

4. Висновки

1. Дефекти внутрішньої структури феромагнітних матеріалів (точкові дефекти, дислокації, пори) і внутрішні механічні напруження впливають на швидкість поширення УЗХ і відповідно на значення МП матеріалів, тобто призводять до виникнення методичної похибки, яка має переважний вплив на результуючу похибку вимірювання МП.

2. Для корекції методичної похибки необхідно одночасно із вимірюванням швидкості поширення УЗХ в досліджуваному зразку вимірювати його магнітну проникність, яка є структурно-чутливою характеристикою феромагнітного матеріалу, а дійсне значення МП матеріалу визначити за формулою (13).

1. Стадник Б.І., Мотало В.П. Підвищення точності вимірювання модуля пружності ізотропних матеріалів // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 1996. – № 52. – С.64–66.
2. Кашталян Ю.А. *Характеристики упругості матеріалів при високих температурах*. – К., 1970.
3. Треэлл Р.Т., Эльбаум Ч.Э., Чик В.В. *Ультразвуковые методы в физике твердого тела*. М., 1982.
4. Стадник Б.І., Мотало В.П., Залуцька Т.М. Спосіб визначення модуля пружності феромагнітних матеріалів // *Рішення Державного департаменту інтелектуальної власності України про видачу деклараційного патенту на винахід за заявкою №2002043577, МПК G01N 29/00 від 12.11.2002р.*
5. Бальшин М.Ю. *Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна*. – М.: Металлургия, 1972. – С. 42.
6. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. *Магнитные материалы и элементы*. – М.: Высшая школа, 1986. – С. 36–39.

УДК 536.532

П.І. Скоропад

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”

АНАЛІЗ СТАБІЛЬНОСТІ МЕТРОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З МЕТАЛЕВИХ СКЕЛ

© Скоропад П.І., 2003

Досліджено стабільність термоперетворювачів з металевих скел.

Investigated of the stability of the thermotransducers from metal glasses.

1. Постановка проблеми

Важливість та необхідність температурних вимірювань для подальшого прогресу наукових досліджень і розвитку сучасних галузей народного господарства України таких, як кріоенергетика, ядерна та космічна техніка, металургійна і хемічна промисловість та ін., не підлягають сумніву. Однак, незважаючи на широку номенклатуру термоперетворювачів, які серійно випускаються як у нас, так і за рубежом, за їх допомогою, на жаль, не вдається повністю задовольнити комплекс вимог, які сьогодні диктують наука та народне господарство України. Враховуючи те, що похибка вимірювання вторинної апаратури, яка

застосовується на сьогоднішній день в електротермометрії, суттєво нижча за похибку вимірювання первинних термоперетворювачів, то основної ваги набуває необхідність створення саме первинних термоперетворювачів з покращеними метрологічними та експлуатаційними параметрами.

Головним з пріоритетних напрямків, на наш погляд, у вирішенні цієї проблеми є розвиток електротермометрії із застосуванням нових матеріалів та фізичних ефектів, а одним з пріоритетних шляхів – використання матеріалу чутливих елементів термоперетворювачів металевих скел – нового класу матеріалів, що характеризуються особливим структурним станом та електрофізичними властивостями.

2. Аналіз сучасного стану проблеми

Відомо, що стабільність метрологічних та надійність експлуатаційних характеристик первинних термоперетворювачів залежать, головним чином, від рівня стабільності та відтворюваності термометричних властивостей матеріалів їх чутливих елементів. Тому на сучасному етапі розвитку електротермометрії до матеріалів чутливих елементів термоперетворювачів висувають такі основні вимоги:

- висока відтворюваність електрофізичних параметрів;
- відпірність проти впливу чинників робочого середовища;
- надійність та довговічність в експлуатації.

Важливим чинником при виборі матеріалу для чутливого елемента термоперетворювача, окрім вищезгаданих вимог, є ще і його висока технологічність та низька собівартість.

На сьогоднішній день деякі причини нестабільності термометричних властивостей полікристалічних матеріалів усувають, застосовуючи в електротермометрії **монокристалічні матеріали**. Вони пластичні, не рекристалізуються при високих температурах, мають менший чинник дифузії домішок. Оскільки довжина кристала значно переважає середній поперечник зерна, то градієнт механічних напружень в монокристалах суттєво менший, а тому стабільність та відтворюваність термометричних властивостей монокристалічних матеріалів – значно вищі.

