

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

БИЧКІВСЬКИЙ
Роман Васильович

УДК 536.53

**ПРИЛАДИ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Спеціальність 05.11.04 - Прилади і методи
вимірювання теплових
величин

Дисертація
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за монографією

Львів - 1994

Дисертація представлена у вигляді монографії.

Робота виконана у Державному університеті "Львівська політехніка" на кафедрі "Інформаційно-вимірювальна техніка".

Офіційні опоненти:

академік РАТН,

Федик І.І.

доктор технічних наук, професор

доктор фізико-математичних наук,

професор

Прохоренко В.Я.

доктор технічних наук, с.н.с.

Грищенко Т.Г.

Провідна організація - НВО "Термоприлад" (м. Львів)

Захист відбудеться "20" XII 1994 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.068.36.04 при Державному університеті "Львівська політехніка" (290013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, тел. 39-86-19).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Дисертація розіслана "18" XI 1994 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Д.068.36.04



Я.Т. ЛУЦИК

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Стефаніка
райни



00777211 (P)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Важливість і перспективність температурних вимірювань для розвитку таких галузей господарства, як енергетика, ядерна техніка, ракетно-космічна техніка, металургія та ін., зумовили за останні роки значний ріст несистематизованих наукових і дослідно-конструкторських робіт у галузі створення приладів для контактного вимірювання температури підвищеної точності.

Сучасне обладнання характеризується високоінтенсивними технологічними процесами, великими швидкостями нагрівання та охолодження конструкцій робочого тіла, високими тисками, вібрацією, впливом агресивних робочих середовищ та ін. Перераховані фактори діють на термоперетворювач, до якого ставляться вимоги тривалого збереження метрологічних характеристик та усунення причин, які приводять до появи похибок від нестабільності метрологічних характеристик. Це привернуло увагу до процесів, які відбуваються в матеріалах чутливих елементів і являються першоосновою експлуатаційних змін практично всіх метрологічних характеристик.

Актуальність вирішення цих проблем зберігається протягом останніх десятиріч. Здійснення їх значною мірою перенесено в сферу виробництва, уніфікації та стандартизації, що природньо для прецизійних засобів вимірювання. Тому в роботі для покращення метрологічних характеристик і надійності термоперетворювачів використовуються математичні, матеріалознавчі, технологічні, конструкторські та засоби вдосконалення. Одночасно розв'язуються ці проблеми і у вторинних електронних приладах.

Вирішення таких проблем вимагає залучення різнопрофільних спеціалістів і систематизації наукових досліджень у вигляді спеціальних видань: монографій, довідників, стандартів і навчально-методичних посібників.

Мета роботи . - вирішення важливої науково-технічної проблеми створення та організації виробництва надійних та високодосконалих приладів для контактного вимірювання температури.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- створення математичної моделі впливу фізичного стану термометричних матеріалів параметрів довкілья та захисної арматури термоперетворювача на його метрологічні характеристики;

- визначення експериментальних функціональних зв'язків між умовами експлуатації та електрофізичними властивостями матеріалу термоперетворювача;

- аналіз технологічних факторів виробництва та виявлення їх впливу на якість чутливого елемента термоперетворювача;

- створення та широке впровадження в промисловість нових агрегатних комплексів термоперетворювачів з високими технічними характеристиками;

- вдосконалення вторинних електронних приладів (автоматичних електронних мостів та потенціометрів), в тому числі на базі тонкоплівкової технології;

- здійснення заходів уніфікації та стандартизації термоперетворювачів;

В цілому досягнення поставленої мети означало вирішення вагомим науково-технічної проблеми з науковим та експериментальним обґрунтуванням принципів розвитку та вдосконалення засобів вимірювальної техніки, зокрема, приладів для контактного вимірювання температури.

Наукова новизна. Розвинута фізична модель генерації термометричних шумів перетворювачів за рахунок інтегруючого фактора градієнта механічних напружень термометричного матеріалу. Створена та досліджена математична модель впливу фізико-хімічних змін у термометричному матеріалі, на напружений стан і метрологічні характеристики перетворювача. Одержані експериментальні результати, що лягли в основу побудови залежностей, для різних умов експлуатації термоперетворювачів і для корекції метрологічних характеристик.

Встановлено експериментальні функціональні зв'язки залежностей між умовами експлуатації та електрофізичними властивостями матеріалу термоперетворювача.

Науково обґрунтовані принципи вибору матеріалів, технологій та конструкцій контактних термоперетворювачів.

Обґрунтовано вплив технологічних факторів на якість чутливого елемента термоперетворювача.

Запропоновані та досліджені термоелектричні та резистивні сплави вісмуту та технології виготовлення на їх основі резисторів для електронних вимірювальних приладів.

Практична цінність. Результати експериментальних і теоретичних досліджень дозволили вирішити проблему покращення метрологічних характеристик і підвищити надійність термоелектричних перетворювачів.

Чисельні експериментальні результати досліджень впливу параметрів довкілля та захисної арматури термоперетворювачів на їх метрологічні характеристики використовуються для прогнозування надійності роботи термоперетворювачів.

Створені методики стабілізації метрологічних характеристик термоперетворювачів на основі запропонованих технологічних процесів їх виготовлення та автоматизації процесів виробництва.

Створено комплекс первинних перетворювачів для вимірювання температури різних об'єктів в межах від 0 °С до 1000 °С.

Статистичною обробкою результатів випробувань на промислових об'єктах встановлено та обґрунтовано технічний ресурс термоперетворювачів.

Здійснена уніфікація та стандартизація термоперетворювачів.

Наукові основи створення та організації виробництва приладів для контактного вимірювання температури узагальнені у монографії, довіднику та навчально-методичних посібниках, які пройшли апробацію у виробничих, наукових та інженерних колах.

Результати наукових експериментальних досліджень використані при розробці Державних стандартів.

Апробація. Результати розробок, крім їх висвітлення у вигляді монографії, довідника, брошур та статей, доповідались на наукових конференціях:

- Республіканська науково-технічна конференція приладобудування з якості та надійності (Львів: 11-12 квітня 1965 р.),
- Всесоюзна науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів з технології приладобудування (Краснодар: 18-19 травня 1972 р.),
- Всесоюзний семінар з модельних теорій розплавів та дифракційних методів дослідження (Львів: 12-15 вересня 1972 р.),
- Науково-технічна конференція з автоматизації в Молдавській енергосистемі (Кишинів: 29-30 жовтня 1973 р.),
- Всесоюзна конференція вимірювальних інформаційних систем (Івано-Франківськ: 11-14 вересня 1973 р.),
- VII Всесоюзна конференція з мікроелектроніки (Львів: 7 -10 жовтня 1975 р.),
- VIII Всесоюзна науково-технічна конференція з мікроелектроніки (Москва: 14-17 березня 1978 р.),
- VI Всесоюзна конференція "Електричні методи та засоби вимірювання температури (Електротермометрія-88) (Луцьк. 13-15 вересня 1988 р.),
- VII Міжнародна науково-технічна конференція "Електричні методи та засоби вимірювання температури (Температура-92) (Львів, 18-20 жовтня 1992 р.),
- V науково-технічна конференція "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань (Термометрія-94) (Харків, 31 травня - 2 червня 1994 р.).

Регулярні аспекти в процесі виконання досліджень, передачі їх результатів у виробництво та публікації доповідались на наукових семінарах: Московського інституту електронної техніки (1969-1986 р.р. і Львівського політехнічного інституту (1986-1994 р.).

Публікації. За результатами досліджень, винаходів та заходів вдосконалення засобів вимірювання і їх виробництва опубліковано 52 наукові праці.

Монографія. "Контактные датчики температуры", опублікована видавництвом "Металлургия" і складає 240 с., 84 рис., 58 табл. та 128 бібліографічних посилань.

Довідник "Приборы для измерения температуры контактным способом", опублікований видавництвом "Вища школа" і складає 207 с., 67 рис., 85 табл. та 53 бібліографічних посилань.

Отримано 4 авторських свідоцтва на винаходи, опубліковано 31 статтю та 12 доповідей, 1 стандарт та 6 навчально-методичних посібників.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Концепція та принципи. Конструкторські та схемні рішення для приладів контактного вимірювання температури відрізняються історичним укладом різноманіття модифікацій і не завжди оправданою недосконалістю конструкцій термоперетворювачів.

Запропонована і реалізована концепція покращення метрологічних характеристик і надійності приладів контактного вимірювання температури шляхом компромісного та комплексного вдосконалення матеріалознавчо-технологічно-конструкторської частини виробництва чутливих елементів та метрологічного забезпечення термоперетворювачів. Компромісний принцип здійснено на основі досліджень створених математичних моделей впливу різноманітних факторів на метрологічні характеристики перетворювачів та узгодження металургійних і хіміко-технологічних вимог з метрологічними можливостями резистивних та термоелектричних перетворювачів.

Методики та метрологічне забезпечення повинні бути зорієнтовані на відповідні матеріали, технології та конструкції. Це стає більш очевидним тоді, коли розробки з наукових переростають у виробничі, особливо коли виробництво розширюється.

ВПЛИВ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ЗМІН НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТЕРМОМЕТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ . 1, 5, 38, 39, 40

В багатокомпонентних системах з різноманітними вклученнями через відмінність коефіцієнтів об'ємного розширення будь-які коливання температури впливають на перерозподіл внутрішніх напружень. Вони можуть бути зумовлені як фізико-хімічними процесами в термометричному матеріалі, так і конструктивним оформленням перетворювача, який перебуває в нестационарному температурному полі.

Термоперетворювач, поміщений в газове робоче тіло, піддається корозії. Значне збільшення швидкості корозії конструкційних матеріалів відбувається при наявності в газовому теплоносії вологи. В цьому випадку поряд з чисто хімічною корозією протікає електрохімічна за значно вищою швидкістю.

У нейтральних середовищах може відбуватися процес насичення матеріалу газами.

Аналізуючи напруження, які виникають у термометричному матеріалі при його окисленні, слід зауважити, що формування окислів на поверхні металу може приводити до утворення напружень. Відомо, що в процесі окислення циліндричні зразки видовжуються. У випадку окислення напруження, які зумовлені ростом окисної плівки, повинні бути стискуючими.

Відпал в інтервалі температури рекристалізації приводить до перерозподілу домішок проникнення, розвитку сегрегацій на границях зерен і фрагментації.

До вагомих типів пошкоджень кристалічної ґратки відносяться вакансії, нерегулярності різного походження та нерегульовані домішки, які приводять до зміни електричних властивостей матеріалів.

У металах при дії реакторного опромінення відбувається перебування ґратки та формування точкових і комплексних дефектів, а також взаємодія дефектів з домішками, як металургійними, так і тими, які утворюються в результаті ядерних реакцій а також вносяться з навколишнього середовища.

Такі зміни на цьому рівні приводять до макроскопічних змін властивостей металів. Найбільш суттєвим результатом всіх змін є зміна напруженого стану матеріалів.

Фізичні зміни ізотропності термометричного матеріалу в умовах дії високої температури та реакторного випромінювання, безумовно, впливають на внутрішній термодинамічний стан, тобто на внутрішню енергію, яка відповідальна за зміну електричних властивостей. Внутрішня енергія змінюється зі зміною внутрішнього тиску, тобто напруженого стану.

Стан твердого тіла описується відомим термодинамічним співвідношенням

$$P = - \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T, \quad (1)$$

де P - зовнішній тиск; V - об'єм; T - температура; F - вільна енергія тіла. Для аналізу це співвідношення доцільно записати як суму двох членів, один з яких є внутрішньою енергією тіла при температурі абсолютного нуля, а другий $E_T(T, V)$, зумовлений тепловими коливаннями ґратки.

Рівняння стану твердого тіла в дебаєвському наближенні має вигляд

$$P = - \frac{\partial E_0(V)}{\partial V} - \frac{\partial F}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial V} = - \frac{\partial E_0(V)}{\partial V} + \gamma \frac{E_T}{V}, \quad (2)$$

де

$$\gamma = - \frac{V}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial V} = - \frac{\partial \ln \theta}{\partial \ln V}; \quad \theta - \text{температура Дебая.}$$

Обидва члени в правій частині рівняння являють собою тиск.

