

Каждый  $n$ -й результат измерений определялся как среднее из, соответственно,  $N = 40, 20$  и  $10$  отсчетов значений сопротивления измеряемого объекта. Приведенные данные показывают, что на интервале в несколько суток СКО результатов измерения находится в пределах  $(2-8) \times 10^{-8}$  (эквивалентная чувствительность по температуре составляет  $5-20 \mu\text{K}$ ).

СА300 по основным метрологическим характеристикам не уступает лучшим мировым образцам. В то же время он имеет в пять раз меньшие габариты и

вес, минимальное электропотребление, встроенную термостатированную меру сопротивления, что упрощает его эксплуатацию и повышает мобильность. Мост прошел апробацию в ведущих метрологических центрах Украины и России. Несколько экземпляров моста используются во ВНИИМ г. Санкт-Петербург и ВНИИФТРИ Московская обл. В процессе эксплуатации экспериментально подтверждены высокие метрологические характеристики термометрического моста СА300.

УДК 536.1

## СТАТИСТИЧНО-ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ СТАБІЛІЗАЦІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Стадник Б.<sup>1,2</sup>, Яцишин С.<sup>1</sup>, 2003

<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка", кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

<sup>2</sup>Ряшівська політехніка, вул. В. Поля, 235-959, Ряшів, Польща

*На підставі сукупності експериментальних досліджень з позицій термодинаміки нерівноважних процесів обґрунтована статистично-деформаційна модель стабілізації метрологічних характеристик термоперетворювачів.*

*На основании совокупности экспериментальных исследований с позиций термодинамики неравновесных процессов обосновывают статистически-деформационную модель стабилизации метрологических характеристик термопреобразователей.*

*According to experimental investigations and thermodynamics of unbalanced processes there were based statistic-deformation model of stabilization for transducers' metrology characteristics.*

**Вступ.** Сучасні технологічні процеси мікроелектроніки, що часто містять елементи нанотехнологій, вимагають точності вимірювання температури, близької до еталонних засобів. Водночас, вимірюючи температуру за допомогою перетворювачів температури (надалі – ПТ), на практиці вважають, що існує можливість підвищити їх точність, використовуючи конструктивно-технологічні прийоми на етапі проектування й виготовлення. Досягти такої точності із застосуванням лише традиційних методів уже неможливо. Виникла необхідність реалізувати прийоми мікроелектронного рівня та керувати термодинамічними процесами, що відбуваються в об'ємі та на поверхні матеріалу чутливого елемента (ЧЕ) ПТ.

**Постановка проблеми.** У [1, 2] запропоновано феноменологічний підхід з використанням елементів термодинаміки, в основу якого покладено напружений

стан матеріалу ЧЕ. На підставі встановленого збільшення енергії Гіббса  $\sigma^2/k_U$  для ПТ обґрунтовано введення додаткових, зумовлених цією енергією, термодинамічних потоку й сили  $\bar{X}$ :  $\bar{X} = \nabla(\sigma^2/2k_U) = \sigma/k_U \nabla \sigma$ .

**Недоліки та способи їх вирішення.** Хоча подальші експериментальні дослідження характеризуються певною систематикою та строгістю, проте не було розвинуто концептуальний механізм урахування дії згаданих термодинамічної сили та термодинамічного потоку на номінальні статичні характеристики (НСХ). Ускладнює ситуацію залежність механічних властивостей від температури. Крім того, реальні матеріали ЧЕ переважно не підлягають безпосередній дії зовнішніх механічних напружень,

якими переважно моделюють експлуатаційні чинники. Слід також враховувати, що різні види деформацій притаманні різним матеріалам ЧЕ, залежно від технології їх виготовлення.

**Метою статті** є розгляд такого засобу впливу на метрологічні характеристики перетворювачів температури, як статистично-деформаційний чинник, різний для матеріалів чутливих елементів різного походження та фізичного стану – рідкого, твердого (монокристалічні та плавлені матеріали), чи проміжкового (металеві стекла), причому важливою вважають характеристику виду деформування: пружне, пластичне, в'язке чи їх комбінації.

