

ТЕРМОМЕТРИЯ: ВІД МАТЕРІАЛУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА – ДО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Стадник Б.І., д.т.н. проф.; Скоропад П.І., д.т.н. проф.; Яцишин С.П., д.т.н. проф.;
кафедра інформаційно-вимірвальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка»,
Україна; e-mail: pylyp.i.skoropad@lpnu.ua

Анотація

В статті проведено аналіз джерел нестабільності метрологічних та експлуатаційних характеристик первинних термоперетворювачів, який показав, що в напружених термоелектродах густина потоків тепла та електричного струму залежить не лише від градієнта температури і електричного потенціалу, а й від градієнта механічних напружень. Також залежною від градієнта механічних напружень є і контактна різниця потенціалів. Все це спричиняє залежність термометричних параметрів як полі- так і монокристалічних матеріалів термоелектродів від значення та характеру механічних напружень, що виникають в них в процесі експлуатації. Показано доцільність та приведено рекомендації стосовно застосування в термометрії металевих аморфних стопів для виготовлення чутливих елементів термоперетворювачів.

Ключові слова

Температура, термо-е.р.с., термоперетворювач, металеві аморфні сплави, похибка вимірювання.

1. Вступ

Оптимальний вибір матеріалу чутливого елемента (ЧЕ) термоперетворювача (ТП) вимагає комплексного аналізу його фізичних, хімічних та механічних властивостей у функціональному зв'язку з діапазоном вимірювання температури та умовами експлуатації [1-3].

Першочерговою умовою при цьому, все - таки, є висока стабільність і відтворюваність їх електрофізичних параметрів, зокрема таких електрокінетичних, як електричний опір та термо-е.р.с., які, власне, мають найширше застосовуються в техніці електротермометрії.

2. Недоліки

Відомо, що в сучасних контрольно-вимірвальних приладах енергія корисних сигналів складає лише 5 ... 10% енергії, що споживається [4], а решта перетворюється в електромагнітну та теплову. В переважній більшості випадків контрольно-вимірвальні прилади працюють в умовах впливу електромагнітних та теплових полів. Таким чином, враховуючи палітру фізико-хімічних властивостей матеріалів розмаїтих вузлів та елементів приладів, можемо прогнозувати, що в процесі вимірювання виникатимуть локальні термоелектричні ефекти, які проявляються у вигляді неінформативних електричних напруг та струмів. В місцях контактування матеріалів, що застосовуються в сучасних приладах (мідь, срібло, кремній, германій та ін.) при градієнті температури 20 ... 50 К імовірно виникнення термо-е.р.с. порядку 5 ... 10 мВ [5, 6], а іноді і вище [7]. Отож, актуальною є необхідність врахування імовірного впливу термоелектричних ефектів на стабільність термометричних властивостей матеріалів чутливих елементів ТП ще на етапі їх вибору та проектування.

3. Мета роботи

Метою роботи є пошук оптимального матеріалу термоелектродів для виготовлення термоперетворювачів з підвищеними параметрами експлуатаційної та метрологічної надійності, які можуть працювати в широкому діапазоні температур та умов експлуатації.

4. Термометричні властивості матеріалів термопар. Вплив різних чинників на термо-е.р.с.

Головним чином вплив зазначених вище чинників на термо-е.р.с., а, відповідно, і на стабільність метрологічних характеристик первинних ТП, розглянуто у роботах [8-14].

Відомо, що термо-е.р.с. та електроопір – одні з найчутливіших до дефектів структурного стану кінетичні параметри термометричних матеріалів. Їх розрахунок в діапазоні високих температур для шляхетних металів, молібдену та вольфраму, виконаний в рамках моделі *s-d* розсіювання Мотта показав, що температурні залежності електроопору та термо-е.р.с. значною мірою є залежними від виду, функції густини станів та розміщення енергетичних рівнів Фермі.

Дослідження залежності термо-е.р.с. від ступеня деформації дали змогу встановити, що термо-е.р.с., спричинена пластичною та пружною деформаціями, має різні знаки, а зміна термо-е.р.с. деформованого металу визначається, головним чином, змінами електронної структури поблизу енергетичних рівнів Фермі.