Перший член - внутрішній тиск P_B в кристалі

$$P_B = - \frac{\partial E_0(V)}{\partial V} \quad (3)$$

який зумовлений силами міжатомної взаємодії. Якщо в кристалі атоми перебувають на рівноважній віддалі, то сили притягання і відштовхування

зкомпенсовані. Тобто, це той викідний випадок, коли термометричний матеріал не має домішок і дефектів, а електричні властивості являються характеристикою тільки даного матеріалу. При збільшенні або скороченні віддалі між атомами, появи дислокацій, вакансій, сторонніх включень виникає сила, яка прагне зблизити атоми до рівноважної віддалі. У результаті створюється всебічний тиск, який скерований всередину кристалу. Якщо віддаль між атомами менша рівноважної, то всебічний тиск направлений назовні. Звідси, очевидно, що для стабілізації електричних властивостей, зміни яких обумовлені сторонніми включеннями або дислокаціями, потрібно насичувати матеріал чутливого елемента газами або застосовувати інші методи, наприклад, шляхом створення вакансій, щоб контролювати внутрішній напружений стан. Ми використали метод насичення матеріалу аргоном, як завідомо нейтрального середовища.

Другий член рівняння - це внутрішній тиск.

$$P_{\phi} = \gamma \frac{E_T}{V}, \quad (4)$$

який виникає внаслідок ангармонічності теплових коливань атомів у вузлах ґратки.

Якщо зовнішній тиск $P=0$, то (3) і (4) зрівноважується фононним тиском

$$P_B = P_{\phi}, \quad (5)$$

Оцінімо фононний тиск. Беручи $\gamma = 2$, атомний об'єм

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cong 8 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3,$$

$C_v = 3R$, температуру Дебая $\theta = 300 \text{ K}$, фононний тиск при температурі 300 K буде

$$P_{\phi} = 1,1013 \cdot 10^6 \text{ кПа}$$

Таким буде і значення внутрішнього тиску, якщо зовнішній тиск $P=0$. Внутрішні та фоонові тиски в кристалах уже при кімнатній температурі дуже великі і досягають мільйонів кілопаскалів.

Поява вакансій в кристалічній ґратці пов'язана зі зміною об'єму кристалу. Якщо би в кристалі утворилася вакансія, і при цьому не відбулося зміщення атомів, то об'єм кристалу не змінився би, а об'єм вакансії був би рівним атомному об'єму. Але насправді так не відбувається і утворення вакансій завжди супроводжується зміщенням атомів в ґратці, в результаті чого об'єм вакансії менше атомного об'єму.

В умовах високих температур і радіаційного опромінювання активно проходить дифузія.

Таким чином, елементарний акт дифузії змінює відносний атомний об'єм на величину $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$, а також внутрішню енергію кристалу.

Зміна електричних властивостей матеріалу являє собою інтегральну характеристику зміни внутрішньої енергії, тобто напруженого стану.

В умовах високотемпературного апарату в термометричний матеріал постійно дифундують малі домішки як з самого робочого тіла, так і конструктивних елементів перетворювача. Якщо розчиняється домішка з меншим атомним об'ємом, то матриця стискується навколо неї, тому енергія утворення вакансії поблизу домішок може зрости, подібно тому, як вона зростає при всебічному стисненні. чи, навпаки, якщо об'єм домішок більший, то матриця розтягнута навколо домішок і енергія утворення вакансії може бути менше, ніж у чистій матриці.

Експлуатація термоперетворювачів в умовах, які супроводжуються дифузєю, випаровуванням, окисленням, рекристалізацією, утворенням включень приводять до виникнення локальних і протяжних неоднорідностей, а також значних механічних напружень. При цьому створюються миттєві напруження

і повільно змінні з часом, які приводять до повільної зміни електричних властивостей матеріалу.

Виявлені в результаті експериментальних досліджень залежності закладені в основу термодинамічної моделі електричних явищ. Модель базується на розширеній гіпотезі локальної рівноваги, згідно якої в даліні від рівноваги існує локальна функція стану, яка визначається, поряд із традиційними, додатковими параметрами стану. Такі параметри зумовлені неоднорідністю полів і механічних напружень, що розглядалися.

Внутрішній напружений стан чутливого елемента термоперетворювача визначається не тільки фізико-хімічними процесами, але й умовами нагріву, тобто швидкістю зміни температури термоперетворювача, яка визначається конструктивною недосконалістю термоперетворювача та умовами теплообміну.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ . 38, 39, 40

При математичному моделюванні враховувалися фізико-хімічні явища в об'ємі металу при дії зовнішніх механічних, радіаційних і температурних впливів, а також на поверхні матеріалу; процеси, які відбуваються в матеріалі при дії реакторного випромінювання та термомеханічні процеси в матеріалі при рекристалізації, поверхневому окисленні та насиченні об'єму металу газами.

При складанні математичних моделей фізико-хімічних явищ в матеріалі передбачалося, що основними процесами, які протікають в матеріалі, є пружно-деформуючі, хімічні, дифузійні, а також перерозподіл, генерація та рекомбінація точкових дефектів.

За параметри термодинамічного стану, які відповідають указаним процесам, взяті: тензори деформації $\hat{e} = \{e_{ij}\}$ і механічні напруження $\hat{\sigma} = \{\sigma_{ij}\}$;

температура T ; питома ентропія S ; концентрація домішок $C_k = \rho_k / \rho$ і хімічний потенціал M_k^* компоненти; $K(\rho_k)$ - маса компоненти K одиниці об'єму розчину; $\rho = \sum_{k=1}^n \rho_k$ - маса розчину в одиниці об'єму; Φ - термодинамічний потенціал; ω - густина електричних зарядів (індекс 1 відповідає вакансіям, 2 - міжвузлям, $(n-1)$ - електронам, n - основній речовині, $(k=3, 4, \dots, n-2)$ - домішкам).

Для вакансій, міжвузловин та атомів основної речовини використовувалося число частин в одиниці маси суміші N_1, N_2, N_n , а також хімічні потенціали, які розраховані на одну частину - M_1, M_2, M_n ($M_2 = M_2 \cdot m_1^{(2)}$; $M_n = M_n \cdot m_1^{(n)}$); $m_1^{(2)}, m_1^{(n)}$ - маса міжвузловини та атома основної речовини відповідно.

За початковий стан тіла ($\tau = 0$) приймаємо рівноважний термодинамічний стан, в якому

$$\sigma_{ij} = 0, e_{ij} = 0, T = T_0, S = S_0, N = N_1^0, C_k = C_k^0, \\ M_k = M_k^0, M_1 = M_1^0, \omega = 0, \Phi = \Phi_0, (k = 2, \dots, n-2), \quad (6)$$

де $M_k = M_k^* - M_n^*$, $\Phi = (M_{n-1}^* - M_n^*) / (Z_{n-1}^* - Z_n^*)$; Z_n^*, Z_{n-1}^* - електричний заряд одиниці маси компоненти n і $(n-1)$; одна компонента виключається

співвідношенням $\sum_{k=1}^n C_k = 1$.

При розгляді системи двох тіл (+) і (-), які контактують між собою та розділені міжфазовим шаром, що моделюється поверхнею, яка має властивості поверхневого шару. Параметри термодинамічного стану можна подати у вигляді

$$T = \{T^+, T^-, T^s\}; S = \{S^+, S^-, S^s\}; e = \{e^+, e^-, e^s\}; \\ \sigma = \{\sigma^+, \sigma^-, \sigma^s\}; C_k = \{C_k^+, C_k^-, C_k^s\};$$

$$\begin{aligned}
 M_k^* &= \{M_k^{*+}, M_k^{*-}, M_k^{*z}\}; \quad \Phi = \{\Phi^+, \Phi^-, \Phi^z\}; \\
 \omega &= \{\omega^+, \omega^-, \omega^z\}; \quad N_k = \{N_k^+, N_k^-, N_k^z\}; \\
 N_2 &= \{N_2^+, N_2^-, N_2^z\}; \quad N_n = \{N_n^+, N_n^-, N_n^z\}; \\
 M_1 &= \{M_1^+, M_1^-, M_1^z\}; \quad M_2 = \{M_2^+, M_2^-, M_2^z\}; \\
 M_n &= \{M_n^+, M_n^-, M_n^z\};
 \end{aligned} \tag{7}$$

індекси відповідають тілу (+), тілу (-) та фізичній поверхні (S).

У початковому стані параметри стану приймають значення

$$\sigma_{\alpha\beta}^s, e_{\alpha\beta}^s, C_{k0}^s, M_{k0}^s, \omega_0^s, \Phi_{k0}^s, N_{10}^s, N_{20}^s, C_{k0}^s. \tag{8}$$

Тут α, β індекси компонент тензорів ($\alpha, \beta = 1, 2$) рівняння Гіббса мають вигляд

$$dU^s = T^s dS^s + (\sigma_s / \rho^s) de^s + \Phi^s d\omega^s + M_1^s dN_1^s + \sum_{k=0}^{n-2} M_k^s dC_k^s. \tag{9}$$

Якщо $F^s = U^s - T^s S^s - \Phi^s \omega^s$, то

$$dF^s = -S^s dT^s + \sum_{i,j=1}^2 (\sigma_s / \rho^s) de^s + M_1^s dN_1^s + \sum_{k=2}^{n-2} M_k^s dC_k^s - \omega^s d\Phi^s. \tag{10}$$

звідси витікає рівняння стану для фізичної поверхні

$$\begin{aligned}
 S^s &= -dF^s / dT^s, & \sigma^s &= \rho^s dF^s / de^s, \\
 M_1^s &= dF^s / dN_1^s, & M_k^s &= dF^s / dC_k^s, \\
 \omega^s &= dF^s / d\Phi^s.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Рівняння хімічних реакцій та рекомбінацій точкових дефектів можна подати як

$$\sum_{k=1}^{k'} v_{kj}^s = 0, \quad N_{1*}^s + N_{2*}^s = N_n^s. \tag{12}$$

Друге основне рівняння термодинаміки фізичної поверхні має вигляд

$$d\Pi^s = \bar{Y}_q^s \cdot d\bar{x}_q^s + \xi e^s dA_q^s. \quad (13)$$

із (13) витікає рівняння процесів

$$\bar{Y}_q^s = \partial\Pi^s / \partial\bar{x}_q^s, \quad \xi e^s = \partial\Pi^s / \partial A_q^s. \quad (14)$$

Балансові співвідношення в об'ємній та поверхневій фазах (7), рівняння електродинаміки, співвідношення Коші між деформаціями та переміщеннями, початкові умови для об'єму та поверхні, стехіометричні рівняння хімічних реакцій, рівняння генерації (рекомбінації) точкових дефектів складають замкнуту повну систему диференціальних рівнянь, які описують взаємозв'язані механодифузійні, термоелектричні, хімічні процеси (в тому числі окислення), а також перерозподіл і генерацію (рекомбінацію) точкових дефектів в електропровідних системах із фізичними поверхнями розділу.

При роботі термоперетворювачів в матеріалі чутливого елемента протікають процеси рекристалізації. Рекристалізація розглядається як процес перебудови внутрішньої структури металу (об'ємне перетворення), що протікає у відповідному діапазоні температур і силових навантажень і приводить її у відповідність існуючим зовнішнім умовам. При цьому повинен враховуватися незворотній характер рекристалізації. Зміну структури тіла у зв'язку із рекристалізацією будемо характеризувати параметром відносного (за масою) вмісту рекристалізаційного матеріалу.

Прийmemo постулат про локальну рівновагу в межах фізично малого елемента об'єму тіла та введемо у відповідні моделі локальні параметри термодинамічного стану.

Механічні, дифузійні та теплові процеси опишемо тензором деформації $\hat{e} = \{e_{ij}\}$, тензором напружень $\hat{\sigma} = \{\sigma_{ij}\}$ (e_{ij} і σ_{ij} компонентами деформацій і напружень у декартовій системі координат), абсолютною температурою T , питомою ентропією S , концентрацією домішкової

речовини C і хімічним потенціалом M ($C = \rho_1 / \rho$), де ρ_1 - густина домішки, $\rho = \rho_1 + \rho_2$ - густина сплаву, $C + C_2 = 1$, C_2 концентрація матричного матеріалу.