**Експериментальна частина.** У матеріалі ЧЕ існує ієрархія структурних рівнів стосовно деформування (руйнування), що не дало змоги належно оцінити багатоплановість процесів, які відбуваються в матеріалах ЧЕ, і виділити переважаючі з них, відповідальні за зміну НСХ. Тому сукупність виконаних нами досліджень ґрунтувалась саме на усвідомленні цих понять. Два структурні рівні, крайні за масштабами, вважають жорстко заданими.

Перший із них – *макроскопічний рівень*, який описує ансамбль дефектів за допомогою функції розподілу, що плавно змінюється по об'єму. Він реалізований у термометрії за допомогою введення розподілених вздовж матеріалів ЧЕ, залежно від температури, електрофізичних властивостей або введенням параметрів класичної термодинаміки, що дає змогу прийти, зрештою, до електричних (термоелектричних) властивостей. Класичним прикладом цього типу праць є [3]. Пружне деформування також висвітлено у [4] (рис. 1). Вивчались зміни температури пружних твердих тіл (чисті благородні та перехідні метали) залежно від прикладеного зусилля при адіабатичній зміні його напружено-деформованого стану. Термоелектричним методом зафіксовано зниження температури у пружній області деформування. З переходом у область пластичного деформування зміни температури у локальних об'ємах деформованої речовини зменшувались за модулем.

Другий такий рівень – *мікроскопічний рівень*. Він стосується окремих дефектів ґратниці. Тут основні фізичні процеси – кінетика точкових дефектів, дифузійна пластичність і відповідні їм зміни термоелектричних властивостей. Прикладом подібної праці можна вважати [5].

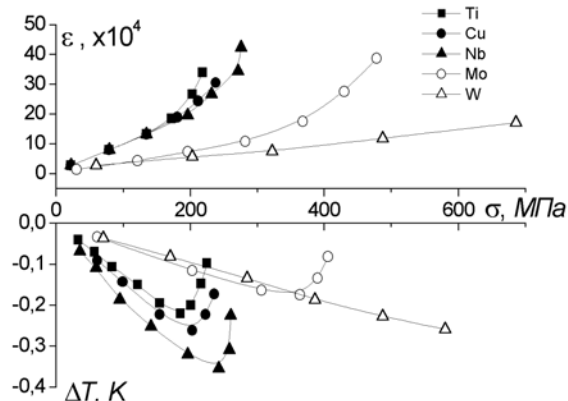


Рис. 1. Зв'язок механічних напружень та деформацій у пружній області зі зміною температури зразка, фіксованою термоелектричним методом [4]

Між цими рівнями розміщена *проміжкова область мезоскопічного рівня* ( $10^{-8} \dots 10^{-5}$  м). Тут відбуваються процеси докритичної еволюції деформованого матеріалу й можуть створюватись значні градієнти напружень. Потенціал деформації, за [6], в умовах відносного видовження зразків –  $10^{-4}$ , як наслідку залишкової пластичної деформації, становить 500 мкВ, що відображає зміна термоелектричних властивостей, зокрема термоелектричної неоднорідності дроту.

Процеси у цій області досліджувались нами на дротяних зразках матеріалів ЧЕ та тіл розжарення у світлотехніці [7]. Для оцінки термопружних механічних напружень, які виникають під час експлуатації, скористалися виразом:

$$\sigma = N_d \frac{Gb^2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{4\pi(1-\nu)}, \text{ де}$$

$N_d$  – густина дислокацій,  $1/\text{см}^2$ ;  $G$  – модуль зсуву;  $r_1$  – розмір кристала;  $r_0$  – діаметр ядра дислокації, що дорівнює  $10^{-7}$  см;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона. Коли розмір кристала співмірний з діаметром дроту рекристалізованого матеріалу ЧЕ (у вихідному стані він становить 1 мкм), то рівень внутрішніх механічних напружень на межі нерекристалізованої та рекристалізованої ділянок досягає 1,2 ГПа. Внаслідок цього зміни параметра кристалічної ґратниці призводять, за [8], до змін коефіцієнта термо-ЕРС.