Так, гартований метал має протягом достатньо великого інтервалу часу (1 ... 10 годин) помітно збільшену, в стосунку до рівноважної, концентрацію вакансій. Його термо-е.р.с. в парі з відпаленим металом пропорційна концентрації надлишкових вакансій. Так, при гартуванні срібла, починаючи від нижчих температур і до температури топлення включно, ріст термо-е.р.с., вимірної при 823 К, носить експоненційний характер, що відповідає вмістові надлишкових вакансій та температурі гартування [23].

Вплив на термо-е.р.с. кожної з домішок, як свідчать результати [24], є адитивним та визначається нахилом прямих Нордгейма–Гортера, а зміна електроопору пов'язується з диференційною термо-е.р.с. залежністю:

$$\Delta S = (S_i - S_0) \cdot \Delta \rho / (\rho_0 + \Delta \rho), \quad (2)$$

де S_i – термо-е.р.с. домішки; S_0 – термо-е.р.с. основної матриці металу при певній температурі; ρ_0 – електроопір основної матриці металу при певній температурі; ΔS – зміна термо-е.р.с., що спричинена впливом домішок; $\Delta \rho$ – зміна електроопору, що спричинена впливом домішок.

Відомо, що атоми домішок спричиняють локальні деформації, пов'язані з локалізацією електричного заряду навколо їх безпосереднього оточення в певному мікрооб'ємі, а тому – для інтерпретації впливу домішок малих концентрацій на кінетичні властивості матеріалів можна застосувати модель конфігураційної локалізації валентних електронів.

Так, згідно положень згаданої моделі, атоми розчиненої речовини змінюють свою електронну конфігурацію в напрямку зближення з електронною конфігурацією атомів розчинника шляхом перерозподілу валентних електронів. Проте, атоми, що мають близькі до заповнення, або ж напівзаповнені sp - чи d -оболонки, добудовують їх за рахунок колективізованих електронів атомів розчинника до ближчої стабільної sp^3 -оболонки [25]. В результаті зменшується концентрація колективізованих електронів, розсіювання яких на d -станах і визначає величину термо-е.р.с., зокрема, перехідних металів.

Розглянуті вище зміни термометричних властивостей стосуються впливу домішок малих концентрацій ($\sim 10^{-3}$ ваг. %), проте, часто домішки насичують матеріали до межі розчинності, утворюючи при цьому сегрегації та другі фази, вплив яких на термометричні властивості матеріалів термоелектродів – важко навіть прогнозувати. Згідно з [24], зміна термо-е.р.с. визначається зміною електроопору, але після нагріву в газових атмосферах при температурах, що перевищують 1273 К, електроопір та його температурний коефіцієнт для платини зазнають суттєвих змін, тоді як термо-е.р.с. – майже незмінна. Очевидно, що одна і ця ж кількість домішок, перебуваючи в матеріалі в різному стані (твердий розчин чи друга фаза), має різний вплив на термо-е.р.с.

Так, в металах, що мають домішки, рівні яких розщеплені кристалічним полем, непружне розсіювання електронів провідності на домішках спричиняє різке зростання термо-е.р.с., в стосунку до її стандартного значення, пропорційного температурі [26].

Термо-е.р.с. надзвичайно чутлива до різного роду неоднорідностей [27], що створюють градієнт механічних напружень по довжині термоелектрода, який в свою чергу може бути причиною локальної неоднорідності термо-е.р.с., а звідти і причиною зміни градуовальної характеристики термометри. Неоднорідність розподілу домішок в термоелектродних матеріалах спричиняє зміни інтегральної термо-е.р.с. термометри [28], що може доповнюватися рекристалізаційним чинником [29]. Хімічна неоднорідність пов'язана зі зміною складу матеріалу по довжині, а фізична – з фазовими, структурними змінами та дефектами кристалічної ґратки.

