

УДК 536.532

С.П. Яцишин¹, І.П.Курітник², Т.І.Домінюк¹¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”,² Технічно-гуманітарна академія, Бельсько-Бяле, Республіка Польща

МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕОДНОРІДНИХ І ДЕФОРМОВАНИХ ТЕРМОМЕТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРИКЛАДІ МОНО- І ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО МОЛІБДЕНУ З ПРИСАДКАМИ

© Яцишин С.П., Курітник І.П., Домінюк Т.І., 2003

Експериментальні дослідження термометричних матеріалів, виготовлених методом порошкової металургії, що характеризуються вихідною неоднорідністю та деформованістю, вимагають розробки спеціалізованої методології вивчення змін інтегральної термо-ЕРС, оскільки самі матеріали неперервно змінюють власний термодинамічний стан, що позначається на властивостях.

The investigation of thermoelectric materials, which were made by powder metallurgy and were characterized as initially inhomogeneous and deformed, is required the special metrology of TEMP studies, because the materials are continuously changing their thermodynamic state and therefore the main properties.

Постановка проблеми

Сукупність наукових та прикладних праць в галузі термометрії неминує зводиться до коректної постановки методології та методики вимірювань. Особливо це стосується матеріалів, які необоротно змінюють свої властивості. Саме такими є матеріали термопар, отриманих методом порошкової металургії [1].

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Існуючі методики досліджень змін інтегральної термо-ЕРС мають суттєвий недолік, який полягає у неспроможності окремого вивчення їх на різних зразках (а, тим паче, на одному зразкові). Це зумовлюється термодинамічними змінами, які відбуваються в досліджуваному матеріалі. Крім того, порівняно тривалий вихід гарячого з'єднання досліджуваної пари "деформований–недеформований" зразок на задану температуру істотно спотворює перебігаючі процеси та динаміку змін інтегральної термо-ЕРС.

Невирішена частина проблеми

Проблематика експериментальних досліджень металокерамічних матеріалів полягає у їх неоднорідності та деформованості у вихідному стані, що створює ряд труднощів у наступному вивченні та трактуванні змін їх властивостей.

Мета роботи – випрацювання ефективної методології та коректної методики експериментальних досліджень властивостей термоелектричних матеріалів, зокрема деформованих та структурно неоднорідних металів на прикладі молібдену з присадками.

Результати досліджень

Методологія роботи. Розроблено нову просту методику, яка характеризується ширшими можливостями для вивчення процесів, що відбуваються у термоелектродному матеріалі термопар. Суть методики є така. Утворюють термопару, один електрод якої є вихідним і недеформованим (електрод порівняння), а інший, досліджуваний – механічно деформований (наприклад, волочінням). Термопару встановлюють у високотемпературну піч. Температуру гарячого з'єднання підвищують рівномірно зі швидкістю 0,5–1,0 К/с, вимірюючи при цьому інтегральну термо-ЕРС. Така методика, завдяки сталій швидкості нагрівання (що забезпечує відтворення термодинамічних умов), дозволяє досліджувати та розділяти в одному експерименті вплив на інтегральну термо-ЕРС напружено-деформованого стану, його дисипації та поетапної релаксації.

Матеріали досліджень. Проведено дослідження полі- і монокристалічного молібдену з різними вмістом присадок та структурним станом. Матеріали деформувались пружно-пластичним волочінням через фільтри на 7,8 %, 15,0 %, 26,4 %, що відповідає зменшенню діаметра термоелектродних дротів від 0,5 мм до 0,48 мм, 0,46 мм та 0,43 мм, відповідно.

Додатково вивчався вплив термоудару зануренням у рідкий азот на термоелектричні властивості протягнутого дроту. Для цього з деформованого та недеформованого матеріалів утворювали термопару, яка встановлювалась у мідному блоці на глибині 50 мм. Надалі блок занурювали у рідкий азот. Після досягнення температурної рівноваги (при 77 К) блок з термопарою нагрівали зі сталою швидкістю 0,5 К/с. Одночасно контролюючи температуру робочого з'єднання (охолодженого) та температуру в місці виходу термопари з мідного блока, фіксували значення її термо-ЕРС. При дослідженні впливу присадок на формування напружено-деформованого стану електродом порівняння служив дріт із полікристалічного молібдену марки НЧМ.