Аналогічно [1] досліджено причини змін НСХ й показано визначальну роль структурного стану матеріалів ЧЕ, тобто роль структурного чинника при

зміні агрегатного стану матеріалів від твердого до рідкого. Оскільки роль далекосяжних полів механічних напружень незаперечна, становлять інтерес дослідження [9] впливу температурно-механічних чинників на зміни НСХ аморфних стопів – металевих стекл (бінарних стопів на основі системи Fe-B, а також потрійних та четверних стопів на їх основі). Структура їх близька до неупорядкованої структури рідини, а характер деформування – в'язкий. Встановлено, що у зоні аморфності стопів зміни НСХ не перевищували 0,01 мкВ.

Їх незначні за значенням зміни термоелектричних властивостей можуть свідчити про визначальну роль градієнта механічних напружень. У досліджуваних матеріалів відсутні границі зерен, рекристалізовані чи нерекристалізовані ділянки, тобто немає підстав до виникнення вказаного градієнта та зв'язаної з ним термодинамічної сили, здатної змінити НСХ.

Дуже цікаво порівняти з результатами дослідження [10] стабільності НСХ монокристалічних та плавлених високотемпературних матеріалів ЧЕ: W, Mo, Re, Ta, Nb та їх стопів. Відзначено високу відтворюваність НСХ при їх змінах до 1 К (10 мкВ). Проте зміни НСХ цих матеріалів значно вищі порівняно з металевими стеклами. Можливо, це зв'язано з вихідною мікроструктурною неоднорідністю монокристалів, яка на додачу може посилюватись під час вимірювань.

Виконані експериментальні дослідження нестійкості НСХ додатково підкреслили роль механічних напружень в матеріалах ЧЕ і значення їх концентраторів у формуванні змін НСХ, проте не висвітлили механізм дії. У цьому плані цікавими можуть виявитись дослідження [11], де зменшення реальної межі міцності матеріалів стосовно теоретичних значень пояснено наявністю концентраторів механічних напружень мезоскопічного рівня.

У прозорих для світла полімерних матеріалах, зокрема у поліетилентерефталату, на підставі аналізу спектрів комбінаційного розсіювання світла у смугі 632 1/см зафіксовано [12], при деформації розтягу й без неї, виникнення точкових випромінювачів з локальною температурою, що у 2...10 разів перевищувала середню. Наявність низько- та високо- частотних сателітів відносно основного максимуму (рис. 2) з максимумами відповідно при 624 та 640 1/см свідчить про існування мікроділянок розтягу та стиску відповідно. Зміщення частот на 8 1/см пояснено

деформацією міжатомних зв'язків у дефектах розтягу/стиску на:  $\varepsilon = \left| \frac{1}{G} \frac{\Delta v}{v} \right|$ , де G – модовий пара-

метр Грюнайзена,  $\frac{\Delta v}{v}$  – зміна частоти розсіювання

світла внаслідок багатогофонного захоплення. Так, захоплення фонів дефектом розтягу призводить до підвищення його локальної температури і зумовленого цим теплового розширення, що надалі може призвести до розриву міжатомних зв'язків і виникнення мікротріщини.