5. Матеріали з унікальними властивостями в електротермометрії

Електроопір та термо-е.р.с. – одні із самих чутливих кінетичних параметрів матеріалів, що залежать від багатьох чинників, як от: температури, структури, домішок та їх розташування, дефектів ґратки і т.д., в процесі вимірювання температури зазнають ряд змін. Згідно [30], такі зміни термо-е.р.с. в термоелектродах можна пояснити в рамках загальної теорії термоелектричних явищ. За звичай приймають, що стан матеріалу не змінюється від точки до точки, що відповідає сталому значенню питомої енергії Гібса матеріалу або ж його хімічного потенціалу. Тут наявні лише дві термодинамічні сили, що спричиняють термоелектричні ефекти: градієнт температури та градієнт електричного потенціалу. Проте, якщо ж матеріал термоелектродів перебуває в напруженому стані, то внаслідок наявності дефектів кристалічної будови – розподіл механічних напружень буде неоднорідним. Окрім того, зростає енергія Гібса на одиницю об'єму матеріалу термоелектродів. Значення цього приросту можна оцінити, виходячи із залежності: $\sigma^2 / 2 E_0$, де σ – рівень механічних напружень, а E_0 – модуль пружності. Таким чином, можна сказати, що постає ще одна термодинамічна складова, яка визначається зміною енергії Гібса матеріалу, а значення якої можна оцінити за виразом: $(\sigma / E_0) \cdot \nabla \sigma$.

Монокристалічні матеріали. Усунення деяких причин нестабільності термометричних властивостей термоелектродів було б можливим в разі використання в термометрії *монокристалічних матеріалів*. Вони досить пластичні, не рекристалізуються при високих температурах, мають вищу стабільність структурного стану та електрофізичних властивостей, а також менший чинник дифузії домішок. Зокрема, для молібденового дроту, цей аспект проблеми досліджено в [31]. Окрім цього, в полікристалах значення градієнта механічних напружень, за порядком величини, рівне відношенню напруження до середнього поперечника зерна, а в монокристалах – до середньої довжини кристалу. Оскільки довжина кристалу значно переважає середній поперечник зерна, то градієнт механічних напружень в монокристалах – суттєво менший, ніж в полікристалах, а тому стабільність та відтворюваність термометричних властивостей термоелектродів в монокристалічному стані – значно вищі.

Розтопи металів. У разі застосування, як матеріалів для чутливих елементів термометрів, *розтопи металів* суттєво зменшуються деякі складові нестабільності метрологічних характеристик термометрів. Так, в розтопі відсутній дальній порядок, що автоматично виключає головні джерела нестабільності термометричних властивостей твердофазних матеріалів чутливих елементів [32]. Про перспективність використання розтопів металів в якості теплочутливих елементів свідчать, зокрема, результати робіт [32, 33]. Проте, широке застосування рідкометалевих термометрів гальмується двома головними чинниками: 1) агресивністю розтопу щодо конструкційних матеріалів арматури термометра; 2) з

огляду на велику поверхню контакту з матеріалами арматури, рідкометалеві чутливі елементи забруднюються та змінюють свої електрофізичні, в т.ч. термометричні, властивості.

Металеві шкла. Недоліки рідкометалевих чутливих елементів значною мірою можна усунути, застосувавши новий клас матеріалів – *металеві аморфні стопи*, або ж, як їх ще прийнято називати, – *металеві шкла* (МШ), які формуються при використанні високошвидкісного гартування. Електрофізичні властивості цих матеріалів зближені до електрофізичних властивостей відповідних розтопів, а механічні – перевищують аналогічні властивості кращих полі- та моно- кристалічних зразків [34].

Важливою особливістю МШ є те, що їх структура як мікро- так і макро- скопічно гомогенна, а тому вони, в