У разі застосування для чутливих елементів термоперетворювачів **розтопів металів**, ще більш суттєво зменшується нестабільність метрологічних характеристик термоперетворювачів. Так, в розтопі відсутній дальній порядок, що автоматично виключає головні джерела нестабільності термометричних властивостей рідкіснометалевих матеріалів чутливих елементів щодо твердометалевих. Проте широке застосування термоперетворювачів на базі рідкіснометалевих чутливих елементів гальмується агресивністю розтопу щодо конструкційних матеріалів арматури термоперетворювача, а також, з огляду на велику поверхню контакту з матеріалами арматури, рідкіснометалеві чутливі елементи забруднюються та змінюють свої електрофізичні властивості, а отже, і термометричні.

Недоліки термоперетворювачів з рідкіснометалевими чутливими елементами значною мірою можна усунути, застосувавши в електротермометрії новий клас матеріалів – **металеві скла**.

3. Основні завдання досліджень

Якщо звичайне силікатне скло відоме людині ще з античних часів, то поняття **металевого скла** бентежить навіть і в наші дні, хоча його перші зразки отримали вже більше п'яти десятиліть тому. Цей порівняно новий клас металевих матеріалів отримують в екстремаль-

них умовах і мають вони специфічний комплекс фізико-хімічних властивостей, що є велетенським резервом для одержання матеріалів майбутнього. Важливою особливістю металевих скел є те, що вони, практично, нечутливі до деталей структурного стану. Їм властиві висока корозійна відпірність та довговічність внаслідок втомлюваності, що характерно для матеріалів з високогомогенною структурою. Вказані властивості металевих скел викликають до них підвищений інтерес як до технологічних, а також як і до перспективних матеріалів для чутливих елементів прецизійних вимірювальних перетворювачів. Особливо слід відзначити, що електрокінетичні явища в рідких металах та металевих склах подібні.

Проведені нами попередні дослідження показали наявність у останніх суттєвих переваг перед застосуванням чутливих елементів із традиційних матеріалів. Однак широке застосування металевих скел в електротермометрії додатково потребує ще вивчення комплексу проблем, як от: термодинамічного та технологічного аспектів їх виготовлення і формування бажаного структурного стану; процесів виникнення і релаксації механічних напружень; *стабільності в часі їх термометричних властивостей*; нормування термометричних властивостей та сертифікації технологічних і електрофізичних параметрів і т. ін., що й визначає суть задач для проведення досліджень.

4. Обґрунтування отриманих результатів

Тут, зокрема, аналізуються результати досліджень стабільності метрологічних та експлуатаційних характеристик розроблених макетів термоперетворювачів [1–4], що охоплюють широкий діапазон температур вимірювання (від 4,2 до 700 К) та умов застосування і в основі своїй базуються на використанні чутливих елементів (ЧЕ) двох типів: первинних термоперетворювачів опору (ТО) та термоелектричних (ТЕ) з полікомпонентних металевих скел (МС) класів метал – метал і метал – металоїд.

4.1. Стабільність макетів термоперетворювачів опору з металевих скел. З огляду на те, що на сьогоднішньому етапі розвитку електротермометрії традиційно найстабільнішими, зокрема серед контактних, вважаються термоперетворювачі опору платинові, дослідження стабільності ЧЕ розроблених макетів виконувалися згідно з методикою Львівського НВО “Термоприлад” [5] та з застосуванням їхньої ж спеціальної стендової апаратури, що дало змогу проводити коректний аналіз отриманих результатів.

Після кожного виду випробувань вимірювалися основні метрологічні параметри R_0 та W_{100} . Отримані результати порівнювалися з результатами для термоперетворювачів опору платинових з удосконаленим ЧЕ [5] (в обох випадках з десяти зразків для порівняння (рис. 1 – 2) вибиралися лише два, що максимально різнилися за відхиленням як R_0 , так і W_{100}). Як відзначається в [5], хоч удосконалені платинові ЧЕ й не перевищують передбачених стандартом граничних градувальних допусків на виготовлення термоперетворювачів опору, проте, в середньому, ΔR_0 для них становить $\pm 0,05\%$. З аналізу наведених для платинових ЧЕ залежностей стабільності, зокрема, параметра R_0 (рис. 1), видно, що зміни значення R_0 при випробуванні термоперетворювачів на вібрацію та ударні струси неіdentичні, а значення R_0 дещо зростає при перебуванні платинових ЧЕ в зонах високих температур та частково знижується після їх перебування в зоні криогенних. Аналіз наведених результатів для ЧЕ з металевих скел показує, що у випадку використання для виготовлення ЧЕ свіжозагартованих зразків, за 3000 годин перебування у високотемпературній зоні їх значення R_0 зменшується, приблизно, на $-0,03\%$ і, практично,

залишається незмінним протягом усіх подальших циклів під час дослідження. Такий характер зміни R_0 ЧЕ із свіжозагартованих металевих скел можна пояснити впливом релаксаційних процесів гартувальних напружень на початковій стадії їх експлуатації у високотемпературній зоні, а також частковим впорядкуванням структури, в цілому аморфної, матриці матеріалу.