Вихідні умови експерименту. При розробці методології врахували те, що зміни інтегральної термо-ЕРС деформованих матеріалів відносно недеформованих слід вивчати в таких умовах (температура, час), щоби за час досліджень не встигала відбуватися релаксація.

З температурою неперервно зростає швидкість релаксації попередньо внесеної енергії деформації, що позначається на термо-ЕРС. Ці процеси відбуваються, починаючи з температури, яка збігається з температурою знеміцнення. У пропонованому методі температурні зміни відбуваються одночасно не на всій довжині термоелектродного матеріалу, а лише в зоні гарячого з'єднання. Оскільки розподіл температури вздовж термоелектрода є рівномірним, то до досягнення гарячим з'єднанням температури знеміцнення зафіксовані зміни термо-ЕРС можуть бути зумовлені різницею коефіцієнтів термо-ЕРС досліджуваного термоелектроду та термоелектроду порівняння: $\Delta\alpha_{def} = \alpha_{def} - \alpha_{undef}$ і величиною поперемного градієнта температури $\Delta T|_{T_0}^{T_{unstr}}$. Коли гарячий з'єднання досягає температури знеміцнення, то зміни, які відбуваються в ньому, зумовлюються релаксаційною дисипацією попередньо нагромадженої при деформуванні енергії й поступово переводять матеріал із нестационарного у стаціонарний нерівноважний стан, який буде відмінним від аналогічного стану недеформованого матеріалу.

Вплив полігонізації, рекристалізації та інших факторів

Причиною знеміцнення може виявитись полігонізація, розвиток якої здатен запобігти перебігові рекристалізації при подальшому підвищенні температури. Із зростанням ступеня деформування співвідношення швидкостей полігонізації та рекристалізації зменшується. Так, коли при $\varepsilon = 15,0$ % рекристалізація згідно з [2] не відбувається навіть внаслідок нагріву до температури плавлення, то при $\varepsilon = 26,4$ % температура рекристалізації становить 1500 К при тривалому нагріванні. У результаті, починаючи з певної температури, відбуваються зміни лінійності температурної залежності нестабільності інтегральної термо-ЕРС. Фізичною основою спостережених змін вважається, передусім, створення градієнта хімічного потенціалу вздовж досліджуваного термоелектрода. Внаслідок анігіляції дислокацій протилежних знаків при полігонізації звільнюється внутрішня енергія [3], здатна зумовити зміни інтегральної термо-ЕРС Δe . Вважаючи термо-ЕРС термоелектрода порівняння сталою, її можна подати:

