

МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ КАБЕЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ

© Олександр Гук, 2003

Науково-виробниче об'єднання "Термоприлад", вул. Наукова, 3, Львів, Україна

Виконано експериментальні дослідження для створення високоточних перетворювачів температури кабельного типу на основі енергетичного підходу.

Выполнены экспериментальные исследования по созданию высокоточных преобразователей температуры кабельного типа на базе энергетического подхода.

Experimental investigations of producing the high reliability cable type temperature transducers, based upon the thermodynamics, were made.

Вступ. Перетворювачі температури (надалі – ПТ) кабельного типу домінують в Україні та за рубежом, зокрема, в ядерній енергетиці [1]. Найпоширеніші ПТ кабельного типу з хромель-алюмелевими термопарами, які характеризуються високою чутливістю (до 44 мкВ/К) і достатньо значною механічною міцністю внаслідок наявності зовнішньої сталевий рурки. Метрологічні характеристики ПТ на основі термопарного кабелю повинні відповідати вимогам ДСТУ 2837–94 і ДСТУ 2857–94 [2].

Граничнодопустимі похибки ПТ на основі термопарного кабелю визначені [3,4] і становлять 0,8 % від значення вимірюваної температури за перші 1000 год. експлуатації та 0,93 % – за 25000 год. Але можна вважати, що ці значення не задовольняють сучасних вимог.

Метою роботи є покращання метрологічних характеристик кабельних ПТ для умов тривалої експлуатації (до 10000 годин) в енергетиці.

Об'єкт досліджень. Для дослідження було вибрано термопарні кабелі з широкоживаними НСХ типів ХА та ХК. ПТ (а інколи й термопарні кабелі) досліджували за температур, близьких до можливих експлуатаційних. На підставі запропонованого нижче методу екстраполювали виявлені залежності нестабільності НСХ на порівняно низькі температури, що, в результаті, дало змогу впровадити прискорений метод дослідження та розробки ПТ кабельного типу.

Досліджували термопарні кабелі з ізоляцією з периклазу (порошку на основі оксиду магнію). Діаметр термоелектродного дроту відповідно до діаметра кабелю 3,0 ... 0,5 мм коливався у межах від 0,10 до 0,03 мм. Конструктивно ПТ на основі термопарного кабелю виготовляли як з ізольованим, так і з неізольованим

гарячим зльотом, а якість зварювання контролювали рентгенівським та електричним способами. Зокрема, останній передбачав контроль цілісності електричного кола після дії серії термоударів на ПТ. Для цього злоти прогрівалися до 623–643 К упродовж 5 хв з подальшим охолодженням у воді або зрідженому азоті. Одночасно на електронній апаратурі записували перехідний процес зміни електричного опору термопари. У разі неякісного виготовлення гарячого зльоту фіксувалися викиди напруги, зумовлені стрімкою зміною електричного опору внаслідок обриву електричного кола, що свідчило про вихід ПТ з ладу. Низка досліджень дала змогу встановити, що для гарантованої перевірки якості гарячого зльоту достатньо виконати серію з трьох термоударів. Після такої перевірки ПТ витримували без руйнування близько тисячі термоударів.

1. Експериментальні дослідження

1.1. Вплив попереднього відпалу ПТ. Виконано низку досліджень для визначення змін НСХ ПТ різних діаметрів кабелів і, відповідно, термоелектродів внаслідок нетривалого (до 5 год.) попереднього відпалу. Мета останнього – забезпечення незмінності НСХ ПТ під час подальшої експлуатації. Результати досліджень наведено в табл. 1. Надалі ПТ з кабелями діаметрів 3, 0; 1,5; 1,0 мм тривалий час експлуатувались, відповідно, за 1273 К; 1573 К та за 1073 К (для діаметрів 1,5 і 1,0 мм). Експериментальними дослідженнями встановлено максимально можливі значення ресурсу роботи досліджуваних ПТ типу ТХА, які не перевищують для ПТ з діаметром кабелю 3,0 мм: за 1523 К – 18 год.; за 1273 К – 700 год.; для ПТ з діаметром кабелю 1,5 мм – за 1273 К приблизно 1500 год.; для ПТ з діаметром 1,0 мм – 700 год. За цей час НСХ змінився на $\pm 0,6$ К.