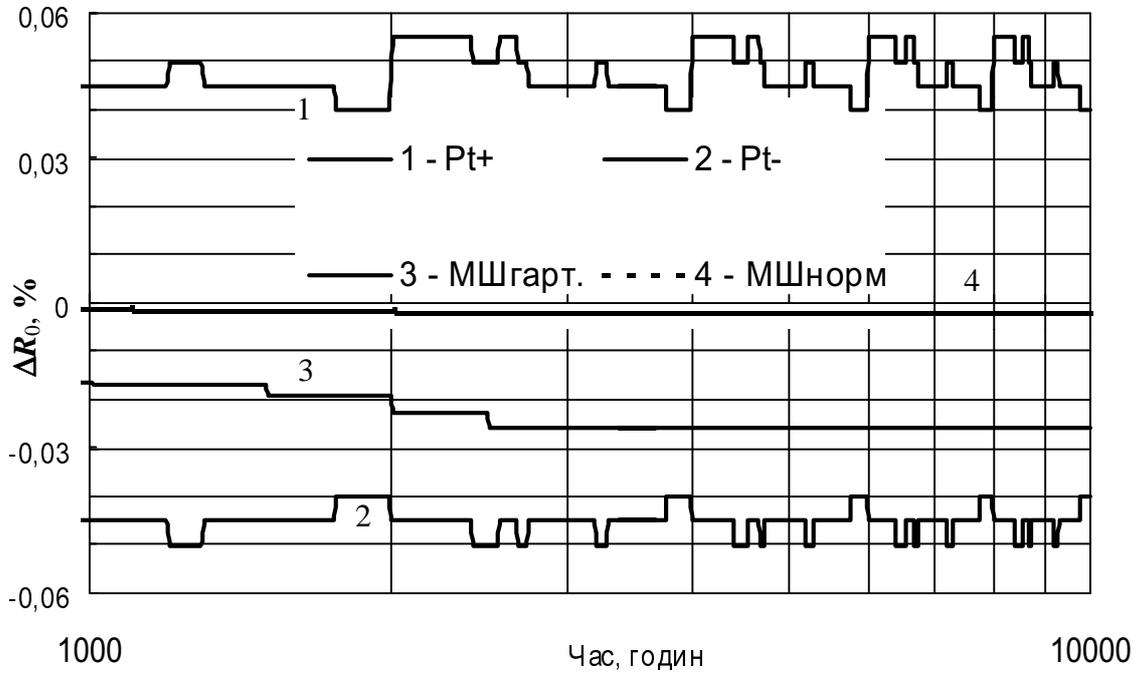


Рис. 1. Стабільність параметра R_0 макетів термоперетворювачів опору з металевих скел щодо платинових із удосконаленим чутливим елементом