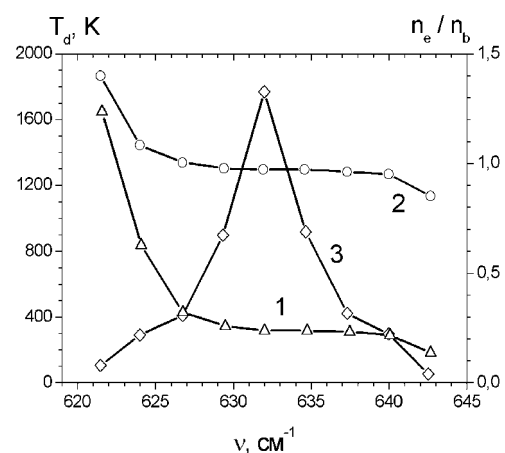


Рис. 2. Залежність локальної температури (1) і чисел заповнення фонів (2) від деформації міжатомних зв'язків у поліетилентерефталаті; 3 – вигляд відносної інтенсивності коливних смуг спектра комбінаційного розсіювання світла [12]

Використовуючи інтенсивність коливних смуг спектра комбінаційного розсіювання світла стоксової та антистоксової областей, були визначені кількості заповнення (захоплення) фонів  $n$  дефектами розтягу та стиску. Якщо в останніх вони є значно меншими від рівноважних, визначених з формули Бозе–Ейнштейна, то у дефекту розтягу вони, навпаки, значно вищі від рівноважних. Локальна температура останнього (лінійним розміром до 10 атомів) знайдена

як  $T_d = \frac{h\nu}{k[\ln(n+1) - \ln n]}$  і наведена на рис. 2.

Точкове збільшення температури на згаданих дефектах є відчутним для матеріалів ЧЕ ПТ, де зміна розподілу механічних мікронапружень в околі термофлуктувальних дефектів накладається на відповідну зміну розподілу хімічного потенціалу. З рівняння Гіббса–Дюгема можемо отримати вираз:

$S \frac{dT}{dt} = \varepsilon \frac{d\sigma}{dt}$ , який придатний для описання впливу температурних змін через деформаційний рельєф на метрологічні характеристики ПТ.

Виділення дефектів розтягу як фізично елементарних підсистем квазічастинкового мезоскопічного рівня дає змогу за допомогою відповідного усереднення ввести термодинамічні величини, тобто обґрунтувати застосування статистичної термодинаміки нерівноважних процесів до проблем нестабільності НСХ матеріалів ЧЕ термометрії. Це забезпечує підстави для розвитку *статистично-деформаційної моделі нестабільності НСХ ПТ*.

Для мікроструктурних дефектів її впровадження можливе через врахування мікророзподілу температурних коефіцієнтів лінійного розширення. У полікомпонентних системах твердих тіл (матеріалів ЧЕ) внаслідок існування такого спектра будь-які зміни температури призводять до виникнення внутрішніх механічних напружень, що відзначалося у [13]. У вольфрамовій матриці з включеннями карбіду вольфраму напруження можуть досягати 15 ГПа, зумовлюючи дуже істотні зміни НСХ.

Згідно з [12] флуктуаційне видовження міжатомних зв'язків у дефектах розтягу та значення обумовленого цим теплового розширення становили 3–9 %, а відхилення локальної температури від середньостатистичної температури досягали 5–10-кратних значень залежно від зовнішніх навантажень (рис. 3). Енергетичне підґрунтя еволюції дефектів розтягу досліджено у [11]. Показано, що дефект може житись енергією від роботи зовнішніх сил, прикладених до матеріалу. Інакше, навантаження, зокрема термоструктурні та термоцикловальні, здатні підживлювати дефекти розтягу, переводячи їх у критичні. Останні можуть розпадатись, перетворюючись у мікротріщини. Теплові флуктуації вважають "спускним гачком", який дає змогу перетворювати прикладену до матеріалу ЧЕ енергію в мікротріщини. Причому зародження останніх нерозривно пов'язано з виділенням і перерозподілом енергії, що на порядки перевищує енергоємність елементарних актів деформування.