Таблиця 1

Зміни НСХ ПТ типу ТХА за результатами відпалу на повітрі за 823 К

Діаметр кабелю, мм	Тривалість відпалу, год.	Зміни НСХ, К
1,5	1 год.	2,7
	2 год.	3,1
	3 год.	2,9
	4 год.	2,6
	5 год.	2,5
1,0	1 год.	2,9
	2 год.	3,3
	3 год.	3,0
	4 год.	2,8
	5 год.	2,7

Отже, попередній відпал дав змогу зменшити відхилення НСХ в декілька разів, очевидно, внаслідок усунення внесених виготовленням механічних напружень. Можливо, певний вплив має перебіг перших стадій рекристалізації матеріалів термоелектродів.

Таблиця 2

Зміни НСХ ПТ типу ТХА (визначених за 823 К) внаслідок 10000 год. експлуатації на повітрі

Діаметр кабелю, мм	Температура експлуатації, К	Зміни НСХ, К
3,0	573	0,9
	673	1,1
	773	1,5
	873	1,4
	973	1,2
	1073	1,7
	1173	2,1
1,5	573	0,7
	673	1,1
	773	1,5
	873	1,5
	973	1,4
	1073	1,5
1,0	573	0,6
	673	0,9
	773	1,1
	873	1,3
	973	1,4
	1073	1,4
	1173	1,9

Отриманими результатами досліджень кабельних ПТ підтверджено дані [3, 4], згідно з якими в умовах відпалу зміни НСХ зумовлені не вибірковою окисдуванням компонентів термоелектродних матеріалів, як у традиційних ПТ некабельного типу, а процесами внутрішнього походження. Наприклад, таким вважається процес ближнього впорядкування, притаманний хроме-

левому термоелектроду за температур 600...800 К. За результатами виконаних досліджень ПТ кабельного типу (див. табл.1) було запропоновано здійснювати упродовж 3 год стабілізаційний відпал за 823 К, який дає змогу гарантувати стабільність НСХ у межах ± 1 К протягом часу 10000 год. експлуатації за 600...1073 К (табл. 2).

1.2. Вивчення граничнодопустимих умов відпалу. За вищих (>1100К) температур спостерігався вихід НСХ за допустимі межі $\pm 1,8$ К, що можна пояснити процесами рекристалізації, які призвели до зміни напружено-деформаційного рельєфу матеріалів.

1.3. Дослідження впливу циклічної зміни температури на НСХ ПТ.

1.3.1. ПТ кабельного типу. ПТ кабельного типу піддавали попередньому відпалу в режимах, характеристики яких подано у табл. 3 [7].

ПТ, виготовлені з відпаленого кабелю, надалі витримували упродовж 10000 год. за температур 1073 К (ТХА) і за 873 К (ТХК). Зміни НСХ не перевищили допустиму норму $\pm 1,8$ К і становили $\pm 0,7$ К. У початковий період спостерігались помітні зміни НСХ, які зменшувались зі збільшенням тривалості експлуатації. Після 8000 год. зміни не були зафіксовані. Тобто найважливішим є початковий період експлуатації. Особливо відповідальним можна вважати вихід на номінальну температуру експлуатації, коли бажано, щоб швидкість наростання температури не перевищувала 1 К/хв., що підтвердили результати відпрацювання режимів попереднього відпалу.

Отримано результати досліджень впливу цикло-змінних температур, виконані на дванадцяти однотипних зразках. Результати досліджень сукупності кабельних (з діаметрами 1,0–3,0 мм) ПТ, попередньо відпалених за умов, вказаних в табл. 3, упродовж N циклів експлуатації на повітрі зведено у табл. 4.

1.3.2. ПТ некабельного типу. Для об'єктивного контролю було виконано порівняльні дослідження в аналогічних умовах для ПТ некабельного типу. У табл. 5 наведено результати досліджень [5, 6] температурно-часових залежностей нестабільності НСХ, зокрема циклічної довговічності (до руйнування) хромель-алюмелевих термопар ПТ некабельного типу для різних діаметрів термоелектродів. За порівняно низьких температур тривалість циклу незначно впливає на довговічність. Для температур, що перевищували 1000 К, такий вплив помітніший. Зміни НСХ досягали 10 К, перш ніж відбувалося руйнування одного з термоелектродів.