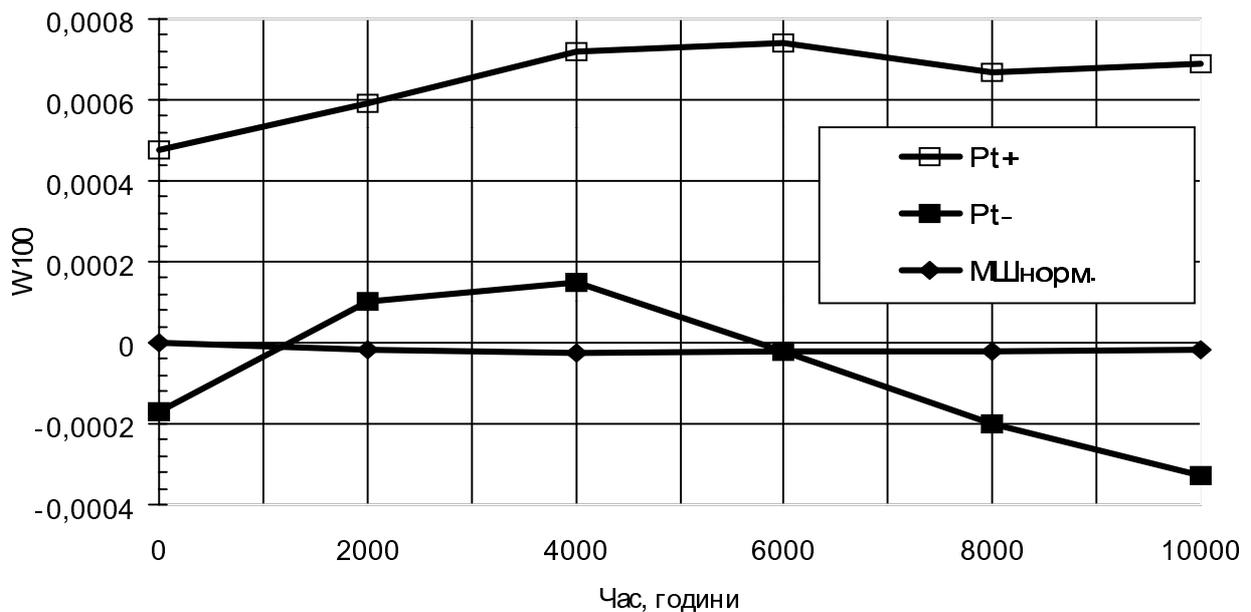


Рис. 2. Стабільність параметра W_{100} макетів термоперетворювачів опору з металевих скел в стосунку до платинових із удосконаленим чутливим елементом

Якщо ж для виготовлення ЧЕ термоперетворювачів застосовувати металеві скел з нормалізованими термоструктурними характеристиками, то зменшення R_0 у цьому випадку не перевищує значення $-0,005\%$ (рис. 1) і відбувається воно упродовж першого циклу їх перебування у високотемпературній зоні та залишається незмінним протягом усіх подальших циклів дослідження.

Аналіз стабільності параметра W_{100} досліджуваних макетів термоперетворювачів опору з металевих скел щодо платинових із удосконаленим чутливим елементом показує перевагу перших, оскільки найбільша зміна W_{100} (на рівні $-0,003 \dots -0,005\%$ проти $-0,03 \dots +0,075\%$ для платинових (рис. 2) у них відбувається протягом першого циклу, а надалі значення параметра W_{100} залишається без змін.

У результаті порівняння отриманих в роботі результатів дослідження магнеторезистивного ефекту (в полях до 7 Тл) для макетів термоперетворювачів опору із металевих скел з традиційно застосовуваними в аналогічних умовах та середовищах термоперетворювачами провідних фірм [6], встановлено доцільність застосування ЧЕ з металевих скел, зокрема в криогенному діапазоні температур, особливо за наявності впливу магнетних полів (див. таблицю).

Вплив електромагнетних полів на метрологічні характеристики термоперетворювачів опору (за даними [6])

Тип термоперетворювача	T, К	Відносна похибка (в знаменнику наведено значення для макетів з металевих скел) вимірювання температури, %	
		≤ 2.5 Тл	≤ 8.0 Тл
Вуглецеві резистори фірми Allen-Bradley 47;100; 220 Ом	4.2	< 1 / 0.5 ... 1	5 / 1 ... 2
	10.0	< 1 / 0.1 ... 0.5	3 / 0.5 ... 1
	20.0	< 1 / 0.1	1 / 0.1
Вуглецеві резистори фірми Matsushita 68;200; 510 Ом	4.2	2 ... 3 / 0.5 ... 1	4 ... 8 / 1 ... 2
Скловуглецеві резистори	4.2	0.5 / 0.5 ... 1	3 / 1 ... 2
	15	< 0.1 / 0.1 ... 0.5	0.5 / 0.5 ... 1
	35	< 0.1 / 0.1	0.5 / 0.1
Термістори	4.2	< 0.05 / 0.5 ... 1	1 / 1 ... 2
	10	< 0.05 / 0.1 ... 0.5	0.3 / 0.5 ... 1
	20	< 0.05 / 0.1	0.1 / 0.1
Германієві ТП	4.2	5 ... 20 / 0.5 ... 1	30 ... 55 / 1 ... 2
	10	4 ... 15 / 0.1 ... 0.5	25 ... 60 / 0.5 ... 1
	20	3 ... 20 / 0.1	15 ... 35 / 0.1
GaAs – діоди	4.2	2 ... 3 / 0.5 ... 1	30 ... 50 / 1 ... 2
	10	1.5 ... 2 / 0.1 ... 0.5	25 ... 40 / 0.5 ... 1
	20	0.5 ... 1 / 0.1	20 ... 30 / 0.1
Si – діоди	4.2	75 / 0.5 ... 1	- / 1 ... 2
	10	20 / 0.1 ... 0.5	30 / 0.5 ... 1
	20	4 / 0.1	7 / 0.1
Платинові ТП	20	20 / 0.1	100 / 0.1
	40	< 1 / 0.1	5 / 0.1
	80	< 0.5 / 0.1	1 / 0.1
ТП на базі металевих скел (власні дані)	4.2	0.5 ... 1	1 ... 2
	10	0.1 ... 0.5	0.5 ... 1
	20	0.1	0.1