Для перевірки цього припущення виконано експериментальні дослідження пропускання світла крізь волокна поліпропілену (рис. 3) під навантаженням. Зі збільшенням механічного навантаження (криві 1 → 3) локальна температура дефектів зростає. Своєю чергою, додаткове розігрівання сприяє

локальному видовженню зразків. Тобто механічне навантаження у такому разі не є безпосередньою причиною деформації, а лише опосередкованою причиною, зумовлюючи згаданий мікророзігрів матеріалу. Це проявляється у результатах дослідження, наведених на рис. 4. Тут за результатами пропускання світла крізь зразки різної міцності визначено локальні температури дефектів розтягу. Вони виявились однаковими (950 К) в момент розриву, що є вагомим аргументом на користь визначальної ролі мікроконцентраторів напружень. Фізичний механізм процесів, які відбуваються, описано у [14] на підставі досліджень шумових ефектів, зокрема 1/f-шумів.

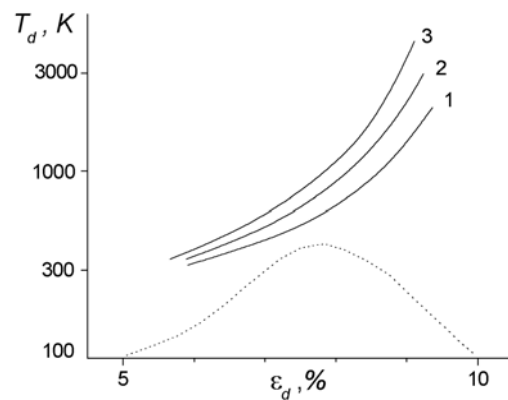


Рис. 3. Залежність локальної температури дефектів розтягу  $T_d$  від видовження міжатомних зв'язків  $\varepsilon_d$  у поліпропілені при 300 К та зовнішніх механічних напруженнях  $\sigma$ : 1 – 0; 2 – 40 кг/мм<sup>2</sup>; 3 – 60 кг/мм<sup>2</sup> (пунктир – низькочастотний сателіт) [12]

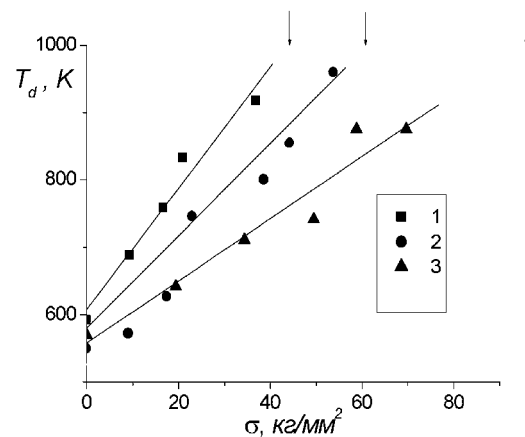


Рис. 4. Залежність локальної температури дефектів розтягу  $T_d$  від зовнішнього механічного навантаження  $\sigma$  при 300 К для поліпропілену різної міцності: 1 – 40 кг/мм<sup>2</sup>; 2 – 60 кг/мм<sup>2</sup>; 3 – 110 кг/мм<sup>2</sup> (стріжки – значення розривного навантаження) [12]

**Використання методології статистичної термодинаміки нерівноважних процесів.** Зазначений модельний підхід цінний саме тим, що дає змогу розглядати не тільки термодинамічну систему матеріалу ЧЕ у зв'язку із довкіллям, але й вникати у суть флуктуаційних процесів, що відбуваються в самому матеріалі і частково описані вище.

Основа цього підходу така. Макроскопічний, ледь нерівноважний стан системи розглядають як значну флуктуацію. Тому градієнти температури, густини, об'єму тощо, створені у термодинамічній системі матеріалу ЧЕ зовнішньою дією, підпорядковуються тим самим статистичним закономірностям, що й градієнти, які виникли внаслідок самовільних флуктуацій [15]. Множини параметрів впливу на НСХ логічно й стисло описують рівнянням балансу енергії (потужності) для узагальнених координат.