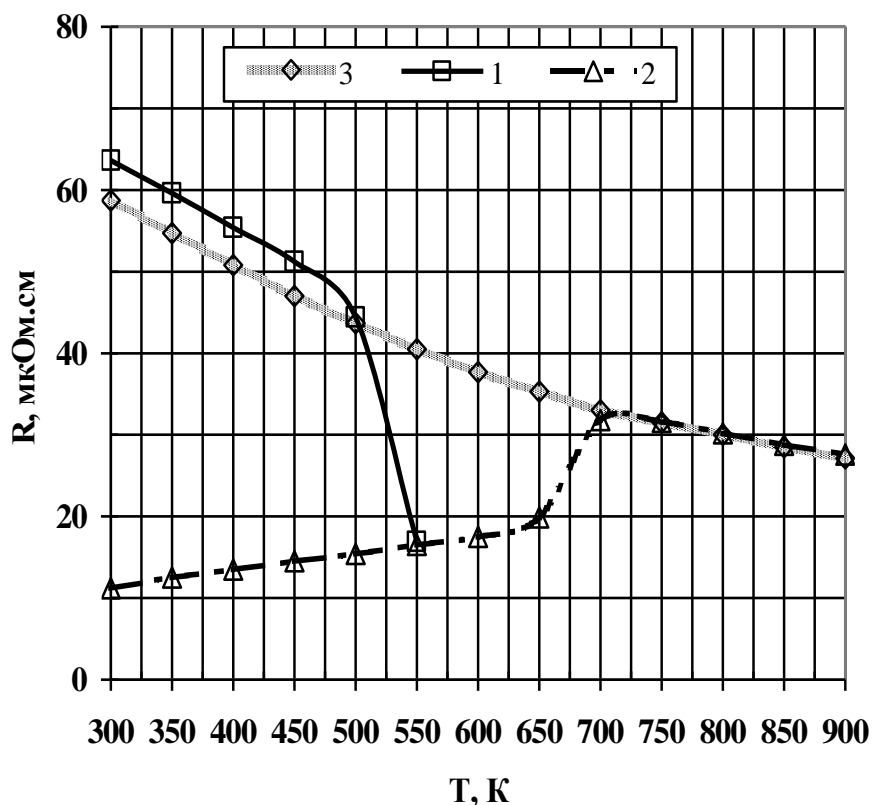


Рисунок 1. Температурна залежність питомого електричного опору МШ в аморфному (1) та кристалічному (2) станах (експериментальні дані); (3) – розрахунок за модифікованою теорією Фабера-Займана.

порівнянні зі звичайними полікристалічними матеріалами, практично не чутливі до деталей структурного стану. Металевим аморфним стопам властиві висока корозійна відшліфованість та довговічність внаслідок втомлюваності, що характерно для матеріалів з високогомогенною структурою. Вказані властивості МШ викликають до них підвищений інтерес як до технологічних, а також як і до перспективних матеріалів для чутливих елементів прецизійних вимірювальних перетворювачів.

Проведені дослідження показали, що застосування МШ в термометрії

дозволяє мінімізувати термічно активовані внутрішні механічні напруження в термоелектродах та забезпечити високу відтворюваність електрофізичних параметрів останніх [35, 36]. Слід відзначити, що явища перенесення електричного заряду в МШ та рідких металах багато в чому подібні [34], про що свідчать наявні експериментальні дані. Так, на рисунку 1 приведено хід типової температурної залежності питомого електроопору МШ в аморфному, кристалічному та рідкому станах.

Оскільки МШ займають проміжне становище між діаметрально протилежними структурними станами речовини – рідким та твердим, і об'єднують в собі їх кращі властивості, а отже мають всі підстави стати перспективними матеріалами для техніки вимірювальних перетворювачів, зокрема, для цілей електротермометрії. Питомий опір МШ, який в аморфному стані на 10 - 20% є вищим від того рівня, що його прогнозує для розтопів модифікована теорія Фабера-Займана, це – наслідок прояву “неідеальності” структури металевих шкел стосовно класичних розтопів.

6. Шлях від термоелектричного матеріалу до термоелектричного термометра. Визначальний експлуатаційний параметр – дія циклозмінних температур

У термоелектричних матеріалах, які є гомогенними та ізотропними, термічні напруження у процесі експлуатації, як правило, не виникають або є незначними. Проте, полікристалічні матеріали термоелектродів термоелектричних термометрів не вважаються гомогенними [], а монокристалічні матеріали – не є ізотропними []. Їхній вплив на працездатність необхідно охарактеризувати параметрами, спроможними бути врахованими і яких слід дотримуватись у процесі експлуатації термометрів. Насамперед, сюди можна віднести вплив ступеню