Під рекристалізацією в широкому розумінні слова приймаємо перебудову внутрішньої структури в металах і сплавах у визначеному інтервалі температур з метою зняття механічних напружень шляхом мінімізації внутрішньої енергії. За початковий приймемо звичайний стан тіла при деякій температурі T_0 нижче температури рекристалізації. У загальному випадку дана структура матеріалу не відповідає цій температурі, але для структурного перетворення при $T = T_0$ немає термодинамічних умов. При рівномірному нагріванні після досягнення температури T_p (температури початку рекристалізації) в тілі починається структурне перетворення. Відмітимо, що для різних металів T_p складає 30...40 % від температури плавлення. При подальшому підвищенні температури триває процес перебудови внутрішньої структури. При цьому змінюється об'єм і безліч фізико-механічних характеристик матеріалу, а саме твердість, електрорушійна сила і т.д. При деякій конкретній для кожного матеріалу температурі T_k процес рекристалізації завершується. Це означає, що структура в основному прийшла у відповідність із зовнішніми умовами.

Попередні міркування відносяться до випадку, коли нагрівання проходить зі швидкістю, яка дозволяє в модельному розгляді прийняти, що при кожному значенні температури миттєво встановлюється відповідне значення параметру процесу рекристалізації. Існує діапазон швидкостей нагрівання, для якого це припущення цілком справедливе. Якщо ж швидкість нагрівання дуже велика (порядку 100 К/с і вище), то рекристалізація відстає від зміни температури і, таким чином, закінчується при наlot високій температурі T_k . Якщо при досягненні деякої температури T_0 ($T_p < T_0 < T_k$) припинити подальше нагрівання та підтримувати в тілі постійну температуру T_0 , то

рекристалізація не зупиняється миттєво, а відбувається, затухаючи, ще на протязі тривалого часу (порядку 10 годин і більше). Це свідчить про релаксаційність процесу.

Відзначимо, що рекристалізація носить незворотній характер, тобто при зниженні температури зворотні зміни структури не відбуваються. Рекристалізація залежить не тільки від температури, але й від силового навантаження. Експериментально встановлено, що при рекристалізації об'єм тіла скорочується і що стиск інтенсифікує процес.

Рекристалізацію будемо характеризувати макроскопічним параметром - мірою повноти рекристалізації Ξ , яка являє собою відносний вміст рекристалізованого матеріалу в одиниці маси, і спряженим параметром - питомою спорідненістю перетворення A . Спорідненість перетворення A за своїм фізичним змістом визначає роботу, яку необхідно витратити на зміну міри повноти рекристалізації на одиницю. Експериментально Ξ можна визначити за результатами вимірювань електроопору, твердості, розмірів зерен і т.д. У зв'язку з незворотнім характером рекристалізації міра повноти Ξ є неспадаючою в часі функцією в будь-якій точці тіла.

Тоді для ділянки V_2

$$\delta \Xi > 0,$$

а для ділянки V_3

$$\delta \Xi = 0,$$

За вихідний для області активного протікання процесу рекристалізації, що розглядається, приймаємо рівноважний стан, який відповідає фіксованій граничній точці поверхні $F_2 = F^*$, в якій параметри приймають значення:

$$T = T_0, S = S_0, e_{ij} = e_{ij}^0, \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0, M = M_0, C = C_0, \Xi = \Xi_0, A = A_0, \rho = \rho_0. \quad (15)$$

Розкладаючи для ділянки V_2 вільну енергію F_2 у ряд поблизу вибраних початкових значень параметрів і обмежуючись квадратичними членами розкладання, дістаємо:

$$F = F^* - a_1 t - a_2 t^2 + a_3 e_2^2 + a_5 (e_y - \delta_y e / 3)^2 + a_6 \xi + a_7 \xi^2 + a_8 t e - a_9 t \xi + a_{10} e \xi + a_{11} c^2 - k \beta c e + d c t + \eta c \xi \quad (16)$$

де $t = T - T_0$, $c = C - C_0$, $e = \sum_{\alpha=1}^3 e_\alpha$, $\xi = \Xi - \Xi_0$, $e_{ij} = (e_{ij})_{\max} - (e_{ij})_0$ - відхилення параметрів термодинамічного стану від їх вихідних рівноважних значень.

Із виразів (15), (16) слідує лінійні рівняння стану

$$S = -F / T = S_0 + C t / T_0 + K \alpha e / \rho_0 + K_1 \xi d C,$$

$$\sigma_y = \rho (F / e_y) = \sigma_y + K (e - \alpha t + d \xi - \beta c) \delta_y + 2G (e_y - e \delta_y / 3), \quad (17)$$

$$A = F / \xi = A_0 + K \xi - K t + K \alpha e / \rho_0 + \eta c,$$

$$\mu = M - M_0 = d_{11} C_1 - \beta K e / \rho + d t + \eta \xi,$$

де $C_1 = T_0 (S / T)$ - питома теплоємність; $K = (\sigma / e) / 3$ - модуль всесічного стиску (тут $\sigma = \sigma_y$); $G = (\sigma_y / e_y) / 2$ - модуль зсуву ($i \neq j$; i, j - не являються індексами сумування); $\alpha = e / T$ - температурний коефіцієнт об'ємного розширення; $\alpha = e / \xi$ - коефіцієнт, який враховує зміну об'єму при рекристалізації; K_1, K, d, η, β - інші фізичні сталі матеріалу, який моделює деформуюче тіло.

Структурний стан, що фізично реалізується, при фіксованих значеннях деформації, температури, концентрації домішки визначимо з умови мінімуму вільної енергії F . Варіюючи F за мірою повноти θ при фіксованих параметрах e, T, C отримаємо:

$$\delta F = \left(\frac{F}{\Xi} \right)_{e, T, c} \delta \Xi = A \delta \Xi = 0 \quad (18)$$

Звідси випливає, що $A = 0$.

Для визначення умов активної рекристалізації скористаємося методикою, яка застосовується в теорії пластичності при визначенні умов навантаження та розвантаження. Для цього введемо функцію

$$f(\Xi, T, e, c) = K\xi(\Xi - \Xi_0) - K_1(T - T_0) + Kae / \rho_0 + \eta c. \quad (19)$$

Необхідною передумовою протікання рекристалізації буде умова

$$f(\theta, T, c) = 0. \quad (20)$$

В тій частині тіла, де рекристалізація відсутня, $f < 0$. Виявляється, що умова (20) співпадає з умовою мінімуму вільної енергії (18).

Встановимо достатню умову рекристалізації. Якщо виконується рівність (20), то при малій зміні параметрів T, e, C можливі такі випадки:

а) перехід в ділянку V_2 , де відбувається рекристалізація;

тоді

$$\delta \Xi > 0,$$

$$f(T + \delta T, e + \delta e, \Xi + \delta \Xi, c + \delta c) = 0.$$

Дані умови еквівалентні наступним:

$$\delta f = K\delta \Xi - K_1\delta T + Kae\delta e / \rho_0 + \eta c = 0, \quad (21)$$

$$\delta f = -K_1\delta T + Kae\delta e / \rho_0 + \eta c > 0$$

б) перехід у ділянку V_3 , де $\delta \Xi = 0, f(T + \delta T, e + \delta e, \Xi, c) \leq 0$.

Використовуючи умови реалізації початкового стану $f(T, e, \Xi, c) \leq 0$ знаходимо:

$$\delta_f = \delta f \leq 0. \quad (22)$$

Таким чином, для структурного стану, що фізично реалізується і має місце при активній рекристалізації, поряд з рівняннями (16) повинні виконуватися умови (20), (21).

Оскільки балансові співвідношення у відкритих ділянках V_1, V_2, V_3 мають аналогічну структуру, розглянемо такі рівняння для ділянки V_2 (індекс 2" для спрощення опустимо).

Рівняння збереження маси має вигляд

$$\rho / \tau + \nabla \cdot (\rho \vartheta) = 0, \quad (23)$$

де ϑ - вектор швидкості центра мас; $\nabla = \vec{\partial}_i / x_i$ - набла -оператор у декартовій системі координат; ∂_i - одиничні орти.

Рівняння балансу кількості руху

$$\rho \dot{\vartheta} / \tau = \nabla \cdot \hat{\sigma} + \rho \bar{x}, \quad (24)$$

де $x = -grad\Psi$ - стаціонарна консервативна сила ($\Psi / \tau = 0$), яка розрахована на одиницю маси тіла.

$$\rho dC / d\tau = -div\vec{J}_C \quad (25)$$

- рівняння балансу домішки, де

$$J_C = \rho_1(\vartheta_1 - \vartheta); \quad \vartheta = (\rho_1\vartheta_1 + \rho_2\vartheta_2) / \rho.$$

$\rho = \rho_1 + \rho_2$ - дифузійний потік домішки, густина якої ρ_1 , а швидкість ϑ_1 . З допомогою балансових співвідношень можна отримати рівняння балансу ентропії

$$TdS / d\tau = -V \cdot J_Q / \rho \quad (26)$$

яке перетворюється до вигляду

$$\rho dS / d\tau = -\bar{V} \cdot \vec{J}_S + \sigma_S, \quad (27)$$

де $\vec{J}_S = \vec{J}_T / T$ - потік ентропії; \vec{J}_T - потік теплоти; $\sigma_S = \bar{x}_i \cdot \vec{Y}_i$ - продукування ентропії; \bar{x}_i - термодинамічні потоки; \vec{Y}_i - термодинамічні сили, які спряжені з потоками.

Користуючись лінійною теорією Онзагера, визначимо зв'язки між термодинамічними силами та потоками (кінетичні рівняння):

$$\begin{aligned}\bar{J}_T &= -\alpha VT + q_1 \bar{J}_1; \quad \xi = LA, \\ \bar{J}_1 &= -\rho [DVC + D^e Ve + DV\xi],\end{aligned}\tag{28}$$

де $D, D^e, D^T, D, \alpha, q$ - кінетичні постійні, які є функціями параметрів стану.

Балансові співвідношення (24), (25), (27), які доповнені початковими та граничними умовами, співвідношенням Коші, що зв'язує деформації з переміщенням, перетворюються до вигляду

$$\bar{\epsilon} = D_{ef} \bar{U}\tag{29}$$

а також рівнянням процесу рекристалізації, складають замкнену систему диференціальних рівнянь для опису механотермодифузійних процесів у твердому тілі, в якому здійснюється рекристалізація.

Наприклад, термоелектрорушійна сила термопари

$$E = (\bar{\alpha}_A - \bar{\alpha}_B) \cdot (T_1 - T_1),\tag{30}$$

де

$$\bar{\alpha}_A = \frac{1}{T_1 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \alpha_1(T, e, \xi, c) dT,\tag{31}$$

$$\bar{\alpha}_B = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \alpha_B(T, e, \xi, c) dT,\tag{32}$$

$\bar{\alpha}_A, \bar{\alpha}_B$ - середні значення коефіцієнтів $\alpha_A(T), \alpha_B(T)$ галузок термопари; T_1, T_2 - температури спаїв.

У найбільш простому варіанті функції α_A, α_B можна моделювати лінійними або квадратичними рівняннями, експериментально одінуючи коефіцієнти розкладання.

$$\begin{aligned}\alpha_A &= \alpha_A^0 + M_1 t + M_2 e + M_3 \xi + M_4 C, \\ \alpha_B &= \alpha_B + M_1 t + M_2 e + M_3 \xi + M_4 C,\end{aligned}\quad (33)$$

або

$$\begin{aligned}\alpha_A &= \alpha_A^0 + M_1 t + M_2 e + M_3 \xi + M_4 C + M_5 t^2 + M_7 \xi^2 + \\ &+ M_8 C^2 + M_9 te + M_{10} \xi e + M_{11} tc + M_{12} e \xi + M_{13} ec + M_{14} \xi c.\end{aligned}\quad (34)$$

$$\begin{aligned}\alpha_B &= \alpha_B^0 + M_1 t + M_2 e + M_3 \xi + M_4 C + M_5 t^2 + M_7 \xi^2 + \\ &+ M_8 C^2 + M_9 te + M_{10} \xi e + M_{11} tc + M_{12} e \xi + M_{13} ec + M_{14} \xi c.\end{aligned}$$

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ПЛАТИНОВИЙ ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ 38, 39, 40

Розглянемо деформоване електропровідне тверде тіло, яке знаходиться в трьохмірному евклідовому просторі під дією силових навантажень і температурних полів. Суцільне середовище, якими моделюємо об'єм, вважаємо трьохкомпонентним: атоми основної речовини, точкові дефекти (вакансії та проникнені атоми основної речовини, які перейшли з вузлів ґратки в міжвузловини). Найважливішими процесами, які протікають в такому твердому розчині, вважаємо пружньо-деформаційні, теплові, а також перерозподіл та рекомбінацію точкових дефектів.