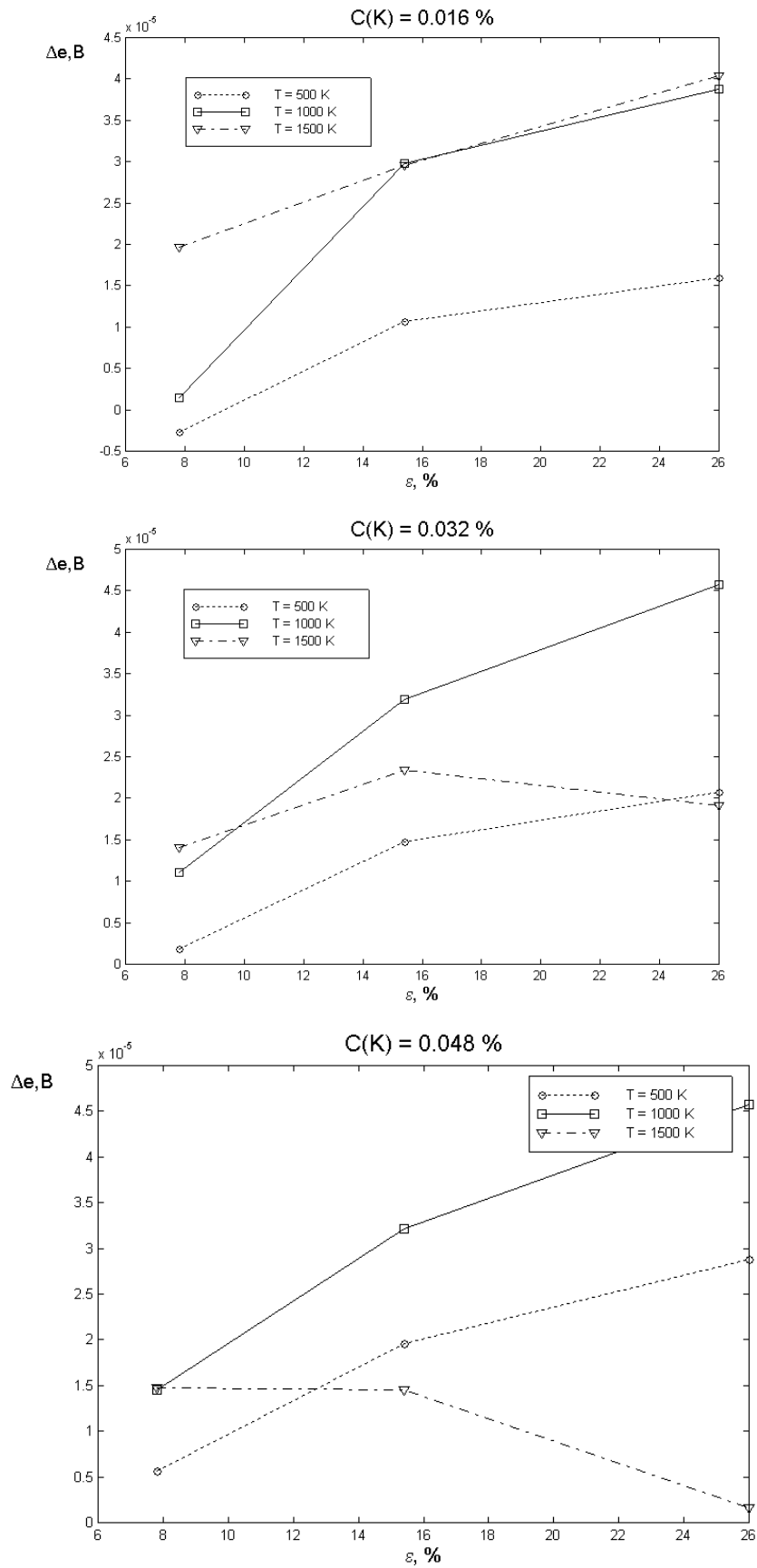
$$\Delta e = \int_{x|_{T_c}}^{x|_{T_{pol}}} \Delta \alpha_{def} \nabla_x T dx + \int_{x|_{T_{pol}}}^{x|_{T_h}} \Delta \alpha_{an} \nabla_x T dx. \quad (1)$$

Перша складова рівняння є сталою, коли гарячий злут досягає температури полігонізації, незалежно від подальшого підвищення температури, внаслідок того, що на довжині термоелектрода постійно існує ділянка, в межах якої температура змінюється від температури холодного злуту до температури полігонізації. Вона визначається ступенем деформування матеріалу та значенням $T_{pol} - T_c$. Друга складова неперервно змінюється як внаслідок неперервного підвищення температури злуту T_h , так і через зміну $\Delta \alpha$ від $\Delta \alpha_{def}$ до $\Delta \alpha_{an}$.

Результати

При відновленні відпалюваною ділянкою деформованого термоелектродного дроту власних термоелектричних властивостей ($\Delta \alpha_{an} = 0$) термо-ЕРС визначається винятково першою складовою рівняння (1). Залежність $\Delta e = \Delta e(t)$ виглядає як крива, що досягає насичення. Виявлені зміни термо-ЕРС молібденового термоелектрода наближаються до нуля з підвищенням температури до 1900 К (див. рисунок). Це вказує на те, що поряд з ділянкою, матеріал якої перебуває у деформованому стані, а зміни термо-ЕРС є позитивними, існує ділянка з полігонізованою структурою, якій притаманні негативні зміни інтегральної термо-ЕРС. Можливо, негативне значення свідчить про утворення структури матеріалу зі зниженим значенням хімічного потенціалу за рахунок впорядкування.