4.2. Стабільність макетів термоелектричних перетворювачів з металевих скел .

Враховуючи особливості умов використання низькотемпературних термоперетворювачів термоелектричних та діапазон температур їх застосування (у нашому випадку 4 ... 900 К), згідно з [7], можемо сподіватися впливу на покази, традиційно застосовуваних термопар, від термомагнетних ефектів, що виникають в струмоведучих елементах при поширенні через них теплового потоку. Найбільшу зміну показів вносить залежність термо-ЕРС термопари від поздовжнього та поперечного магнетних полів [7]. Окрім того, важливим параметром, при дослідженні стабільності макетів термоперетворювачів з термопарами на базі МС, є ще й температурно-часова стабільність їх показів.

Таким чином, визначення параметрів стабільності термопар на базі МС проводилося за результатами їх дослідження в магнетних полях до 7 Тл та температурної експозиції при 300 К протягом 3000 годин.

Оскільки, з огляду на температурний діапазон та умови експлуатації, досліджувані термопари на базі МШ найбільш повно відповідають термопарі типу ХА(К), то як зразок для порівняння вибрано саме її.

Як відзначається в [7], термопари типу ХА(К) мало змінюють свої властивості під впливом сильних магнетних полів. Однак наведені в цій же ж роботі дані по температурній залежності відносних відхилень показів для термопари ХА(К) в магнетних полях до 5 Тл в діапазоні від 10 до 300 К при температурі її злетів порівняння 4.2 К та відсутньому, в зоні дії поля, температурному градієнті, показують максимальне значення відносного відхилення на рівні $\pm 0,25\%$ в діапазоні температур 10 ... 110 К. Зі зростанням температури від 110 до 300 К значення відносного відхилення показів для термопари ХА(К) зменшується та становить, відповідно, від $-0,01\%$ до $-0,15\%$ при $B=0.4 \dots 5$ Тл.

Отримані результати щодо вивченню стабільності показів термопар на базі МС (методика та умови експерименту ідентичні як і для випадку термопари ХА(К), наведено на рис. 3.

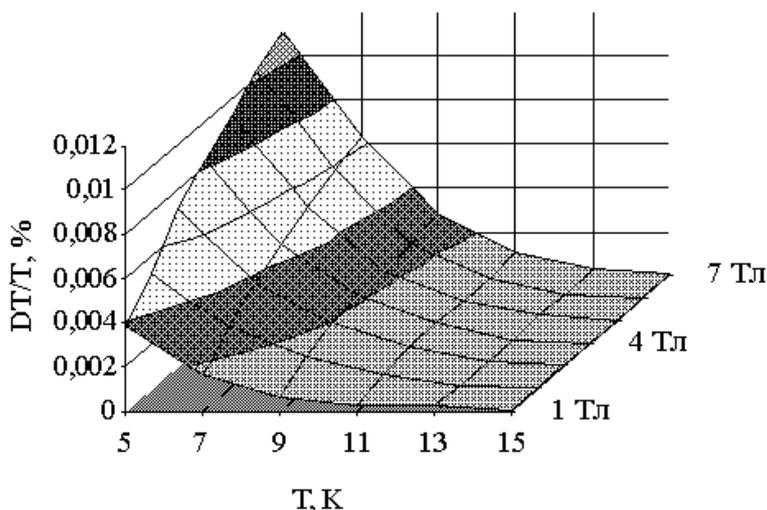


Рис. 3. Температурна залежність відносних відхилень показів для макетів перетворювачів термоелектричних на базі металевих скел в магнетних полях до 7 Тл

Основна перевага досліджуваних термопар, в стосунку до термопари ХА(К), полягає в тому, що значення відносних відхилень їх показів в магнетних полях при $B=1 \dots 7$ Тл та температурі 5 К не перевищує діапазон 0,002 ... 0.012%, а при підвищенні температури суттєво зменшується і при 15 К, практично, зводиться до нуля.