При макроскопічному описуванні таких процесів, у відповідності з відомими положеннями нерівноважної термодинаміки, використаємо гіпотезу локального рівноважного стану в кожному малому елементі об'єму.

Користуючись попередніми співвідношеннями математичної моделі дестабілізації характеристик термоперетворювачів і нехтуючи перерозподілом та аннігіляцією точкових дефектів, одержимо знайоме рівняння термопружності (2), (5).

Розглянемо опромінення платинового термоперетворювача опору протонами енергії $\varepsilon = 10 \text{ кеВ}$, потоку $\Phi_p = 3,37 \cdot 10^{15} \text{ 1 / см}^2$.

Питома концентрація точкових дефектів

$$Cd = \Phi_p \int_{e_1}^{e_2} u(e) \frac{ds}{de} de \approx 1,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad (35)$$

де σ - диференціальний ефективний переріз утворення первинного атому віддачі;

$u(\varepsilon)$ - каскадна функція.

Початкову зміну питомого опору, яка викликана опроміненням, при $T \sim (0 \dots 10) \text{ К}$ визначимо за формулою

$$R = \frac{m\theta}{ne^2} C_d \approx 0,012 \text{ мк Ом / см},$$

де m - маса електрона; $\theta = 1,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ - середня швидкість руху електронів; $n = 6,6 \cdot 10^{23} \text{ 1 / см}^3$ - густина електронів провідності; e - заряд електрону; $\theta = 10^{-17} \text{ см}^2$ - поперечний переріз розсіювання електронів на дефектах кристалічної ґратки.

Приймаємо, що кінетичні рівняння, які описують відпал дефектів, мають вигляд

$$\frac{dC_d}{dt} = -AC_d \tau^n \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (36)$$

де A - частотний фактор; n - порядок реакції взаємодії дефектів; k - постійна Больцмана; E - енергія активації процесу взаємодії точкових дефектів.

Використовуючи співвідношення (35-36), розраховані зміни опору ΔR платинового чутливого елемента, які викликані радіаційним опроміненням при температурах від $-770 \text{ }^\circ\text{C}$ до $340 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 1.

Зміна опору ΔR платиного чутливого елемента при впливі радіаційного опромінення.

T, °C	-77	-60	-55	-27	-5	27	74	111	178	218	261	302	340
ΔR , Ом	10,5	9,1	8,4	7,6	3,2	1,05	0,8	0,5	0,3	0,31			

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАТИНИ ЯК МАТЕРІАЛУ РЕЗИСТИВНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ . 1,5,15,29,30,38

У зв'язку з інтенсифікацією високотемпературних процесів у хімії, енергетиці, металургії та інших галузях народного господарства більш глибоке вивчення впливу домішок на електричні властивості платини, як матеріалу чутливого елемента термоперетворювача, набуває першочергового значення. Особливо велике практичне значення має оцінка характеру впливу домішок у процесі експлуатації. Забруднення платини при експлуатації приводить до змін метрологічних характеристик термометрів опору. Іноді, в залежності від умов експлуатації, характеру забруднень і конструкції термометрів опору, такі зміни при вимірюванні температури можуть досягати значної величини. Експериментальні дослідження електричних властивостей платинових термометрів опору в залежності від різних джерел забруднення дозволили конкретизувати кореляцію між відносною зміною опору чутливого елемента при забрудненні та температурного коефіцієнта опору платини і апроксимувати її лінійною залежністю з введенням коефіцієнта K .

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = K \Delta W, \quad (37)$$

де R_0 - опір при температурі 0°C ;

K - коефіцієнт пропорційності, який характеризує вид забруднення платини;

ΔW - різниця відношень електроопорів R_{100} / R_0 до і після забруднень;

ΔR_0 - різниця електроопорів до і після забруднень.

Таблиця 2.

Джерела забруднення платини і електричні властивості

Матеріал арматури	Джерела забруднення	$\Delta R_0/R_0$ %	ΔR_0		ΔW	$\Delta R_0/R_0$ %	ΔR_0		ΔW	К
			Розрахункове	Вимірне			Розрахункове	Вимірне		
Арматура з титану	-	0,88036	0,988	0,936	0,00310	1,62946	1,847	1,825	0,00574	2,873
Сталь Х19Н10Т	-	0,71264	0,718	0,712	0,00253	1,39125	1,408	1,390	0,00496	2,842
Al ₂ O ₃	-	0,77749	0,786	0,778	0,00245	1,96372	1,991	1,970	0,00621	3,204
Al ₂ O ₃	Оксид вуглецю	0,70297	0,721	0,710	0,00367	1,71485	1,755	1,732	0,00650	2,674
Al ₂ O ₃	CaF ₂	0,77000	0,731	0,770	0,00284	1,28500	1,298	1,285	0,00472	2,750
Al ₂ O ₃	BaCl ₂	1,03723	1,076	1,050	0,00360	1,53115	1,575	1,550	0,00526	2,952
Al ₂ O ₃	Na ₂ SiO ₃	0,41746	0,450	0,440	0,00169	1,36622	1,461	1,440	0,00549	2,524
Al ₂ O ₃	МБРТЕЛЬ	1,05400	1,064	1,054	0,00351	1,92000	1,950	1,920	0,00643	3,032
Al ₂ O ₃	NaBO ₂	0,93513	1,049	1,038	0,00332	1,72701	1,934	1,917	0,00612	2,847
Арматура з самозв'язаного карбїду кремнію	-	0,30000	0,303	0,300	0,00103	0,49000	0,498	0,490	0,00169	2,945

Для температур до 500 °С,

$$R_t = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2), \quad (38)$$

використовуючи формулу (37, 38), отримано співвідношення для визначення величини відхилення електричного опору в залежності від зміни

$$\Delta R_0 = R_0' - R_0,$$

$$\Delta R_t = \frac{t}{t_{100}} \Delta R_0 \left[W - 1 - \frac{R_0 + \Delta R_0}{KR_0} \right] + \Delta R_0 + \Delta B(t^2 - t * t_{100}) R_0, \quad (39)$$

де $t_{100} = 100$ °С; W - значення відношення R_{100} / R_0 до забруднення;

R_0 і R_0' - електроопори до і після забруднення; ΔB - зміна коефіцієнту B при забрудненні.

Отже з метою зменшення похибки від забруднення платини проведено комплекс матеріалознавчих, технологічних та конструкторських вдосконалень засобів для забезпечення оптимального рівня стабільності та надійності термоперетворювачів при виробництві і експлуатації.

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ І КОНСТРУКЦІЙ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ . 1,3,5,11,12,15,16,24,25,31

Значне місце для покращення метрологічних характеристик і надійності термоперетворювачів займають питання, зв'язані з технологічною підготовкою їх виробництва, забезпечення широкого застосування стабільних типових технологічних процесів, стандартної оснастки і обладнання.

Однією з найбільш трудомістких операцій при виробництві термометрів опору є технологічна операція виготовлення платинової спіралі чутливих елементів.

Зважаючи на застосування при виготовленні чутливих елементів платинового дроту малих діаметрів (порядку 0,05 мм), виготовлення платинової спіралі до проведеної автором модернізації здійснювалось вручну, а з'єднання її з виводами 0,5 мм і підгонка електричного опору здійснювалась паянням сріблом. Природньо, що це значною мірою впливало на основні характеристики термометрів, через утворення інтерметалідів в місцях паяння при робочих температурах, що значно впливало на тривалість роботи термометрів опору.

Таблиця 3.

Зміна опору платинових чутливих елементів виготовлених паянням з засипкою із окису алюмінію при $t=450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Час вигримки в год.	Номер чутливого елемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Зміна опору чутливого елемента (ΔR_0 , Ом)									
100	0,022	0,016	0,017	0,007	0,043	0,095	0,019	0,041	0,042	0,010
200	0,036	0,026	0,038	0,016	0,041	0,110	0,030	0,076	0,078	0,048
300	0,047	0,038	0,056	0,028	0,095	0,127	0,040	0,108	0,120	0,098
400	0,076	0,047	0,064	0,039	0,178	0,135	0,054	0,145	0,124	0,162
600	0,125	0,650	0,080	0,057	∞	0,146	0,067	∞	0,164	∞

Внаслідок проведеної конструкторсько-технологічної роботи знайдено розв'язок, який забезпечує відтворюваність технологічного процесу, підвищує

продуктивність праці та усуває основні недоліки технологічного виготовлення термометрів опору (деформацію дроту, корозію і ін.).

Для намотки платинових спіралей з заданим кроком розроблена і впроваджена спеціальна автоматична установка, котра дала можливість рівномірно укладати витки платинової спіралі в процесі виготовлення чутливих елементів і усунути надлишковий натяг і видовження платинового дроту.

Разом з тим було вирішено питання заміни паяних з'єднань на зварювальні. З цієї метою розроблена спеціальна установка для зварювання та підгонки чутливих елементів платинових термометрів опору.

Впровадження запропонованих автором установок для намотки, зварювання та підгонки чутливих елементів електричних термометрів опору дозволило, як показали експериментальні дослідження, значно зменшити зміни опору чутливого елемента при експлуатації (Табл. 4).

Таблиця 4.

Зміна опору платинових чутливих елементів зварюванням з засипкою із окису алюмінію при $t=450^{\circ}\text{C}$.

Час вигирьмки в год.	Номер чутливого елемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Зміна опору чутливого елемента (ΔR_0 , Ом)									
100	0,007	0,005	0,012	0,002	0,007	0,015	0,012	0,016	0,017	0,016
200	0,008	0,006	0,016	0,003	0,012	0,016	0,018	0,022	0,023	0,022
300	0,009	0,005	0,018	0,002	0,012	0,016	0,023	0,030	0,032	0,025
400	0,010	0,005	0,023	0,03	0,013	0,021	0,030	0,035	0,038	0,028
600	0,012	0,006	0,028	0,05	0,015	0,021	0,032	0,035	0,038	0,025

Аналіз причин нестабільності опору платинового чутливого елемента вимагав розробки та дослідження нових засипок спіралей чутливого елемента. Згідно попередньої технології виготовлення чутливих елементів спіраль засипалась порошком окису алюмінію, який після відпалювання чутливого елемента опору залишався сипучим. У зв'язку з тим, що спіраль в каналах ізолятора не закріплювалась, то після вібрації та ударів, які передбачені

технологією виготовлення, кожний елемент піддавався рентгенівському перегляду для виявлення дефектів. Великий відсоток елементів відходив у брак. При довготривалій експлуатації термометрів в умовах високих температур, вібрації та ударів платиновий дріт деформувався, внаслідок чого змінювались характеристики чутливого елемента термометра опору. Досліджено довготривалий вплив засипки окису алюмінію на резистивні властивості платинового чутливого елемента (рис. 1).

В результаті досліджень великого масиву різних за хімічним складом засипок отримано оптимальну, до складу якої входить 35 % бури ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) і 65 % окису алюмінію (Al_2O_3).

В новому елементі (із запропонованим складом засипки) повністю усунені перераховані недоліки, бо спіраль в каналах ізолятора фіксується спеченим при відповідній температурі порошком (Рис. 2).

Як показали випробування, опір елемента з запропонованою засипкою при тривалій експлуатації практично не змінювався, а параметр (R_{100} / R_0) був стабільний в часі. Це відбувається внаслідок того, що бура, яка має інгібіторні властивості при температурі з часом очищає платину від забруднення та захищає її від зовнішніх впливів.

Температура, °С	Резистивність, Ом	Температура, °С	Резистивність, Ом
0	100	100	100
100	100	200	100
200	100	300	100
300	100	400	100
400	100	500	100
500	100	600	100
600	100	700	100
700	100	800	100
800	100	900	100
900	100	1000	100

Зміна опору платинових чутливих елементів, виготовлених паянням з
засипкою із 35% бури + 65% окису алюмінію при $t=450^\circ\text{C}$.

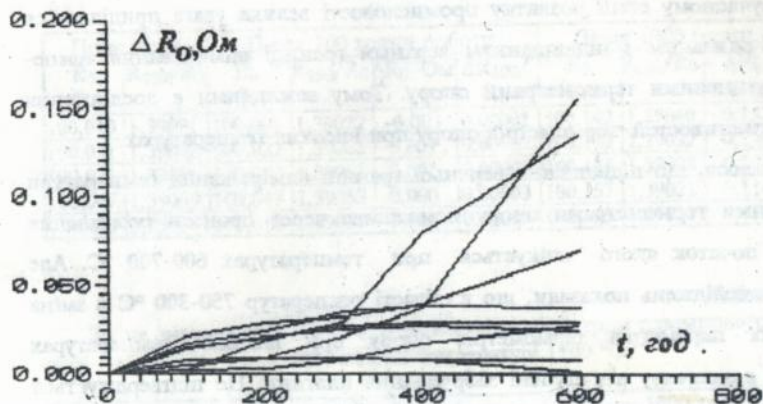


Рис. 1.