Таблиця 3

Режими попереднього відпалу ПТ кабельного типу

Діаметр кабелю, мм	ХА		ХК	
	Температура, К	Час відпалу, год.	Температура, К	Час відпалу, год.
1,0	723	200	628	200
1,5	698	200	648	200
3,0	673	200	623	200

Таблиця 4

Дослідження стабільності НСХ ПТ внаслідок термоциклювання

Діаметр кабелю, мм	Режим температурно-часового відпалу	Зміни НСХ, К
3,0	12 циклів по 14 год. за 1523 К	1,6
	30 циклів по 14 год. за 1273 К	1,2
	100 циклів по 14 год за 1273 К	2,0
1,5	10 циклів по 14 год. за 1473 К	2,3
	100 циклів по 14 год за 1373 К	2,8
	40 циклів по 14 год. за 1273 К	2,2
	30 циклів по 14 год. за 1173 К	1,8
	15 циклів по 14 год. за 1073 К	1,2
0,35	10 циклів по 14 год. за 973 К	1,7

Таблиця 5

Зміни НСХ ПТ типу ТХА внаслідок відпалу та термоциклювання на повітрі

Діаметр термоелектродів, мм	Режим температурно-часового відпалу	Зміни НСХ, К
3,2	100 год. за 1473 К	6,8
	400 год. за 1473 К	7,5
	400 год. за 1273 К	4,1
1,5	500 год. за 1273 К	6,8
	600 год. за 1273 К	7,5
	300 год. за 1173 К	3,2
	200 год. за 1073 К	2,0
0,35	100 год. за 973 К	2,0
	300 год. за 873 К	1,8
	500 год. за 873 К	3,0
3,2	12 циклів по 14 год. за 1523 К	обрив
	30 циклів по 14 год. за 1273 К	6,1
	100 циклів по 14 год за 1273 К	10,0
1,5	10 циклів по 14 год. за 1473 К	Обрив
	100 циклів по 14 год за 1373 К	Обрив
	40 циклів по 14 год. за 1273 К	9,0
	30 циклів по 14 год. за 1173 К	4,0
	15 циклів по 14 год. за 1073 К	2,8
0,35	10 циклів по 14 год. за 973 К	3,0

2. Енергетичні критерії оцінки стабільності НСХ ПТ

Щоб оцінити вплив різнопланових процесів на зумовлені ними зміни НСХ, можна розглянути в межах класичної термодинаміки ($dS \rightarrow 0$) загальний вираз реологічного рівняння стану [8], яке ґрунтується на теорії деформування Вайсенберга. У межах цієї теорії сума змін за одиницю часу роботи зовнішніх сил A , вільної енергії F та дисипованого тепла Q_{dis} системи дорівнює нулеві. (Взагалі робота зовнішніх сил A виражається добутком механічних напружень σ на швидкість деформування $\frac{d\varepsilon}{dt}$):

$$\frac{dF(\sigma; \varepsilon)}{dt} + \frac{dQ_{dis}(\varepsilon; d\varepsilon/dt; \sigma; d\sigma/dt)}{dt} = \frac{dA}{dt},$$

де dQ_{dis}/dt – швидкість дисипації тепла; dA/dt – потужність дії зовнішніх сил; $\varepsilon; d\varepsilon/dt$ – відповідно деформація та швидкість деформування; $\sigma; d\sigma/dt$ – відповідно механічні напруження та швидкість їх зміни.