Результати дослідження температурно-часової стабільності показів термопар на базі МС наведено на рис. 4.

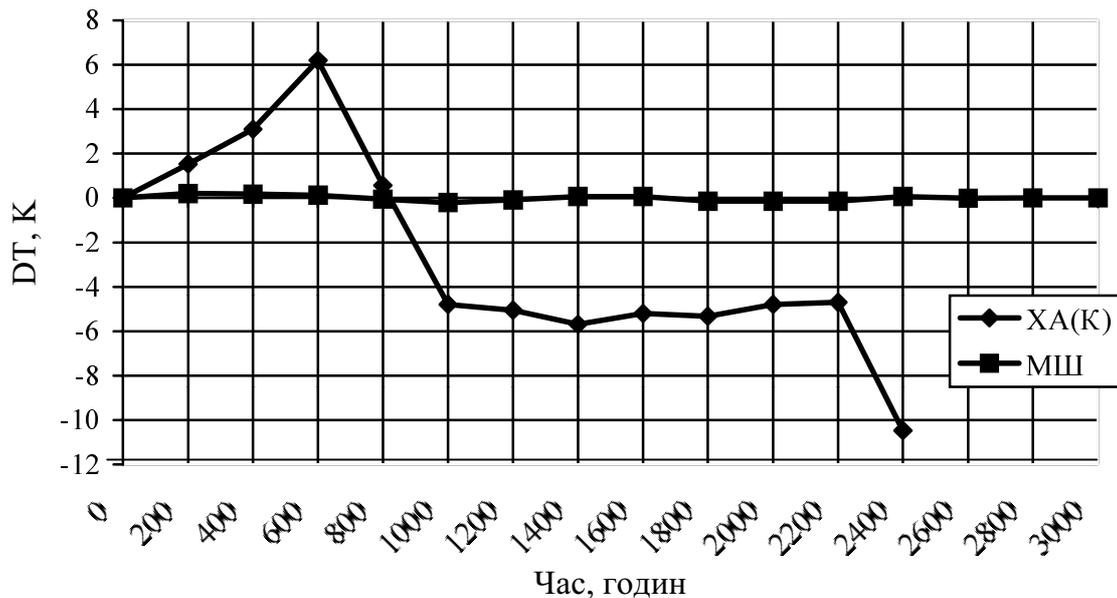


Рис. 4. Максимальні відхилення показів макетів термопар з металевих скел в результаті їх відпалу при 600 К протягом 3000 годин (для порівняння наведено аналогічну залежність для термопар типу ХА(К) в результаті відпалу їх при 600 К протягом 2400 годин)

Як показують наведені результати досліджень, термопари з МС відзначаються високим рівнем стабільності, оскільки максимальні відхилення їх показів, в результаті відпалу при 600 К протягом 3000 годин, не перевищують діапазон значень від $\pm 0,01$ К до $\pm 0,1$ К на відміну від термопар типу ХА(К), діапазон зміни показів яких, в аналогічних умовах, сягає від 6 К до -10 К [5].

Висновок

В результаті досліджень доведено, що розроблені термоперетворювачі мають кращі метрологічні та експлуатаційні показники, є стійкими проти впливу, зокрема, магнетних полів і вібрацій, а це підтверджує правильність авторської концепції вибору металевих скел як матеріал для виготовлення чутливих елементів термоперетворювачів, зокрема таких, що працюють в кріоенергетичних системах. Перспективними бачаться дослідження стабільності метрологічних характеристик металевих скел в умовах впливу радіаційного випромінювання.

1. Скоропад П.І. Низькотемпературний термоперетворювач опору // Тези доповідей УІІ-Міжнародної науков.-техн. конференції «Електричні методи та засоби вимірювання температури Т-92». – Луцьк. – 1992. – С. 101. 2. Скоропад П.І. Низькотемпературний термоперетворювач // Вісн. ДУ «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування. – 1996. – №305. – С. 21–25. 3. Скоропад П.І. Термоперетворювач для вимірювання температури поверхні // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1998. – №53. – С. 67–70. 4. Скоропад П.І. Особливості проектування контактних термоперетворювачів для вимірювання температури рухомих середовищ // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1999. – №54. – С. 65–70. 5. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А. Кюздени и др. – К.: Наукова думка, 1972. – 224 с. 6. Куинн Т. Температура: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 448 с. 7. Низкотемпературная термометрия: Учеб. пособие для вузов / М.П. Орлова, О.Ф. Погорелова, С.А. Улыбин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.