чистоти термометричного матеріалу, особливо, неметалевих включень [], виділень 2-х фаз [] для полікристалічних матеріалів; анізотропію коефіцієнтів теплового розширення [], електричного опору [] та термо-е.р.с. [] у монокристалічних матеріалів. Крім того, полікристалічним матеріалам притаманні зміни термо-е.р.с., зумовлені рекристалізаційними процесами [], відпалом [] та наростанням механічних напружень внаслідок процесів різноманітного походження []. В загальному, одночасна дія декількох видів термічних напружень за наявності корозійного середовища, активізує значно потужніші процеси комбінованого руйнування [Міля] порівняно з сумарною дією кожного окремого чинника впливу. У результаті, безпосередньою причиною відмов термопар термоелектричних термометрів, що експлуатуються в особливо складних умовах, стає корозійна термічна втома [Лях].

Якщо стрімка зміна температури зумовлює достатньо складні процеси наведення динамічного характеру змін термо-е.р.с. або ж градуовальних характеристик термометрів, то регулярне термоцикловання останніх принципово змінює характер дії; воно призводить до метрологічної відмови термометра, коли його характеристика виходить поза допустимі межі []. Відзначимо, що метрологічної відмова завжди приводить до механічної відмови, тобто до обриву електричного кола термометра, який переважно відбувається у зоні гарячого спаю, де фіксується найвища інтенсивність усіх механо-структурно-хімічних процесів [].

Втома матеріалу термоелектродів, при дії циклічних термомеханічних навантажень, часто пов'язується з концентрування механічних напружень в елементах конструкції і, в тому числі, у згаданих термоелектродах. Нами проводились раніше [] дослідження зв'язку між змінами градуовальних характеристик термоелектричних термометрів типу ТВР 301-01 та рівнем і розподілом механічних напружень в термоелектродах при багатократних періодичних вимірюваннях температури рідкого чавуну. Змінний пакет термометра з термопарою типу ВР-5/20 призначався для 10- ... 60- кратного занурення тривалістю 5 с. кожне в розплав на глибину 30 мм. Вивчення змін характеристик здійснювали стосовно зразкового (2-го розряду) термоелектричного термометра типу ПР-30/6.

Як виявилось, статистичний розподіл градуовальних характеристик досліджуваних термометрів відповідав стандартному нормальному розподілу з $\mu = 0$ та $\sigma^2 = 1$. Останній виникає тоді, коли дана випадкова величина (зміна градуовальної характеристики) являє собою суму великого числа незалежних випадкових величин, кожна з яких відіграє незначну роль в утворенні всієї суми. Для термометрів перед використанням проведено калібрування шляхом занурення в рідке олово при температурі 1473-1773 К показало допустимий розкид градуовальних характеристик в межах 0,7 К на рівні 3σ . Після 1-го занурення у рідкий метал усереднена градуовальна характеристика зсунулася на +0,6 К при збільшенні стандартного відхилення 3σ до 1,5 К. 10 занурень термометрів приводило до зсуву характеристики вже на +2,4 К при стандартному відхиленні $3\sigma - 2,3$ К. Сам же статичний розподіл став несиметричним з появою хвоста у бік високих відхилень градуовальної характеристики. Разом з тим, жоден із партії 1000 термометрів не відмовив механічно, тобто не зруйнувався. Проте, 60-кратне занурення термометрів призвело до руйнування 17-ти з них із партії 1000 шт. Їх усереднена градуовальна характеристика змістилася на + 3,2 К при подальшому зростанні стандартного відхилення 3σ до 3,1 К.

Відзначимо, що при високих температурах основним шляхом усунення механічних напружень, що можуть приводити до змін характеристик вважаються дифузійні зміщення атомів та дислокацій. Проте, за умов циклозмінних багатократно повторюваних температур дифузійні зміщення не встигають відбуватися. Тоді інтенсифікуються процеси, зв'язані з формуванням мікротріщин, які зрештою можуть призвести до виникнення магістральної мікротріщини, здатної обірвати достатньо тонкі термоелектроди []. У цьому полягає пластична деформація. Коли нано-, а далі й мікротріщини активно розвиваються у напрямку їх посилення до макротріщини, це і є пластичне деформування, що приводить до руйнування, зумовленого втомою матеріалу.