Аналізуючи процеси у матеріалах ЧЕ ПТ, достатньо розглядати такі термодинамічні складові: теплову складову, що визначає ентропійну спрямованість процесів; електрохімічну складову – основну для ПТ; а також механічну складову, співмірну за впливом щодо електрохімічної складової. Основне рівняння термодинаміки можна подати у частинних похідних – у вигляді балансу потужностей:

$$T \frac{dS}{dt} = \frac{dU}{dt} + p \frac{dV}{dt} - \eta \frac{dN}{dt},$$

де  $S$  – ентропія;  $T$  – температура;  $U$  – внутрішня енергія;  $p$  – тиск;  $V$  – об'єм;  $\eta$  – електрохімічний потенціал;  $N$  – кількість носіїв.

Це рівняння справджується у деякій області поза рівноважною, зокрема за наявності деформації, де внаслідок технологічних чинників виготовлення ЧЕ чи навіть термометричного матеріалу вона є значною, а також при істотній внутрішній енергії, як для аморфних стопів. За умови пружного континууму з дислокаціями, коли  $dU/dt \rightarrow 0$ , складову  $p dV/dt$  замінюють добутком тензорів деформацій  $\hat{\epsilon}$  та напружень  $\hat{\sigma}$ :  $p \frac{dV}{dt} = \hat{\sigma} \frac{d\epsilon}{dt}$ . У результаті вираз набуває вигляд, придатний для описання матеріалів ЧЕ ПТ:

$$T \frac{dS}{dt} = -\eta \frac{dN}{dt} + \sigma \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Оскільки електрохімічний потенціал  $\eta$  визначають через хемічний потенціал  $\mu$  та електричний потенціал  $\phi$ :  $\eta = \mu + e\phi$ , де  $e$  – заряд електрона; то

останнє рівняння видозміниться внаслідок розділення електрохімічних шумів на суто електричні та хімічні шуми:

$$T \frac{dS}{dt} = -\mu \frac{dN}{dt} - \phi \frac{dQ}{dt} + \sigma \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Як видно з рис. 5, матеріалу ЧЕ ПТ найхарактерніші 4 ступені вільності, що відповідають чотирьом складовим рівнянням: електричному, тепловому, масовому та механічному ступеням з відповідними до них процесами перенесення. Спряження процесів перенесення через відповідні ступені вільності: електричну та теплову – у матеріалах ЧЕ дає змогу визначати вид НСХ різних видів ПТ (термоелектричних, терморезистивних та термошумових). Подібне стосується спряження електроперенесення та масоперенесення, які формують флуктуаційно-дисипаційні відхилення НСХ, названі *електрохімічними шумами* і визначають відхилення або зміни НСХ тих самих ПТ. Розгляд інших пар спряжених термодинамічних сил та потоків, з підключенням до електроперенесення механічно-деформаційні сили й потік, дає змогу вважати зумовлені ними флуктуаційно-дисипаційні відхилення НСХ як спричинені *електромеханічними шумами*.

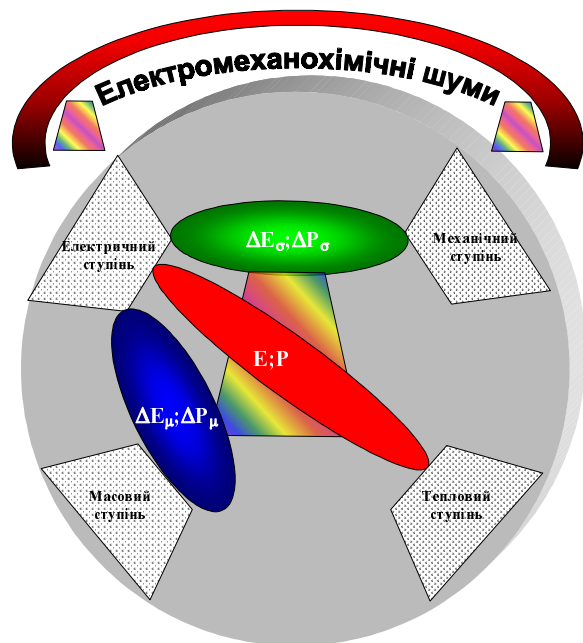


Рис. 5. Схема виникнення різних видів електромеханохімічних шумів ( $\Delta E, \Delta P$ ) у матеріалах ЧЕ ПТ; основні метрологічні характеристики та їх відхилення під дією електромеханічних та електрохімічних шумів