Зміна опору платинових чутливих елементів, виготовлених зварюванням з
засипкою із 35% бури + 65% окису алюмінію при $t=450^\circ\text{C}$.

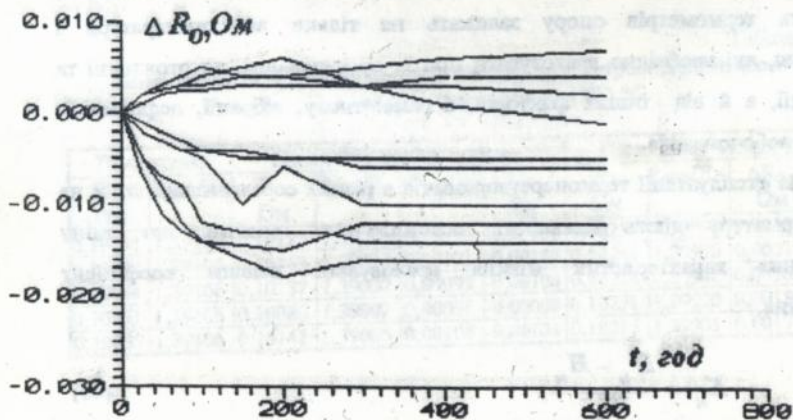


Рис. 2.

СТАБІЛЬНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ . 1,5,15,25,26,27,30,34

На сучасному етапі розвитку промисловості велика увага приділяється питанням, зв'язаним з підвищенням верхньої границі вимірювання температури платиновими термометрами опору. Тому важливими є дослідження фізичних властивостей термометрів опору при високих температурах.

Вважалося, що підвищення верхньої границі вимірювання температури високоомними термометрами опору неможливе через процеси розпилення платини, початок якого очікується при температурах 600-700 °С. Але результати досліджень показали, що в області температур 750-300 °С в зміна електричних параметрів термометрів опору при високих температурах залежить в основному від ступені забруднення платини. Це підтверджується також високою стабільністю платинових термометрів опору, в чутливих елементах яких платинова спіраль в каналах керамічного корпусу засипалась порошком, до складу якого входить 65% силікату натрію - Na_2SiO_4 та 35% оксиду алюмінію - Al_2O_3 .

Проведені дослідження показали, що надійність, технічний ресурс та стабільність термометрів опору залежать не тільки від температури і забруднення, які необхідно враховувати при їх проектуванні, виготовленні та експлуатації, а й від інших факторів, а саме: тиску, вібрації, деформації, швидкості робочого тіла.

Аналіз експлуатації термоперетворювачів в різних середовищах, коли на захисну арматуру діють механічні навантаження, показав, що зміну метрологічних характеристик можна враховувати ввівши коефіцієнт навантаження,

$$K_n = \frac{H_p - H_n}{H_n}, \quad (40)$$

Таблиця 5.

Зміна значень R_0 і R_{100}/R_0 термометрів з діаметром платинового дроту
 $0,05 \tau_0, f_0$ мм при температурі 750°C .

Початкове		Після 100 годин роботи				Після 1000 годин роботи			
R_0 , Ом	R_{100}/R_0	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$
100,010	1,39071	100,007	1,39072	-0,003	0,00001	100,142	1,39040	0,132	-0,00031
100,021	1,39065	100,022	1,39068	0,001	0,00003	100,172	1,39032	0,151	-0,00033
100,031	1,39066	100,032	1,39067	0,001	0,00001	100,184	1,39028	0,153	-0,00042
100,047	1,39059	100,047	1,39062	0,000	0,00003	100,157	1,39021	0,110	-0,00038
100,017	1,39074	100,018	1,39077	0,001	0,00003	100,189	1,39031	0,172	-0,00043

Таблиця 6.

Зміна значень R_0 і R_{100}/R_0 термометрів з діаметром платинового дроту
 $0,3$ мм при температурі 1100°C .

Початкове		Після 500 годин роботи				Після 1000 годин роботи			
R_0 , Ом	R_{100}/R_0	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$
0,10041	1,39034	0,10082	1,39020	0,00041	-0,00014	0,10118	1,39912	0,00077	-0,00122
0,10032	1,39043	0,10074	1,39020	0,00042	-0,00023	0,10103	1,39910	0,00071	-0,00137
0,10034	1,39051	0,10075	1,39031	0,00041	-0,00020	0,10114	1,39927	0,00080	-0,00124
0,10021	1,39049	0,10065	1,39012	0,00044	-0,00037	0,10108	1,39914	0,00087	-0,00135
0,10015	1,39050	0,10058	1,39001	0,00043	-0,00039	0,10109	1,39915	0,00094	-0,00135

Таблиця 7

Зміна значень R_0 і R_{100}/R_0 термометрів з діаметром платинового дроту
 $0,3$ мм при температурі 1300°C .

Початкове		Після 500 годин роботи				Після 1000 годин роботи			
R_0 , Ом	R_{100}/R_0	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$	R_0 , Ом	R_{100}/R_0	ΔR_0 , Ом	$\Delta R_{100}/R_0$
0,10031	1,39103	0,10125	1,39000	0,00094	-0,00103	0,10213	1,39918	0,00182	-0,00185
0,10022	1,39108	0,10143	1,39004	0,00121	-0,00104	0,10241	1,39920	0,00219	-0,00183
0,10044	1,39106	0,10137	1,39002	0,00093	-0,00104	0,10228	1,39908	0,00184	-0,00198
0,10051	1,39105	0,10086	1,39007	0,00035	-0,00098	0,10231	1,39910	0,00180	-0,00195
0,10037	1,39106	0,10141	1,39005	0,00104	-0,00101	0,10215	1,39901	0,00178	-0,00205

де K_H - коефіцієнт навантажування, H_p - параметр середовища термоперетворювача в робочому режимі та H_n - номінальне значення параметра середовища (передбачене технічними умовами ТУ).

Основними причинами впливу механічних навантажень на зміну чутливих елементів термоперетворювачів є великі швидкості руху вимірювального середовища (рідин, газів), високі температури.

Виходячи з цього, коефіцієнт навантаження термоперетворювачів при швидкості руху вимірювального середовища має вигляд

$$K_{H1} = \frac{V_{\phi} - V_{kp}}{V_{kp}}, \quad (41)$$

де V_{ϕ} - фактична швидкість потоку рідини або газу і V_{kp} - критична швидкість потоку вимірювального середовища. При імпульсному перевищенні робочої температури над номінальною коефіцієнт навантаження має вигляд

$$K_{H2} = \frac{T_e - T_n}{T_n}, \quad (42)$$

де T_e - температура, при якій експлуатується термоперетворювач і T_n - номінальна температура (передбачена ТУ) термоперетворювача.

Використання термоперетворювачів у навантаженому режимі різко скорочує термін їх роботи. Навпаки, використання в розвантаженому режимі зменшує середню частоту відмовлень і значно збільшує довготривалість їх нормальної експлуатації.

Встановлено, що адитивну відносну зміну електричного опору чутливого елемента можна визначити

$$\frac{\Delta R}{R_0} = e^{-K_1 \tau e^{\frac{1}{\sigma}}},$$

де K_1 - коефіцієнт навантаження за i -м параметром;

τ - тривалість дії параметру;

T - максимальна температура експлуатації;

E - постійна, яка має розмірність енергії активації;

K - постійна Больцмана.

З метою дослідження роботи термоперетворювачів було проведено збір, вивчення та узагальнення даних про відмовлення та зміну номінально-статичних характеристик термоперетворювачів під час експлуатації на промислових об'єктах і проведена статистична обробка їх результатів.

ВПЛИВ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ВИБІР КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ. 1,2,6,27,28,32

Термоперетворювачі знайшли широке застосування в металургійній, хімічній, електронній, цементній, паперовій, молочній та харчовій промисловостях, а також в ядерних реакторах атомних електростанцій, суднобудуванні, космічній техніці, спеціальних об'єктах нової техніки, різного виду транспортних установках, у спеціальному термічному обладнанні, військовій техніці та в найрізноманітніших науково-дослідних експериментах. Вони працюють в складних умовах експлуатації, які потрібно постійно вивчати, визначати фактори, які впливають на їх роботу і на цій підставі розробляти методики розрахунку захисних арматур термоперетворювачів і виробляти заходи по збільшенню терміну експлуатації та стабільності метрологічних характеристик.

В монографії [1] приведено перелік і докладні характеристики умов експлуатації платинових термоперетворювачів різноманітних конструкцій на сучасних промислових об'єктах. У процесі експлуатації термоперетворювачі працюють у складних умовах, в яких діють різноманітні фактори - агресивні хімічні середовища, змінні швидкості руху досліджуваного середовища, вібрації, удари, змінні тиски, радіаційні випромінювання та ін., що суттєво впливають на їх стабільність і тривалість експлуатації. Вище вже було

розглянуто вплив експлуатаційних факторів на метрологічні характеристики чутливих елементів. Зменшення таких впливів можна досягнути застосуванням цільної, жорсткої, міцної захисної арматури. Надійність роботи захисної арматури термоперетворювачів у різноманітних умовах експлуатації залежить від товщини стінки захисної арматури. Збільшення товщини стінки гільзи збільшує похибку вимірювання температури, а при зменшенні погіршується міцність арматури. Тому для конструювання важливо дати рекомендації для вибору оптимальної товщини стінки захисної арматури термоперетворювачів.

В умовах експлуатації захисна арматура навантажена одночасно дією високої температури, тиску і руху середовища (рідини, газу) з великою швидкістю. Для такого складного напруженого стану захисної арматури розроблено методику розрахунку, котра дозволяє знаходити критичні швидкості руху середовища в залежності від товщини стінки і довжини захисної арматури при різних температурах і тисках середовища. За основу взято уніфікований термометр опору ТСП-175 з діапазоном вимірювання від - 200 до + 500 °С з гільзою зі сталі Х18Н10Т аустенітного класу для захисної арматури.

При розрахунках використовувався енергетичний критерій міцності, який рекомендується для більшості сталей, що застосовуються в машинобудуванні.

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma], \quad (43)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні нормальні напруження в найбільш небезпечній точці перерізу.

Отримані формули для розрахунку допустимої довжини арматури в залежності від швидкості потоку при конкретних температурах і тиску на зовнішню поверхню захисної арматури мають вигляд

$$V_{\text{кр}} \leq \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\pi(1-\tau^4)}{2\rho} \cdot \frac{\left[\left(\frac{\sigma}{E} \right)^2 - \frac{3\tau^4}{(1-\tau^2)^2} \cdot \left(\frac{P}{E} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \frac{P\alpha^2}{E(1-\tau^4)} \right]} \right] \quad (44)$$

і на внутрішню поверхню захисної арматури

$$V_{\text{кр}} \leq \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\pi(1-\tau^4)}{2\tau} \cdot \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\left[\left(\frac{[\sigma]}{E} \right)^2 - \frac{3}{(1-\tau^2)^2} \cdot \left(\frac{P}{E} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[1 + \frac{1}{1-\tau^4} \cdot \frac{P}{E} \alpha^2 \right]} \right] \quad (45)$$

де r_1, r_2 - зовнішній і внутрішній радіуси поперечного перерізу арматури; $\tau = \frac{r_2}{r_1}$; ρ - густина рідини; α - коефіцієнт розширення; E - модуль пружності матеріалу при заданій температурі і P - тиск навколишнього середовища. З двох значень (44) і (45) вибираємо менше, котре приймаємо за розрахункове.

З використанням формул (44) і (45), проведені розрахунки при $r_1 = 5$ мм і $r_2 = 3$ мм для різних середовищ (технічної води, тяжкої води, перегрітої водяної пари), тиску (в діапазоні від 0 до $25 \cdot 10^7$ Па) і температур (від 0 до 600 °C).

Для практичного використання, побудовані розрахункові криві, які обмежують максимальну довжину арматури в залежності від швидкості потоку при заданих значеннях температури і тиску.