Швидкість зміни температури при нагріві чи охолодженні визначає значення температурних напружень, безпосередньо впливаючи на зміни термо-е.р.с. термометра []. Інакше, зміна характеристик тим істотніша, чим вища швидкість зміни температури []. Остання описується виразом: $\lambda\tau_w/C\rho R^2$, де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; ρ – густина; R – характерний мінімальний розмір; τ_w – тривалість нагріву або охолодження; C – питома теплоємність. Оскільки $\lambda/C\rho R^2 = 1/\epsilon$ (ϵ – показник теплової інерції), то критерії швидкості нагріву чи охолодження можна виразити наступним чином. Якщо $\epsilon/\tau_w \gg 1$, то швидкість зміни температури термометра є істотною; якщо $\epsilon/\tau_w \ll 1$, то – швидкість є незначною.

Важливим є коректно обмірковувати застосовність даного критерію стосовно елементів конструкцій (чутливих елементів) мікро- і нанотермометрів. Адже, як видається на перший погляд, малорозмірним елементам – притаманна незначна інерційність, і тому термоструктурних напружень, як таких, з їхнім істотним впливом там не буде. Проте, не забуваймо, що часто інтенсивність теплофізичних процесів, пов'язаних з виділенням тепла, у таких мікро- та наноелементах є досить високою. Прикладом можуть служити польові транзистори, що експлуатуються в умовах істотного тепловиділення внаслідок пропускання струмів. Подібний елемент розроблено нами на основі польового нанотранзистора з ізольованим затвором для квантового еталону температури []. Тому тут доцільно детальніше розглядати співмірність процесів тепловиділення з інерційністю конструктивного елемента.

У всіх випадках дрейф градуовальної характеристики термометра визначається швидкістю зміни температури. Тому вказаний критерій є важливим для оцінки даної характеристики; він визначає метрологічну відмову термометра, як наслідку виходу його номінальної статичної характеристики поза допустимі межі. Останні задаються у технічному паспорті термометра і залежать від умов експлуатації.

Іншим важливим параметром термоелектричного термометра, органічно зв'язаним з вищеприведеним, вважається механічна довговічність. За [] необхідно визначати, яка термостійкість найслабшої ланки

термометра; такою ланкою вважається чутливий елемент. Причому тут термоструктурні напруження є саме тим фактором, що обмежують ресурс роботи термометра. Дія їх стає особливо небезпечною у поєднанні із рекристалізацією, особливо, збиральною, притаманною полікристалічним термометричним матеріалам у діапазоні підвищених температур. Адже термоструктурні напруження діють на границях зерен, де посилюються на зернах великих розмірів. Тобто, у вищеприведеному критерії зростає характерний мінімальний розмір R , залежний від розміру зерна.

Існує низка розроблених конструктивних методів зменшення механічних напружень у чутливому елементі термометра, що зрештою призводить до покращення його експлуатаційних параметрів. У першу чергу, це – зміна конструкції термометрів. До прикладу, підвищена здатність витримувати ідентичні робочі режими властива саме тим термометрам, у яких термопари вільно розміщені в конструкції, інакше «люфт» конструкції сприяє пом'якшенню наслідків дії термоструктурних напружень, що виникають внаслідок жорсткості конструкції, виконаної із елементів з різними лінійними коефіцієнтами теплового розширення. Свого часу, при виконанні унікального термометра для вимірювання температури при входженні в атмосферу планети, авторами була запропонована конструкція термометра опору, де витки чутливого елемента вільно лежали на сітці ізолятора []. Для термоелектричних термометрів місцем найімовірнішого виникнення відмови є гарячий спай, оскільки при зварюванні його під час виготовлення матеріал термоелектродів рекристалізується і обрив відбувається саме в цих зонах, по місцях границь грубих зерен. Тому набула поширення конструкція термометра [], де операція формування гарячого спаю зварюванням була успішно замінена обтискуванням його танталовим капіляром, що водночас не тільки знижувало рівень механічних напружень у термометричному матеріалі, але й сприяло зниженню інтенсивності хімічних реакцій в околі гарячого спаю, адже за високих температур тантал певний час виступав у ролі губки газоподібних домішок.

