement and control in science and industry*. — 2013. — № 8. — Р. 259–264.
- [8] Marin S. Insert with a multiple fixed-point cell for a dry block calibrator / S. Marin, M. Hohmann, M. Schalles, G. Krapf, T. Fröhlich // *Proceedings of the 58-th Ilmenau scientific colloquium*. — 2014. — Р. 1–11.
- [9] Саченко А. А. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами / А. А. Саченко, В. Ю. Мильченко, Кочан В. В. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
- [10] Chang Shu. Demands to the design of temperature fixed point cells / Shu Chang, O. Kochan, M. Mykyichuk, V. Kochan, D. Zahorodnia // *Proceedings of the international workshop TEMPMEKO 2016*. — Р. 231.