Термоперетворювачі в процесі експлуатації піддаються тою чи іншою мірою вібраціям, які можна враховувати за допомогою формул (44) і (45). Але при деяких турбулентних швидкостях потоків вібрація термоперетворювачів може посилитись настільки, що може привести їх до руйнування. Для таких швидкостей потоків вимірювального середовища при можливих резонансних власних коливаннях розроблена методика розрахунку для довжини захисної арматури із сталі X18H10T термоперетворювачів занурюваного типу.

$$V_{кр.} (м/с) = \frac{0,372106}{L^2 (мм)} \quad (46)$$

Залежність частоти власних коливань захисної арматури (консолі) f_0 від довжини консолі L визначається формулою

$$\frac{1}{\tau_0 (с)} = f_0 (Гц) = \frac{10^6}{0,134L^2 (мм)} \quad (47)$$

де $V_{кр.}$ - швидкість потоку, при якому період власних коливань циліндра співпадає з періодом збуджуючої сили; τ_0, f_0 - відповідно період і частота власних коливань консолі; L - довжина арматури термоперетворювача.

Для практичного користування побудовані графіки (Рис. 3, 4).

Таким чином, за допомогою запропонованих методик розрахунку і побудованих графіків можна коректно вибрати оптимальні розміри захисної арматури термоперетворювача, враховуючи вібрацію, швидкість потоків вимірювального середовища і тиск.

Залежність частоти власних коливань консолі f_0 від довжини консолі L

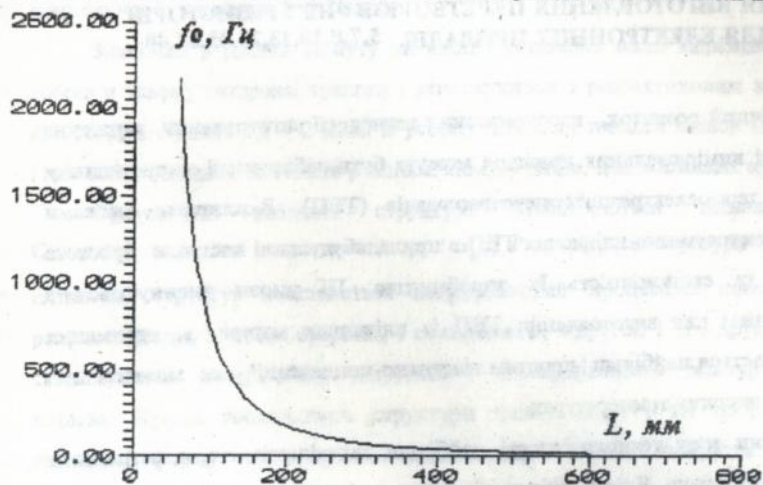


Рис. 3.

Залежність критичних швидкостей потоку $V_{кр}$ від довжини захисної арматури термометра

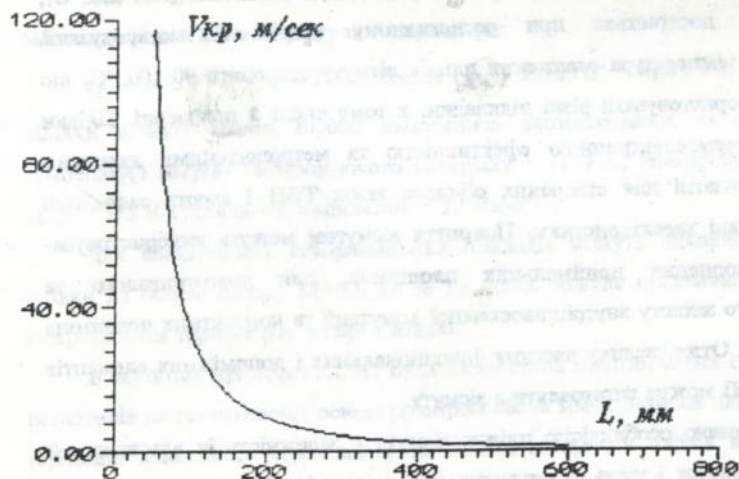


Рис. 4.

ПЛІВКОВА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ СПЛАВІВ ВІСМУТУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І РЕЗИСТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБЛАДІВ. 5,7,8,10,13,29,35,37,40

Технічний розвиток, вдосконалення технології виготовлення, зниження собівартості вимірювальних приладів можуть бути забезпечені застосуванням плівкових термоелектричних перетворювачів (ТЕП). Важливими умовами широкого застосування плівкових ТЕП в приладобудуванні виступає простота технології та економічність їх виробництва. Ці умови виконуються з використанням для виготовлення ТЕП із плівкових матеріалів, отримання яких відбувається найбільш простим вакуумно-конденсаційним методом при відносно невисоких температурах.

З точки зору технологічності найбільш задовільним термометричним матеріалом є вісмут. Якісні плівки вісмуту успішно отримують у відносно неглибокому вакуумі (10-Па). Їх властивості не критичні до глибини вакууму та складу залишкової атмосфери в робочій камері напилювального обладнання. Температура випаровування вісмуту у вакуумі невисока (830-850 °С); вона легко досягається при резистивному нагріванні випаровувача. Оптимальна температура осадження плівок вісмуту становить 90-100 °С, що дозволяє використовувати різні підкладки, в тому числі й полімерні. Плівки вісмуту за термоелектричною ефективністю та метрологічними якостями найбільш придатні для створення обидвох віток ТЕП і мають задовільні терморезистивні характеристики. Покриття вісмутом можуть використовуватись для чорнення приймальних площинок, для довготривалого та технологічного захисту внутрішньосхемної комутації та контактних поверхонь з плівок міді. Отже, велику частину функціональних і допоміжних елементів плівкових ТЕП можна виготовляти з вісмуту.

Характерною особливістю плівок вісмуту є залежність їх властивостей від виду підкладки і умов формування плівок на ній. При цьому ρ плівок вісмуту мало залежить від виду підкладки, а більше залежить від температури конденсації ($> 373\text{K}$) та температури і часу відпалу у вакуумі. Розмірний

ефект в плівках вісмуту проявляється із зменшенням товщини плівки, починаючи із значення $t=0,15$ мкм.

Значення ρ плівок вісмуту на шклі і гетинаксі мало відрізняється між собою в усьому інтервалі товщин і узгоджуються з розрахунковим значенням для товщин більше $1,5 + 2$ мкм. В усьому інтервалі товщин плівок (до 3 мкм) і для всіх підкладок значення ρ плівок вісмуту вище, ніж масивних зразків.

Сформовані плівкові структури стабілізуються відпалюванням. Складний характер залежностей ρ , i , α_p , i , α_p від температури і часу у плівкових структур пояснюється конкуруючими процесами повернення і рекристалізації, з однієї сторони, і окисленням, з другої. І ті і другі процеси активізуються поверхневою дифузиею і переорієнтацією текстур зерен в плівках. Краща досконалість структури плівок вісмуту на шклі, ніж на гетинаксі, формується в процесі відпалювання. Захищене покриття плівкової структури шаром монооксиду германію (температура конденсації 393К), як показали експерименти, запобігає окислюванню не впливаючи при цьому на структурні процеси.

Для виготовлення резисторів були вибрані підкладки із гетинаксу, який забезпечує для плівок вісмуту такі параметри:

$$\alpha_p = +1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}, \rho = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.см} \text{ і } \rho_s = 5 \text{ Ом}/\square \text{ при } t = 0,4 \text{ мкм.}$$

Плівки вісмуту марки Ві0000 наносились напилюванням на маски при температурі нагріву випаровуючого матеріалу ~ 1140 К, температурі конденсації ~ 373 К і швидкості напилення ~ 12 Нм·с⁻¹.

Для електронних вимірювальних приладів можуть використовуватись плівки на основі сплаву Ві+0,8 ат. % Рв, який володіє практично нульовим коефіцієнтом термо-е.р.с. в парі з міддю.

В серійних приладах КСМ2 була застосована мостова схема із плівкових резисторів на гетинаксовій основі розміром 80×48 мм². Захищена плівка оксиду германію наносилась через маску на плівки вісмуту, а плівки міді покривались горячим лудінням евтектичним сплавом Ві + 57 ат. % Sn (T=412 К).

Підгонка резисторів схеми до номіналу проводилась шляхом оплавлення країв резистивної доріжки паяльником ПСН 28-6 ($T \cong 570 \text{ K}$) з контролем параметрів автоматичним цифровим мостом Ф4206.

Випробування показали відповідність приладу вимогам технічної документації при нормованих діях електромагнітних завад, транспортної вібрації, дії вологи і температури навколишнього середовища (від 274 до 323 K).

Властивості вісмуту, а значить, і властивості плівок, можна легко змінювати, покращувати та оптимізувати шляхом легування різними домішками, наприклад, сурмою та мис'яком і особливо елементами IV В (оловом, свинцем), які є акцепторами для вісмуту, і VI В (селеном, телуrom) з донорною дією. При виборі легуючого компоненту для вісмуту треба керуватись тим, щоб елемент мав достатню розчинність у вісмуті, був нетугоплавким для полегшення синтезу сплавів і якомога більш близьким до вісмуту за пружністю пари для виключення значних диспропорцій сплавів при випаровуванні. Виходячи з цих міркувань і згідно з проведеними розрахунками, найбільш вдалим та ефективним є сплави вісмут-сурма та вісмут-телур - як плівкові термоелектричні матеріали р-типу та сплав вісмут-свинець - як плівковий резистивний і термоелектричний матеріал п-типу рис. 5, 6.

На основі проведених досліджень розроблено дослідно-промислові технології резистивно-термоелектричних перетворювачів, термоелектричних приймачів випромінювання та резистивних схем на основі плівок сплавів вісмуту для вимірювальних приладів. Виготовлена дослідна партія плівкових вимірювальних схем для автоматичних електронних мостів і потенціометрів на основі плівок сплаву вісмут-свинець.

Застосування плівок сплавів вісмуту з сурмою у вигляді термоелектричних приймачів випромінювання дозволило підвищити їх чутливість і забезпечило вдосконалення приладів для дистанційного вимірювання температури на їх основі. Дослідні зріпки приладів виготовлені промисловим концерном "Львівприлад" і передані ряду підприємств для контролю

Залежність дійсних і розрахункових (1) значень коефіцієнта термо-е.р.с. (α) і ТКО (6) неоднорідних плівок сплавів вісмут-свинць до (2) і після (3) відпалу від вмісту свинцю.

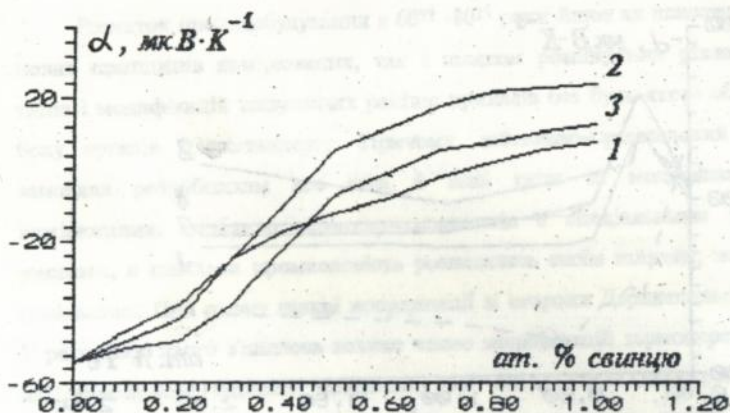


Рис. 5.

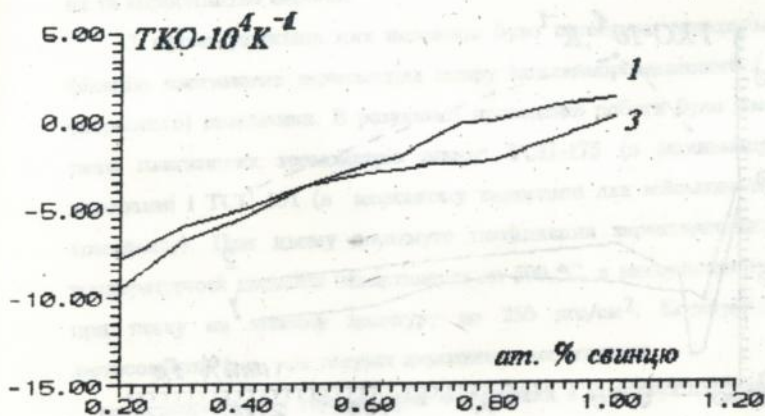


Рис. 6.