**Застосування статистично-деформаційної моделі до аналізу відомих експериментальних результатів.** У вихідному стані матеріал ЧЕ, часто деформований, перебуває в нестационарному нерівноважному стані. Тривалий високотемпературний відпал переводить матеріал у стаціонарний нерівноважний стан. Його можна вважати основним бажаним станом матеріалу ЧЕ під час експлуатації ПТ. Цей стан досягають після закінчення часу релаксації і він характеризується інтегральним значенням електромеханохімічних шумів, зафіксованих у електричній формі. Він нееквівалентний вихідному термодинамічному стану і зсунутий відносно приведенного значення на якусь величину. Так, термодинамічний стан матеріалу ЧЕ призводить до зміщення НСХ ПТ.

Зміни термодинамічного стану відбуваються й під час утворення критичного дефекту розтягу в момент, що передує утворенню мікротріщини. Відбувається еволюція дефекту від оборотної стадії, яку описують класичною термодинамікою, до необоротної стадії, що характеризують статистичною термодинамікою нерівноважних процесів. Процес закінчується вибухоподібним порушенням суцільності матеріалу, тобто появою у ньому мікротріщин [14]. Нагромадження останніх у матеріалі ЧЕ передує виникненню магістральної мікротріщини й механічній відмові, що характерно для низьких та середніх температур. Визначальним вважають нагромадження фононів у дефектах розтягу, який згідно з [12] характеризують логарифмічною залежністю між часом та флуктуаційним видовженням міжатомних зв'язків у дефектах. Тому зміни НСХ ПТ можуть описуватися відповідними залежностями. При високих температурах переважає поступова зміна НСХ з часом, тобто релаксація відбувається через трансформування шумів у хемічний бік. Тоді НСХ стабілізуються з часом, а їх зміни мають експоненційний характер.

Використання матеріалів ЧЕ з різною виробничо-технологічною передісторією (термічною; механічною) істотно змінює їх вихідний стан і характер проходження статистично-деформаційних процесів. Згідно з [14] чинником, який сприяє наростанню дисипативного потоку ентропії, може бути стрімка зміна температури матеріалу ЧЕ, зв'язана з перенесенням потоку тепла  $W$  через поверхню розділу:

$T \frac{dS}{dt} = -\frac{W}{T^2} \nabla T$ . Чим стрімкіше змінюють температуру й чим сильніший тепловий потік прикладають

до матеріалу ЧЕ, тим значніші відхилення від рівноваги виникають у ньому. Тепловий ступінь вільності впливає через електромеханохімічні шуми на зміни НСХ (рис. 5). Під дією термоударів ПТ істотно змінює НСХ. Флуктуаційно-дисипаційне відновлення нерівноважного стану матеріалу може не встигнути відбутися до моменту повторного термоудару: це трапляється при пониженій температурі й малій тривалості відпочинку в паузі між черговими термоударами. Тоді слід сподіватися подальшого посилення нерівноважності термодинамічного стану в матеріалі, пропорційно до кількості термоциклів  $n$ :

$$T \frac{dS}{dt} = -n \frac{W}{T^2} \nabla T \text{ і відповідно істотніших у } n \text{ разів}$$

змін НСХ. Саме такий стан, очевидно, було досягнуто [16] у нікель-молібденових стопах, де зафіксовано зміни (у десятки разів) коефіцієнта термо-ЕРС під дією термоударів.