Вплив вмісту кремнієлужної присадки на вигляд досліджуваної залежності узгоджується з відомими положеннями [2] про те, що температурний коефіцієнт швидкості процесів відпочинку та полігонізації металів з присадками є дещо вищим порівняно з чистими металами. Внаслідок цього монокристалічний молібден, який вирізняється підвищенням у 1,25 раза вмістом присадки по домішці калію порівняно з оптимальним значенням $2n$, при деформації 15,0–26,4 % змінює термо-ЕРС інтенсивніше, порівняно з



Температурні зміни термо-ЕРС деформованого полікристалічного молибденового дроту залежно від вмісту легуючої присадки

матеріалами з оптимальним та зниженим вмістом присадки. Що стосується матеріалу, деформованого на 7,8 %, то інакший вигляд досліджених температурних залежностей термо-ЕРС можна пояснити різним характером перебігу процесів з утворенням мало- та великокутових границь субзерен. Крім того, вплив деформування на молібден з нижчим вмістом присадок може свідчити про специфічний механізм зміни властивостей, зв'язаний з переміщенням присадок із границь в об'єм зерен [4].

Вплив динамічного звороту

Вважаємо, що різка зміна температури попередньо волочених матеріалів створює в них нестационарний нерівноважний стан. Останній є притаманним динамічному звороту. Цей стан створюється не лише енергією, нагромадженою матеріалом внаслідок швидкої зміни температури, але й енергією, нагромадженою при волочінні. Як результат, виникнення температурних напружень (правда, протилежного напрямку) він близький до стану, зауваженого [5] при опроміненні молібдену лазерним пучком. Не виключаємо можливості створення нестационарного нерівноважного стану також і в термоелектроді порівняння, якого попередньо не деформували. Механічні напруження у ньому повинні бути незрівнянно менші та не спроможною впливати істотно на термо-ЕРС. Можна також вважати, що стан, близький до вказаного, притаманний обом термоелектродам на частині довжини, поза межами дії на них рідкого азоту, де швидкість зміни температури при охолодженні, принаймні, на порядок менша, порівняно зі швидкістю зміни температури всередині мідного блока.

Зважаючи на вказані уявлення, інтегральну термо-ЕРС подамо у вигляді двох складових: власне деформаційної складової змін інтегральної термо-ЕРС $\Delta\alpha_{def}$ (в межах вимірювального блока) [6] й складової динамічного звороту $\Delta\alpha_{ret}$ (поза вимірювальним блоком):

$$\Delta e_{\Sigma} = \Delta e_{def} + \Delta e_{ret} = \int_{273K}^{T_c} \Delta\alpha_{def} dT + \int_{T_c}^{T_h} \Delta\alpha_{ret} dT,$$

де $T_c; T_h$ – відповідно температури холодної та теплої зон вимірювального блока. Враховуючи незначну відмінність температур $T_c; T_h$ та порівняно велику різницю у змінах термо-ЕРС $\Delta\alpha_{def}$ та $\Delta\alpha_{ret}$, можна розділити вплив деформації й вплив динамічного звороту так:

$$\Delta e_{\Sigma} = \int_{273K}^{T_h} \Delta\alpha_{def} dT + \int_{T_c}^{T_h} (\Delta\alpha_{ret} - \Delta\alpha_{def}) dT.$$

Це дає змогу з невеликою методичною похибкою усунути з отриманих результатів $\Delta e_{\Sigma}(T)$ вплив деформованого стану термоелектродів на всій довжині досліджуваної термопари й виділити вплив динамічного звороту на інтегральну термо-ЕРС:

$$\Delta\alpha_{ret} \approx \frac{\Delta e_{\Sigma} - \Delta\alpha_{def} \Delta T|_{273K}^{T_h}}{\Delta T|_{T_c}^{T_h}}.$$

Оскільки встановлено, що $\Delta T|_{T_c}^{T_h} \approx 0,02 \Delta T|_{273K}^{T_h}$ і практично не залежить від величини T_h , то

можна отримати температурну залежність $\Delta\alpha_{ret} = \Delta\alpha_{ret}(T)$: $\Delta\alpha_{ret} \approx 50 \frac{\Delta e_{\Sigma} - \Delta e_{def}}{\Delta T|_{273K}^{T_h}}$. Вона є

прямою лінією, що й можна було б передбачити як наслідок ділення близької до параболічної залежності $\Delta\alpha_{ret}$ на лінійну залежність $\Delta T|_{T_c}^{T_h} \approx 0,02 \Delta T|_{273K}^{T_h}$. Викладене свідчить про те, що нестационарний нерівноважний стан термоелектродного матеріалу релаксує в напрямку до стаціонарного нерівноважного стану експоненційно з температурою. Характер змін можна вважати близьким до дифузійного [6]:

$$\Delta\alpha_{ret} \approx A \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \right] t \right\}^{1/2},$$