Залежність коефіцієнта термо-е.р.с. (Рис.7) і ТКО (Рис.8) плівок сплавів вісмут-телур від вмісту телура (1,3 - плівки конденсовані при 293 і 373 К відповідно, до відпаалу; 2,4 - після відпаалу при 393 К на протязі 242); штрихами показано залежності для масивних зразків.

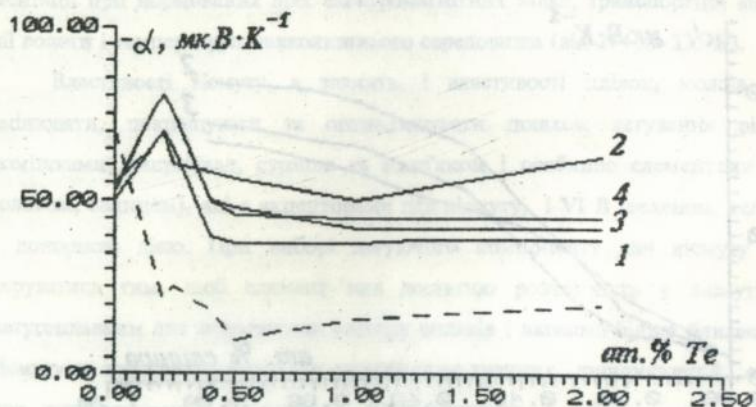


Рис. 7.

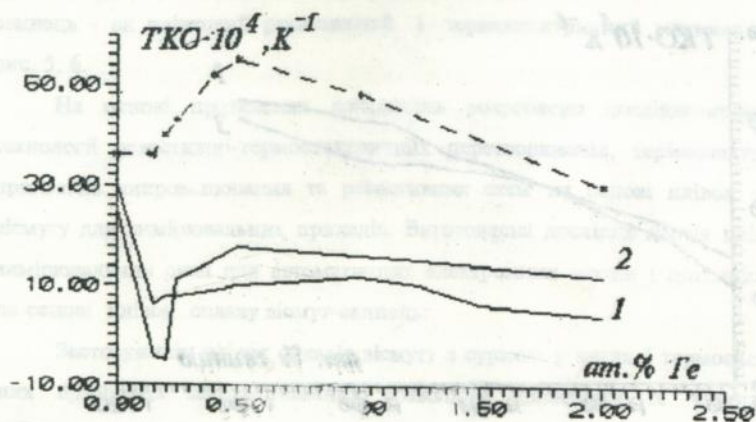


Рис. 8.

температури технологічних процесів.

УНІФІКАЦІЯ І СТАНДАРТИЗАЦІЯ . 51,15,24,25

Розвиток приладобудування в 60ті -80ті роки йшов як шляхом створення нових принципів вимірювання, так і шляхом розширення різновидностей, типів і модифікацій випущених раніше приладів без будь-якого обмеження з боку органів Держстандарту. Причому, військово-промислової комплекс замовляв розробникам все нові й нові типи та модифікації засобів вимірювання, особливо термоперетворювачів з спеціальними технічними умовами, а цивільна промисловість розвивалась своїм шляхом, хоч і значно повільніше. При цьому ніякої координації зі сторони Держстандарту не було. У результаті цього з'явилося велике число модифікацій термоперетворювачів, які виконували однакові завдання, але відрізнялися конструкціями або окремими елементами конструкцій. В багатьох випадках такий стан ставав невиправданим і ускладнював проєктування, експлуатацію, ремонт, замовлення та виробництво виробів.

З метою усунення цих недоліків було проведено модернізацію та уніфікацію платинових термометрів опору загальнопромислового і військового (морського) виконання. В результаті проведеної роботи було розроблено два типи платинових термометрів опору: ТСП-175 (в загальнопромисловому виконанні і ТСП-331 (в морському виконанні для військово-промислового комплексу). При цьому досягнуто поліпшення характеристик: розширено температурний діапазон вимірювання до 500 °С, а використовувати їх можна при тиску на захисну арматуру до 250 кгс/см². Конструкція дозволяє застосовувати їх в усіх галузях народного господарства.

В розроблених термометрах закладений в конструкцію новий чутливий елемент, який був розроблений на базі застосування нових матеріалів, технології і покращеної конструкції і забезпечив високу стабільність метрологічних характеристик термометрів в умовах експлуатації на протязі

тривалого часу. Проведені експерименти та випробування показали, що максимальне відхилення опору від номінального значення на протязі 15000 год. складає всього 0,04%, що лежить в межах допустимого відхилення, а тому технічний ресурс термометрів опору збільшився більше ніж в 5 раз. Номенклатура типів деталей і вузлів після проведеної уніфікації зменшилася в 12 разів (138 замість 1657 найменувань). Проведена уніфікація дозволила значно знизити трудосмість виготовлення термометрів.

На основі проведених робіт розроблено і офіційно затверджено Державний стандарт на даний термометр. Таким чином, розробки з уніфікації і стандартизації в галузі термоперетворювачів доведені до офіційного затвердження і розповсюдження.

Одночасно, сукупність рекомендацій, отриманих в результаті проведених експериментів, дозволила розробити універсальну конструкцію поверхнево-занурювального термометра опору для вимірювання температури різних об'єктів від 0 до 750 °С. При цьому підвищилась точність вимірювання температури завдяки малим розмірам чутливого елемента. Цей термометр захищений авторським свідоцтвом¹¹.

МОНОГРАФІЯ, ДОВІДНИК І РЕЦЕНЗІЯ .

Розробки в галузі створення термоперетворювачів і автоматичних електронних мостів і потенціометрів узагальнені, порівняні із світовими досягненнями, опубліковані в монографії "Контактные датчики температуры" (1978 г.) і доповнені виданням довідника "Приборы для измерения температуры контактным способом". (1978 г.). Видання позитивно оцінені в опублікованих рецензіях.

Обидві книги задовільнили запити інженерно-технічних працівників промислових підприємств і науково-дослідних інститутів, які займаються розробкою, експлуатацією та обслуговуванням систем автоматички і

контрольно-вимірювальних приладів, систематизували проблеми і визначили засоби розвитку і виробництва термоперетворювачів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі на підставі проведених досліджень здійснено вирішення науково-технічної проблеми, пов'язаної з покращенням метрологічних характеристик, підвищенням надійності та розширенням діапазонів приладів для контактного вимірювання температури. Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Створені математичні моделі, які адекватно описують процеси зміни метрологічних характеристик термоперетворювачів внаслідок протікання фізико-хімічних процесів в об'ємі термометричного матеріалу під дією зовнішніх механічних, радіаційних і температурних факторів, при рекристалізації, поверхневому окисленню, перерозподілі основних компонентів матеріалу і насиченні металу газами. Теоретична оцінка зміни опору платинового чутливого елемента в реальних умовах експлуатації підтверджена експериментальними даними. Сформульовані практичні рекомендації для користування запропонованими математичними моделями при інженерних розрахунках.

2. Експериментально встановлені основні закономірності змін характеристик платинових терморезистивних перетворювачів широкого промислового використання в залежності від умов експлуатації. Запропоновані співвідношення для кількісної оцінки різних складових похибок і вироблені рекомендації з стабілізації метрологічних характеристик; встановлені єдині вимоги до матеріалів термоперетворювачів, технології їх виготовлення; закладені основи конструювання термоперетворювачів. Проведена кількісна оцінка різних складових їх похибок.

3. Розроблений метод розрахунку жароміцності захисної арматури термоперетворювачів занурювального типу і одержані формули для розра-

хунку залежності допустимої довжини арматури від швидкості потоку при заданих температурах і тисках.

Виведені розрахункові формули для визначення частоти власних коливань арматури від її довжини при різних швидкостях потоку і побудовані графіки для практичного користування.

Запропонована методика розрахунку граничних швидкостей потоку вимірювального середовища при резонансних коливаннях термоперетворювачів опору.

4. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено ефективність використання плівок вісмуту і його сплавів для створення терморезистивних і термоелектричних перетворювачів. Досліджено різні матеріали для підкладки (боросилікатне скло, лужно-гелюїдні кристали, слюда, поліомід, геткнакс і склотекстоліт) плівок і показана їх придатність для формування пліткових структур на основі вісмуту, сурми і свинцю для резистивного і термоелектричного призначення. Експериментально досліджено резистивні і термоелектричні властивості таких плівок в залежності від хімічного складу. Експериментально вирішена проблема уніфікації технології, вибору використовуваних матеріалів і технологічного обладнання для організації виробництва та використання сплавів вісмуту для виготовлення резисторів у вимірювальних приладах.

5. Теоретичне і експериментальне дослідження метрологічних характеристик термоперетворювачів в різних умовах промислової експлуатації дало змогу провести уніфікацію існуючих термоперетворювачів і створити нові перетворювачі зі значно підвищеними метрологічними характеристиками і подовженим терміном служби. На уніфіковані платинові термоперетворювачі розроблений і затверджений Державний стандарт.

6. Розробки засобів вимірювань температури узагальнені та співставлені з світовим досвідом, опубліковані у вигляді монографії (1978 р.) і доповнені виданням довідника (1978 р.). Обидва видання позитивно оцінені в опублікованих рецензіях (*).

В цілому обидві книги задовільнили запити інженерно-технічних працівників промислових і науково-дослідних інститутів, які займаються розробкою, експлуатацією та обслуговуванням систем автоматики і контрольно-вимірювальних приладів, систематизували проблеми та визначили засоби розвитку і виробництва термоперетворювачів.

Аспекти наукового аналізу та підготовки спеціалістів з теорії та практики термоперетворювачів вирішені рецензованими і навчально-методичними засобами, в яких сформульовані концепції та принципи вибору матеріалів, конструкцій і технологій, вимірювальних схем і захисної арматури термоперетворювачів.

Примітка. (*) - Див. А.Г.Полубояринов. Рецензія на книгу Р.В.Бычковского "Контактные датчики температур". Заводская лаборатория, -1979, № 9.- с. 78 і Б.И.Синчук. Рецензія на справочник под редакцией Р.В.Бычковского "Приборы для измерения температуры контактным способом", "Приборы и системы управления" -1979, - № 7.-с.46.

ПУБЛІКАЦІЇ

які віддзеркалюють зміст дисертаційної роботи

Монографія

1. Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры.-М.:Металлургия, 1978.-238 с.

Доповіді на науково-технічних
конференціях

2. Бычковский Р.В. Внедрение на заводе "Львовприбор" системы бездефектного изготовления продукции //Республиканская научно-техническая конференция приборостроения по качеству и надежности. - Львов: 1965. с.11 - 12.

3. Бычковский Р.В., Козак О.Б. Механизация технологических процессов производства электрических термометров сопротивления //Всесоюзная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов по технологии приборостроения. - Краснодар:1972.-с.36.

4. Бычковский Р.В., Полищук В.В., Френчко В.С. Влияние металлических расплавов на свойства термоэлектродных материалов // Всесоюзный семинар по модельным теориям расплавов и дифракционным методам исследования. - Львов: 1972. - с.23.

5. Бычковский Р.В. Комплекс автоматических самопишущих приборов типа КС2 и унифицированные платиновые термометры сопротивления // Научно-техническая конференция по автоматизации в Молдавской энергосистеме. - Кишинев: 1973. - с.108 - 112.

6. Бычковский Р.В. Комплекс автоматических самопишущих приборов типа КС2 и унифицированные платиновые термометры сопротивления // Всесоюзная конференция по измерительным информационным системам. - Ивано-Франковск: 1973. - с.27.

7. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Ушлинов Г.А., Колесник Г.А., Шварц Б.А. Исследование резистивных свойств тонких пленок висмута // VII Всесоюзная научно-техническая конференция по микроэлектронике, - Львов: 1975. - с.48 - 49.

8. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Колесник Е.А., Ушлинов Г.А., Шварц Б.А. Исследование резистивных свойств тонких пленок висмута и разработка на их основе измерительных схем приборов типа КС // VIII Всесоюзная Конференция по микроэлектронике. - М.: МИЭТ, 1978. - с. 120 - 121.

9. Бычковский Р.В., Грибок Н.И., Зорий В.И., Савенко С.А., Сасин Ю.В., Стаднык Б.И., Суркова Т.С. Цифровые портативные терморезисторы // VI Всесоюзная конференция "Электротермометрия - 88". Луцк: 1988. - с.120 - 121.

10. Бычковский Р.В., Шингельский М.Л., Доминюк И.М., Янушкевич П.С. Бесконтактные методы исследования влияния на термоэлектрические свойства химически активных веществ, находящихся в твердом и жидком состояниях // VI Всесоюзная конференция "Электротермометрия" - 88. - Луцк: 1988. - с.454.