7. Висновки

Важкі умови експлуатації температурних термоперетворювачів, що передбачають їх циклічний цикл, вимагають особливої уваги до вивчення процесів, що відбуваються в їх конструктивних елементах, зокрема в термометричних матеріалах. Експлуатаційний вплив на спричиняють дрейфу термометричних характеристик через вплив кількох основних факторів, якими, здається, є термоструктурні напруження. Згадане наведене за результатами проведених досліджень. За винятком традиційних полікристалічних матеріалів термопар, що підлягають впливу рекристалізації, сучасні матеріали, такі як рідкі метали та розплави, позбавлені цього недоліку. Монокристалічні матеріали також характеризуються низькою інтенсивністю термоструктурних напружень, тому його термометричні характеристики набагато стабільніші. Металеві шкла перебувають у подібній ситуації, оскільки тут відсутні термоактивовані градієнти внутрішніх напружень, які спричиняють дрейф характеристик термопар. Тому їх відтворюваність термо-ЕРС є найкращою, а дрейф їх термо-ЕРС є найнижчим порівняно з традиційними матеріалами. Аналіз джерел нестабільності дрейфу термопар демонструє, що густина теплових і електричних потоків у напружених термоелектродах залежить не тільки від градієнта температури та електричного потенціалу, а й від градієнта напружень, виступаючи додатковим джерелом нестабільності.

Список літератури

- [1] S. Yatsyshyn, E. Mankovska, S. Mankovskyy, P. Skoropad. Model-based Diagnostic for Heavy Operating Conditions. *Sensors & Transducers. Part 6. v. 188. Issue 5. 2015. pp. 8-14.*
- [2] Bochvar A.A. Investigation of the mechanism and kinetics of crystallization of eutectic-type alloys. - M.: ONTI, 1935. - 82 p.
- [3] Sally I.V. Crystallization of alloys. - Kiev: Naukova Dumka. 1974. - 239 p.
- [4] Dulnev G.N. Heat and mass transfer in electronic equipment. - M.: Higher school. 1984. - 247 p.
- [5] F. Lieneweg. *Handbuch der technischen Temperaturmessung.* Braunschweig: Vieweg Verlag. 1976.
- [6] Anatyshuk L.I. Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook. - Kiev: Naukova Dumka. 1979. - 768 p.
- [7] Kuritnyk I.P., Rastorguev B.P. Electrometry in medicine: Scientific. overview. - M: VNIИ med. and med. - tech. inform. 1978. - 104 p.
- [8] Baughn J.W. Thermocouples and thermocouples Circuits: Gradient effects and graphical analysis using the absolute thermoelectric power // *ISA Transactions.* - 1985. - v. 24, №1. - P. 23 - 22.
- [9] Scheibner E.J. Solid-state physical phenomena and effects. Part. I // *IRE Trans.* - 1961. - Dec. CP 8. №4. - P. 133 - 151.
- [10] McDonald D.K.C. Thermoelectricity: An Introduction to the principles. - N-Y.: John Willey and Sons. 1962. - 216 p.
- [11] Zaiman J.M. Electrons and Phonons. - M: IL. 1962. - 488 p.
- [12] Roser W. Thermometry using thermoelectricity: Methods for measuring temperature. - M: IL. 1954. - 247 p.
- [13] Thaxur M.L., Singh S.P. On the origin of Seebeck EMF // *Indian J. Pure and Appl. Phys.* - 1981. - v. 19. - P. 160 - 162.
- [14] Frank J. Blatt, Peter A. Schroeder, Carl L. Foiles and Denis Greig. Thermoelectric power of metals. Press New York and London – 1976. - 248 p.
- [15] Jan J.P. Solid State Physics. Advances in Research and Application. - N-Y: Akad. Press. 1957. - v. 5. - P. 1 - 96.
- [16] Meissner W., Kehler M. *Handbuch der Experimentalphysik.* - Leipzig: Akad. Verlag. 1935. - Bd. 11, Teil 2. - S. 3111.