де E_a – енергія активації процесу, який відповідає за перебіг релаксації; A – коефіцієнт пропорційності. Температуру підвищували рівномірно з часом $t = BT$, де B – 2 с/К згідно з умовами експерименту. В області низьких температур, коли $\exp(-E_a/kT) \ll 1$, останнє

рівняння спроститься до: $\Delta\alpha_{ret} = AT \left(\frac{kB}{E_a} \right)^{1/2}$. Воно описує пряму лінію, нахил якої

пропорційний енергії активації процесу, відповідального за релаксаційні зміни (при відомій або визначеній величині A). Користуючись цим виразом, можна оцінити енергію активації. Згідно із здійсненою нами оцінкою вона значно більша від енергії kT , яка дорівнює 0,025 еВ при кімнатній температурі, й пропорційно менша при нижчих температурах. Визначеному значенню, на нашу думку, може відповідати енергія активації пересування дислокаційних перегинів.

Порівняно велике значення $\Delta\alpha_{ret}$, співвимірне з $\Delta\alpha_{def}$, зумовлене доволі значними деформаціями та напруженнями, які розвиваються при динамічному звороті, порівняно із звичайним деформуванням, наприклад, волочінням.

Висновок

Отже, тут на основі розробленої оригінальної методики проведені експериментальні дослідження інтегральної термо-ЕРС моно- і полікристалічного молібдену з присадками, що дозволяє проаналізувати особливості механізму впливу присадок й визначити їх роль у формуванні напружено-деформаційного рельєфу матеріалу. Цим створюються підстави розвитку прикладної бази розробки термометричних матеріалів з покращеними метрологічними характеристиками.

1. Стаднык Б.И., Куритнык И.П., Гамула П.Р. Термoeлектрическая неоднородность и внутренние механические напряжения в молибденовой проволоке // *Теплофизика высоких температур*. – 1984. – Т. 23. – № 3. – С. 563–567. 2. Лариов Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. – К.: Наукова думка, 1980. – 279 с. 3. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., С.А. Фирстов. Физические основы прочности тугоплавких металлов. – К.: Наукова думка, 1975. – 315 с. 4. Окраинец П.Н., Моисеева И.В., Пищак В.К. Особенности ползучести

молибдена при различных температурах // *Металлофизика*. – 1988. – Т. 10. – № 2. – С. 55–59. 5. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 301 с. 6. Б.И. Стадник. Новый критерий оценки неустойчивости термо-ЭДС термоэлектрических преобразователей // *Теплофизика высоких температур*. – 1980. – Т. 18. – № 4. – С. 826–833.

УДК 621.317.7

М.В. Наконечний, Ю.М. Наконечний

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

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОФАЗНОГО КЕРОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ВАЛА АСИНХРОННОГО ДВОФАЗНОГО ДВИГУНА

© Наконечний М.В., Наконечний Ю.М., 2003

Розглянуто математичну модель двофазного керованого генератора в пристрої управління двофазним двигуном.

The mathematical model of a two-phase controlled generator in two-phase engine control device is considered.

1. Постановка проблеми

В ряді випадків для покращання динамічних характеристик систем автоматичного керування застосовується частотний спосіб керування виконавчими механізмами. При цьому для забезпечення необхідних фазових співвідношень в системі частота і фаза опорних сигналів повинні змінюватися згідно із змінами величини і знака похибки розузгодження.

Для розв’язання вказаних задач використовуються частотокеровані двофазні генератори, які поряд з можливістю плавного керування швидкістю обертання вала двигуна дозволяють змінювати напрям його обертання зміною полярності керуючої напруги.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вивчення принципів формування і генерування квадратурних сигналів й способів реалізації пристроїв їх одержання показало, що найбільш перспективними з точки зору забезпечення плавності керування частотою вихідних сигналів і можливості зміни фази між ними, а також стабілізації їх амплітуди є двофазні керовані генератори з пристроями стабілізації амплітуди сигналів автоколивних систем, які виконані на основі сигнальних обернених зв’язків [2]. Принцип побудови таких двофазних керованих генераторів базується на моделюванні системи диференціальних рівнянь.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \omega y, \\ \dot{y} &= -\omega x,\end{aligned}\tag{1}$$