У найпростішому випадку, коли на матеріал не діють зовнішні сили або коли останні є незначними ($dA/dt \rightarrow 0$), можна вивчати проблеми надійності перетворювачів, зокрема метрологічної надійності, порівнюючи зміни вільної енергії з розсіюванням тепла:

$$\frac{dF(\sigma; \varepsilon)}{dt} + \frac{dQ_{dis}(\varepsilon; d\varepsilon/dt; \sigma; d\sigma/dt)}{dt} = 0.$$

Якщо у цьому рівнянні зміни вільної енергії матеріалу виразити через зміни НСХ – основного параметра передавальної функції Z , де параметр Z відповідає напрузі на клеммах термоелектричних перетворювачів, то останнє рівняння набуває вигляд:

$$\frac{dF}{d\sigma} \frac{dZ}{d\sigma} \frac{dZ}{dt} + \frac{dQ_{dis}(\varepsilon; d\varepsilon/dt; \sigma; d\sigma/dt)}{dt} = 0.$$

Зміни вільної енергії та змін НСХ (за модулем) не залежать від того, поглинається тепло чи виділяється, що описується рівняннями:

$$\begin{aligned} & - \text{у разі поглинання тепла} \left(\frac{dF}{dt} \right)_1 = - \frac{dQ_{dis}}{dt}; \\ & - \text{у разі виділення тепла} \left(\frac{dF}{dt} \right)_2 = - \frac{dQ_{dis}}{dt}; \end{aligned}$$

Прирівнявши останні два рівняння, одержимо:

$$\left(\frac{dZ}{dt} \right)_1 + \left(\frac{dZ}{dt} \right)_2 = 0,$$

звідки випливає, що за однакових термодинамічних параметрів T, p зміни НСХ перетворювачів різних типів у часі будуть протилежними за знаком у разі виділення чи поглинання тепла. Це означає, що, регулюючи потужність виділення або поглинання енергії у вигляді тепла, можна цілеспрямовано впливати на робочі характеристики ПТ і стабілізувати їх на певному заздалегідь заданому рівні.

Щоб практично реалізувати наведені вище теоретичні засади стосовно кабельних ПТ, було запропоновано новий підхід до стабілізації НСХ, основою якого є періодичне пропускання струму по термоелектродах, причому цю процедуру можна виконувати, навіть не демонтуючи ПТ з об'єкта. Термодинамічна суть цього підходу полягає у зміні на протилежні напрямків поширення радіальних потоків тепло- та масоперенесення у кожному окремому термоелектроді та фіксуванні НСХ (інтегральної термо-ЕРС) на певному сталому рівні, тобто у заданому полі допусків за допомогою стабілізації мікропоруватості. Водночас необхідне періодичне перемикання електричного кола термопар у режим відновлення НСХ, яка змінилась за попередній період експлуатації. Якщо відомі діаметр та питома електропровідність дротів, можна розрахувати тривалість пропускання електричного струму τ_h з виразу:

$$\tau_h = \frac{10C}{I^2} \frac{r^2}{\rho} t_e \cdot \exp \left[- \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_h} \right) \right],$$

де I – електричний струм; C – коефіцієнт переходу, що дорівнює 0,02...0,03; r – радіус термоелектрода; ρ – питомий електричний опір термоелектродного матеріалу; t_e – тривалість експлуатації термопари до моменту відпалу струмом; T_e – температура експлуатації; T_h – температура термообробки; E_a – енергія активації дифузійних змін.

У результаті метрологічна надійність ПТ збільшилась у 3...4 рази для ресурсу роботи за температур 1100...1300 К, що свідчить про дифузійний характер зафіксованих змін.

Цей підхід може бути також ефективним для прогнозування змін НСХ ПТ. Зокрема, змінюючи температурно-часові умови роботи ПТ у межах 1,01...1,20 можливої температури експлуатації, можна зменшити загальну тривалість розроблення ПТ. Для цього ПТ відпалюють за температур, вищих на 10–20 % від

експлуатаційних упродовж часу, приблизно на порядок меншого за заданий ресурс роботи. Значення, на яке необхідно підвищити температуру відпалу, знаходять з умови забезпечення однакової довжини дифузійного шляху $X = (Dt)^{1/2}$, де $D = D_0 \exp(-aT)$, для умов відпалу та експлуатації:

$$e^{-aT_1} t_1 = e^{-aT_2} t_2,$$

де a – стала, пов'язана з енергією активації; T_1, T_2 – відповідно температура відпалу та експлуатації; t_1, t_2 – відповідно тривалість відпалу й експлуатації. Тобто за період t_2 значення нестабільності інтегральної термо-ЕРС за температури T_2 є тотожним до нестабільності інтегральної термо-ЕРС матеріалу, який експлуатувався упродовж часу t_1 за температури T_1 .