- [17] Orphan N.N., Petrashko V.V., Semenenko Yu.A. The influence of a strong magnetic field on thermo-emf. chromel-copel thermocouple // Instruments and experimental techniques. - 1980. - №1. - S. 273 - 274.
- [18] Rosspeintner M., Kolbe E., Ehrhardt W. Temperaturmessung mit Thermoelementen an induktiv erwärmten Werkstücken // Messen-Steuern-Regeln. - 1972. - Bd. 15. №2. - S. 62 - 66.
- [19] Alferov V.I., Bushmin A.S. An experimental study of the effect of an electrostatic field on a thermocouple reading // Engineering Physics Journal. - 1964. - v. 7. №6. - S. 135 - 136.
- [20] Lysikov B.V., Prozorov V.K., Vasiliev V.V. Temperature measurements in nuclear reactors. - M: Atomizdat. 1975. - 168 p.
- [21] Shimanskaya N.S. Calorimetry of ionizing radiation. - M: Atomizdat. 1973. - 328 p.
- [22] Markina N.V., Samsonov B.V., Tsykanov V.A. Changes in thermoelectromotive force depending on the intensity of the flow of reactor radiation // Physics of metals and metal science. - 1971. - v. 32. №4. - P. 747 - 750.
- [23] Gertsriken S.D., Novikov N.N. Study of quenching and leaving vacancies by thermo-emf. in Ag and Pt // Physics of metals and metal science. - 1960. - v. 9, №2. - S. 224 - 235.
- [24] Pearson V.B. Ultrapure metals. - M: Metallurgy. 1966. - 131 p.
- [25] Samsonov G.V., Pryadko I.F., Pryadko L.F. Configuration model of matter. - Kiev: Naukova Dumka. 1971. - S. 75 - 77.
- [26] Peschel J. Crystalline Field Effects in Metals: Thermoelectric Power // Zeitschr. Phys. - 1970. - v. 238, №2. - S. 99 - 109.
- [27] Stadnyk B.I., Kuritnyk I.P., Gamula P.R. Thermoelectric heterogeneity and internal mechanical stresses in a molybdenum wire // Thermophysics of high temperatures. - 1985. - v. 23. №3. - S. 563 - 567.
- [28] Campari M., Carriba S. Behavior of type K thermocouples: chromel-alumel thermocouples // Instruments for scientific research. - 1971. - №5. - S. 85 - 95.
- [29] Stadnyk B.I., Kuritnyk I.P., Savitsky E.M. Stability of thermo-emf. monocrystals of refractory metals // Thermal physics of high temperatures. - 1975. - v. 13, №2. - S. 403 - 406.
- [30] Novikov I.I., Gordov A.N., Stadnyk B.I., Fedik I.I. Mechanical stress and thermo-emf. // Thermophysics of high temperatures. - 1982. - №5. - S. 1176 - 1181.
- [31] Yatsishin SP, Gamula PR. Thermodynamic aspects of changes in thermoelectric properties of molybdenum wire // Interdepartmental. Science. - tech. collection: Control and measuring equipment. - Lviv: Higher school. Published by Lviv. un-ti. - 1993. - v. 50. - P. 67 - 72.
- [32] Prokhorenko V.Ya. Physical properties of the thermometric melt In-Ga-Sn // Thermophysics of high temperatures. - 1970. - v. 8. №2. - P. 374.
- [33] Prokhorenko V.Ya., Pazdriy I.P., Lakh O.I. Physical bases of operation of liquid metal temperature transducers // Resp. interscience. scientific-technical collection: Control and measuring equipment. - Lviv: Higher school. Publishing house near Lviv. un-te. - 1983. - issue. 33. - P. 108 - 116.
- [34] Gargill G.S. Structure of metallic Glasses // Solid State Physics. - 1975. - v. 30. - P. 227 - 289.
- [35] Stadnyk BI, Skoropad FI Application of metal alloys in the amorphous state for thermometric converters ASVOI // Thesis. report Zone. school-seminar: "Improving the efficiency of automated means of perception and processing of information." - Penza. - 1985. - P. 67.
- [36] Skoropad F.I. Application of amorphous alloys for thermoelectric converters // Thesis. report All-Union. seminar: "Semiconductor materials for thermoelectric converters". - Leningrad. - 1985. - P. 144.