11. Бичківський Р.В. Покращення метрологічних характеристик приладів для контактної вимірювання температури // VII Міжнародна науково-технічна конференція, Львів, 1992, "Температура-92", с.31-32.

12. Бичківський Р.В., Вигдорович В.Н., Карімбеков М.А. Плівковий манометричний термопарний перетворювач. Метрологічне забезпечення температурних теплофізичних вимірювань. V науково-технічна конференція "Термометрія-94", Харків, 51.05.-2.06.1994 р., с.124-127.

Авторські свідоцтва

13. Бычковский Р.В., Скородинский Н.А., Шварц Б.А. Термометр сопротивления. - Авторское свидетельство СССР ; № 352153 с приоритетом от 19 июня 1972 г.; опубликовано: Бюллетень № 28, с.127. 1972.

14. Бычковский Р.В., Васильева Л.Л., Трущенко А.А., Шварц Б.А. Термометр сопротивления. - Авторское свидетельство СССР № 527606 с приоритетом от 14 мая 1976 г.; опубликовано: Бюллетень № 33, с.117 - 1976.

15. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Колесник Е.А., Ухлинов Г.А., Шварц Б.А. Материал для тонкопленочных резисторов. - Авторское свидетельство СССР № 587714 с приоритетом от 11 сентября 1977 г.

16. Бычковский Р.В., Грибок Н.И., Зорий В.И., Процько И.Е., Романюк С.Г., Савенко С.А., Сасин Ю.В., Стадник Б.И., Сурков Т.С. Цифровой термометр. - Авторское свидетельство СССР № 15801082 с приоритетом от 22 марта 1990 г.

Довідник

17. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Колесник Е.А., Моспанченко Р.С., Ухлинов Г.А., Шварц Б.А. Приборы для измерения температуры контактным способом. Под ред. Р.В.Бычковского. - Львов: Вища школа, 1978. - 208 с.

Державний стандарт

18. Бычковский Р.В., Шварц Б.А., Корякина Л.А. Термометр сопротивления платиновый унифицированный ТСП - 175. - ГОСТ 5.1897-73 /Постановление госстандарта СССР № 533 от 06 марта 1973 г./

Організація виробництва

(забезпечення якості праці і продукції).

19. Бычковский Р.В. За бездефектное изготовление продукции.- Информационный листок ЦБТИ Львовского совнархоза . - Львов: 1964. - 4 с.

20. Бычковский Р.В., Черенков В.Н. Система организации бездефектного изготовления продукции и сдача ее с первого предъявления на заводе "Львовприбор". - Реферативный сборник, вып. I ЦНТИИТЭИ приборостроения, 1969. - 48 с.

21. Бычковский Р.В., Магалашвили В.В., Колесник Е.А., Система управления качеством труда и продукции. (Методическое руководство).- М.: Минприбор, 1971. - 56 с.

22. Бычковский Р.В., Дмитриев Н.И. Ускорение рассмотрения и внедрения рационализаторских предложений и изображений на предприятиях . - Информационный листок № 58. - Львов: Львовский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации. 1972. - 4 с.

23. Бычковский Р.В., Колесник Е.А. Внедрение системы управления качеством труда и продукции. Информационный листок № 172. Львов: Львовский ЦНТИ, 1973 . - 5 с.

24. Бычковский Р.В., Колесник Е.А. Опыт работы завода "Львовприбор" по обеспечению качества выпускной продукции // Стандарты и качество. - 1973. № 4& - с.26 - 27.

25. Бычковский Р.В., Моспанченко Р.С., Ухлинов Г.А., Шварц Б.А. Проведение метрологической экспертизы (опыт работы завода "Львовприбор"). Информационный листок № 84-76.-Львов: Львовский ЦНТИ. 1976. - 3 с.

Див.так: 1 і 2.

Вдосконалення виробництва

(дослідження і оптимізація факторів)

26. Бычковский Р.В., Лискин И.Я., Скородинский Н.А., Сотников И.И., Антонович А.В., Шварц Б.А. Обзорная технико-экономическая информация по унификации термометров сопротивления - Львов: ЛМТЦ НТИ УКРНИИНТИ Госплана УССР, 1970. - 12 с.

27. Бычковский Р.В., Шварц Б.А. Повышение технического ресурса и унификация изделий в приборостроении // Сб. Экспресс Стандарт (Качество, стандарты, метрология), вып. 39.- М.: Госстандарт, 1971. - с.13.

28. Бычковский Р.В., Иванов А.Г., Приступа Ю.П., Скородинский Н.А., Шварц Б.А. Расчет защитной арматуры термопар и термометров сопротивления.// Автоматика, телемеханика, приборостроение. № 11. - 1971. - № 11. - с. 32 - 42.

29. Бычковский Р.В., Иванов А.Г., Приступа Ю.П., Скородинский Н.А., Шварц Б.А. Определение расчетным методом области скоростей потока измеряемой среды, вызывающих резонансные колебания параметров сопротивления // Автоматика и телемеханика, приборостроение.- 1971. - № 11. - с. 43 - 50.

30. Бычковский Р.В., Скородинский Н.А. Повышение технического ресурса термометров сопротивления // Сб. Экспресс стандарт /Качество, стандарты, метрология/ вып. 5. -М.: Госстандарт, 1972.

31. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н. Изучение влияния примесей в платине на электрические характеристики термометров сопротивления // Сб. научных трудов по проблемам микроэлектроники - М.: МИЭТ, 1972.- с.91 - 94.

32. Бычковский Р.В., Дутчак Я.М., Прохоренко В.Я., Скородинский И.А. Исследование влияния структурных изменений в платине на стабильность платиновых термометров сопротивления // Киев: Сб. "Элементы и

системы автоматки в нефтяной и газовой промышленности, техника, 1974
с.81 - 82

33. Бычковский Р.В., Макаров И.Н. Вибрационная установка для снятия облоя с пластмассовых деталей при глубоком охлаждении Сб. "Технология и организация производства" К.: Госплан УССР. - 1972. № 5 - с.26 - 27.

34. Бычковский Р.В., Иванив А.Г., Приступа Ю.П., Скородинский Н.А., Шварц Б.А. Определение расчетным методом скоростей потока измеряемой среды, вызывающих резонансные колебания термометров сопротивления // Метрология. - 1974.- № 7. - с.19.

35. Бычковский Р.В., Каракина Л.А., Скородинский Н.А. О перегреве термометров сопротивления измерительным током // Метрология. - 1974. - № 7. - с.11.

36. Бычковский Р.В., Васильева Л.Л., Кочан В.А. Повышение точности измерения температуры термометрами сопротивления // Метрология. - 1975. - № 6, с.32 - 33.

37. Бичківський Р.В., Ванкевич П.І., Величко А.Д. Моделювання умов теплообміну при контактному вимірюванні температури поверхні. // Вимірювальна техніка та метрологія. - Львів: Вища школа. вип. 51, 1994.

38. Бичківський Р.В., Стадник Б.І., Столярчук П.Г. Вплив фізико-хімічних змін на напружений стан термометричного матеріалу. Ст. депонована в ДНТБ України 27.10.1994 р. № 2087- Ук 94.

39. Бичківський Р.В., Столярчук П.Г. Математична модель оцінки впливу радіаційного опромінення на платиновий чутливий елемент. Ст. депонована в ДНТБ України 27.10.1994 р. № 2088-Ук 94.

40. Бичківський Р.В., Столярчук П.Г. Математично модель дестабілізації характеристик термоперетворювачів. Ст. депонована в ДНТБ України 27.10.1994 р. № 2089- Ук 94.

Див також: 1,3,4,7,8 і 9.

Розробки в галузі перспективних
плівкових технологій і конструкцій

41. Бычковский Р.В., Колесник Е.А., Ушлинов Г.А., Шварц Б.А. Исследование резистивных свойств тонких пленок висмута // Сб. научных трудов по проблемам микроэлектроники, вып. 28. - М.: МИЭТ, 1976, - с.29 - 34.

42. Бычковский Р.В., Колесник Е.А., Ушлинов Г.А., Шварц Б.А., Чиботару Н.И. Исследование резистивных свойств тонких пленок висмута // Электронная техника, серия "Материалы". - 1978. - Вып. 1. - с.19 - 22.

43. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Доменюк И.М. Пленочные термоэлектрические преобразователи измерительного назначения. Пленочные термопары (Методические указания). - Львов: ЛПИ, 1989. - 52 с.

44. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Пленочные резисторы для электронных измерительных приборов. Приборы и техника эксперимента, 1994, №1, -с.194-196.

45. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Манометрический термопарный преобразователь в пленочном исполнении. Приборы и техника эксперимента, 1994, №2, -с.170-173.

46. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Пленочные резисторы для вторичных электронных измерительных приборов. Приборы и системы управления, 1994, №2, -с.38-39.

47. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Пленочный аналог манометрического термопарного преобразователя. Приборы и системы управления, 1994, №5, -с.46-47.

Див. також 7,8 і 9.

Рецензія на монографію

48. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н. Рецензия на книгу Г.В. Самсонова и др. "Датчики для измерения температуры в промышленности // Заводская лаборатория. - 1974. Том.40. - № 10. с. 78.

Навчально-методичні посібники

49. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Гузовская Н.А. и др. Материаловедение (Методическое пособие), вып. 11, М.: МИЭТ, 1972. - 153 с.
50. Бычковский Р.В., Вигдорович В.Н., Дутчак Я.И., Ушлинов Г.А. Основы учения о фазах и диаграммах состояния / учебно-методические пособия // Львов: Выща школа, 1976. - 111 с.
51. Бычковский Р.В., Стаднык Б.И., Чайковский О.И. Организация курсового проектирования на основе деловых игр для студентов специальности 0642 - "Информационно-измерительная техника" (учебно-методическое пособие). - Львов: ЛПИ, 1987. - 14 с.
52. Бычковский Р.В., Дорожовец М.М., Ивахив О.В., Пуцило В.И., Серкиз А.В., Столярчук П.Г., Тищенко Л.М., Чайковский О.И., Шморгун Е.И. Методы измерения электрических величин (учебно-методическое пособие). - Львов: ЛПИ, 1989. - 92 с.

Бычковский Р.В. Приборы для контактного измерения температуры с улучшенными метрологическими характеристиками.

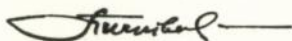
Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.04 - приборы и методы измерения тепловых величин, Государственный университет "Львовская политехника", Львов, 1994.

Защищается монография, 52 научные работы и 4 авторских свидетельства, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования по созданию приборов для контактного измерения температуры с улучшенными метрологическими характеристиками. Установлены основные закономерности изменений характеристик платиновых термопреобразователей широкого промышленного применения в зависимости от условий эксплуатации. Созданы математические модели, позволяющие адекватно описывать процессы изменения метрологических характеристик термоэлектрических преобразователей при протекании физико-химических процессов в объеме термометрического материала под воздействием внешних механических, радиационных и температурных факторов, при рекристаллизации, поверхностном окислении, перераспределении основных компонентов материала и насыщении металла газами.

Bychkivskiy R.V. The contact measuring temperature devices with improved metrological characteristics.

The thesis for a doctor's degree of technique science on field: 05.11.04? The devices and the techniques for the measuring thermal values State university "Lviv Politechnic", Lviv, 1994. The monograph, 52 science works, 4 authors certificates are submitted. These works contained some results of theoretical and experimental research onto making the contact measuring temperature instruments with improved metrological characteristics. The basis phenomenons of the changes of the platinum thermotransducers characteristics exploitations conditions are determined. The mathematic models for the adequate describing of the metrological characteristics of the thermoelectric transducers changes that depend on physical and chemical process into body of thermoelectrical transducers due to the external mechanical, nuclear radiation, temperature factors, recrystallization, surface oxidation, gas into metal saturation phenomenons are determined.

Ключові слова: чутливий елемент, термоперетворювач, захисна арматура, засипка, тонкоплівкова технологія.



Підп. до друку 16.11.94 . Формат 60x84^I/16
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк. 3,5
Умовн. фарб.-відб. 3,5 Умовн. видав. арк. 3,25
Тираж 100 прим. Зам. 520 . Безплатно

ДУЛП 290646 Львів-ІЗ, Ст. Бандери, І2

Дільниця оперативного друку ДУЛП
Львів, вул. Городоцька, 266

AB 31.315