Таблиця 6

**Температурно-часові особливості експлуатації ПТ,
стабілізованих пропонованим методом**

Характеристика ПТ	Температура, К	Тривалість, год.
ХА	1100	0...0,05 $t_{рес}$, через кожні 100 год. нагрів струмом упродовж 10 год. до перегрівання гарячого з'єднання на 30-40 К
	1200	0...0,05 $t_{рес}$, через кожні 100 год. нагрів струмом упродовж 10 год. до перегрівання гарячого з'єднання на 30-40 К
	1300	0...0,05 $t_{рес}$, через кожні 100 год. нагрів струмом упродовж 10 год. до перегрівання гарячого з'єднання на 30-40 К

Таблиця 7

Зміни показів ПТ на основі термодіагностичного кабелю діаметром 1,5 мм

Режими виходу на температуру	Температура відпалу, К	Тривалість відпалу, год					
		0	100	200	300	400	500
Стандартний, без проміжного нагрівання	1100	-	1,4	2,1	2,3	2,5	2,9
	1200	-	1,9	2,7	3,5	3,7	4,4
	1300	-	2,2	3,2	5,0	6,7	7,2
Пропонований, з проміжними нагріваннями	1100	-	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
	1200	-	0,5	0,8	0,8	1,3	1,5
	1300	-	0,4	0,8	1,1	1,4	1,7

Крім того, істотно зменшити рівень механічних напружень термоструктурного походження можна, впроваджуючи спеціальні режими виходу на температуру експлуатації. Результати вивчення впливу виходу на максимальну температуру з нетривалими зупинками на проміжних температурах наведено в табл. 7. Вони свідчать про ефективність описаної процедури.

Висновки

1. На підставі виконаних досліджень запропоновано сукупність методів стабілізації НСХ ПТ на виробничо-технологічному етапі, що дало змогу покращити основні метрологічні параметри і збільшити загальний ресурс роботи ПТ, зокрема для умов циклічної дії температур на серійні ПТ.

2. На прикладі промислових термоелектричних ПТ кабельного типу підтверджено універсальність енергетичного підходу до вирішення проблем підвищення точності термометрів і розроблено методику стабілізації НСХ ПТ в умовах енергонапружених об'єктів. Створено особливо точні засоби вимірювання температури ПТ кабельного типу.

3. Описаний метод дослідження НСХ дав змогу впровадити прискорені методи проектування промислових ПТ кабельного типу. Якщо раніше лише ресурсні випробування ПТ тривали до 10000 год (більше ніж рік), що й визначало загальну тривалість розроблення, то впровадження згаданого методу дало можливість скоротити її у 5–7 разів.

1. Котельман В.Я., Куритный И.П. Средства измерения температуры на АЭС. – М., ТС-6. Вып. 5. 1986.
2. ДСТУ 2837-94 та ДСТУ2857-94. – К., 1995.
3. Рогельберг И.Л., Пучков Б.И. Термоэлектрическая стабильность термопарных кабелей // Сплавы для термопар. – Т. 4. – Вып. 23. – 1983. – С. 70–73.
4. Котельман В.Я., Кукореко А.И., Скриван А.И. Термоэлектрическая нестабильность промышленных термоэлектрических преобразователей на базе термопарных кабелей.
5. Друговская Л.Б., Лифшиц А.Е., Михайлов Л.Ф. и др. Исследование термоэлектрической стабильности хромель-алюмелевых термопар в контролируемой атмосфере // Сплавы для термопар. – Т. 4. – Вып. 23. – 1983. – С. 60–70.
6. Самсонов Г.В., Киц А.И. и др. Датчики для измерения температуры в промышленности. – К., 1972.
7. А.с. СССР № 872594. МКИ С22 1/00. Способ термической обработки термопарного кабеля // В.Я.Котельман, А.И.Кукореко. Б.и. № 38. – 1981.
8. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. – К., 1972.