Не менш перспективним способом подальшого розвитку термометрії в напрямку підвищення точності вважаємо освоєння новітніх технологій матеріалознавства. Зокрема, такою є технологія піноматеріалів, впровадження досягнень якої чекають найближчим часом. Термометрія має досвід використання високотемпературних матеріалів ЧЕ зі складними кремнієволужними присадками. Внаслідок їх спінення при високих температурах виникають пори, які стабілізують процеси рекристалізації і, тим самим, фіксують на певному рівні градієнти механічних напружень, приводячи, зрештою, до стабілізації НСХ [17]. Проте існує температурно-часово-деформаційна (статистично-деформаційна) межа, за якою піноматеріали видозмінюються, а вид ЧЕ: малі розміри, специфічна форма – у певний спосіб обмежують технологічні можливості і вимагають розвитку спеціальних методів введення присадок та розподілу мікропор у матеріалі, а також методів їх вивчення.

**Висновок.** Статистично-деформаційні чинники впливу на метрологічні характеристики термоперетворювачів, які зумовлюють значний і часто не прогнозований зсув НСХ, їх треба враховувати, використовуючи статистичну термодинаміку нерівноважних процесів. З одного боку, це створює потужний методологічний апарат аналізу відхилень НСХ для різних можливих випадків експлуатації, а з іншого боку, з'являється можливість коригування майбутньої поведінки матеріалів ЧЕ на етапі виготовлення.

1. Стадник Б.И., Куритный И.П., Гамула П.Р. Термоэлектрическая неоднородность и внутренние механические напряжения в молибденовой проволоке // Теплофизика высоких температур. 1985. – Т.23. – № 3. – С.563–567.
2. Гордов И.А., Новиков И.И., Стадник Б.И., Федик И.И. Механические напряжения и стабильность термо-ЭДС // Теплофизика высоких температур. 1982. – Т.20. – № 6. – С.1176–1181.
3. Лухвич А.А. О влиянии упругой деформации на термоэлектродвижущую силу металлов // ДАН БССР. 1968. – Т.12. – № 4. – С.315–318.
4. Баш В.Я. Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом. – К., 1984.
5. Адаменко О.А., Дехтяр І.Я. Вплив пластичної деформації на абсолютну термо-ЕРС латуні // Український фізичний журнал, 1968. – Т.13. – № 2. – С.225–231.
6. Гутман Е.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М., 1980.
7. Лахоцкий Т.В., В.С.Мордюк, Яцишин С.П. Об одном из механизмов разрушения тел накала электродов // Светотехника. 1988.
8. Стадник Б.И. и др. Термоэлектрические свойства тугоплавких металлов и сплавов // Теплофизические свойства твердых веществ. 1986. – С.88–91.
9. Скоропад П.І., Яцишин С.П., Гамула П.Р. Термоструктурна стабільність термоелектродів з металевих аморфних сплавів // Вимірювальна техніка і метрологія. 2002. – Вип.59. – С.53–59.
10. Пашинский Л.Н. Влияние пластической деформации на стабильность вольфрамниевых термоэлектрических преобразователей / Автореф. ... дис. ИПМ АН УССР. – К., 1987.
11. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика прочности и пластичности. – Л., 1986. – С.5–11.
12. Веттегрень В.И. Спектроскопическое изучение разрушающих флуктуаций плотности // Физика прочности и пластичности. – Л., 1986. – С.17–27.
13. Стадник Б.И. и др. Температурные измерения. Справочник. – К.
14. Колодій З.О., Луцик Я.Т., Стадник Б.І. та ін. Різновидні флюктуації в твердих тілах та концепція їх поєданого вивчення // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. 2002. – № 445.
15. Булатов Н.К., Лундин А.Б. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. – М., 1984.
16. Стаценко В.М., Смолин М.Д. Влияние внешних тепловых воздействий на структурно-чувствительные свойства никелевых сплавов // Изв. АН СССР. Металлы, 1985. – № 6. – С.187–189.
17. Домінюк Т.І., Яцишин С.П. До вивчення можливості термодинамічного врахування впливу механічних напружень і деформацій на термо-ЕРС // Вимірювальна техніка і метрологія. 2002. – Вип. 59. – С.66–69.