

Swiatosław JACYSZYN¹, Bohdan STADNYK^{1,2}, Pyłyp SKOROPAD¹

¹ UNIWERSYTET NARODOWY „POLITECHNIKA LWOWSKA”

² POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Analiza efektywności stosowania w termometrii funkcjonalnie-gradientowych czujników termoelektrycznych

Dr inż. Swiatosław JACYSZYN

Adiunkt Instytutu Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika”. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1971 r. Doktorat w 1977 r. Zatrudniony na stanowisku adiunkta katedry Technologii Informacyjno-Pomiarowych Politechniki Lwowskiej od 2000 r. Obszary działalności naukowej - to badania stanów termodynamicznych układów materiałów elementów czułych przetworników temperatury; współautor monografii oraz ponad 70 artykułów.

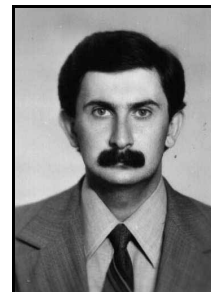
e-mail: Rossard@yandex.ru



Dr hab. inż. Pyłyp SKOROPAD

Absolwent Wydziału Mechanicznego Ukraińskiego Instytutu Poligraficznego we Lwowie w 1980 r. Doktorat w 1990 r. w Politechnice Lwowskiej, gdzie od 1995 r. pracuje na stanowisku profesora katedry Technologii Informacyjno-Pomiarowych. Przedmiot zainteresowań - amorficzne stopy metaliczne: ich charakterystyki jako materiałów elementów czułych przetworników pomiarowych temperatury. Jest autorem lub współautorem ponad 80 artykułów.

e-mail: skorfil@yahoo.co.uk



Prof. dr hab. inż. Bohdan STADNYK

Dyrektor Instytutu Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu „Lwowska Politechnika”. Kierownik katedry Technologii Informacyjno-Pomiarowych od 1981 r. Ukończył Politechnikę Lwowską w 1958 r. Doktorat w 1967 r., dr hab. - 1981 r., prof. - 1983 r. Obszary działalności naukowej - przyrządy do pomiaru wielkości nieelektrycznych, sensory wielkości fizycznych, a szczególnie temperatury; autor 12 podręczników i monografii oraz 80 patentów.

e-mail: stadnyk@polymet.lviv.ua



Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę problemu zwiększenia metrologicznej stabilności czujników termoelektrycznych. W celu realizacji precyzyjnych narzędzi do pomiaru temperatury rozpatrzono możliwość stosowania w termometrii funkcjonalnie-gradientowych czujników termoelektrycznych.

Słowa kluczowe: termometria, szum, powierzchnia, fluktuacja, termodynamika, efekty termoelektryczne.

The effectivity analysis for functional-gradient thermoelectric sensor applying in thermometry

Abstract

An analysis of stability improvement of thermoelectric sensors was presented. Possibility of applying functional - gradiented materials in thermometry for to realise the precise sensors was considered.

Keywords: thermometry, noise, surface, fluctuation, thermodynamics, thermoelectric effects.

1. Wprowadzenie

W procesie poprawy jakości metrologicznej przetworników termoelektrycznych teoretycznie była uzasadniona celowość wykorzystania funkcjonalnie-gradientowych ogniw Peltiera [1]. W sposób podobny (uwzględniając, że w trakcie trwałego nagrzewania się materiału termometrycznego (MT) w zasięgu gradientu temperatury wskutek zachodzących przy tym procesów fizycznych kształtuje się gradient potencjału chemicznego i stabilny, w stosunku do zmian funkcji przetwarzania czujnika, stan termodynamiczny MT), w celu realizacji precyzyjnych czujników w literaturze [2] analizowano możliwość stosowania w termometrii funkcjonalnie-gradientowych czujników termoelektrycznych.

Problem, przy tym, polega na uzyskiwaniu rzeczywistego charakteru rozkładu niejednorodności w MT, co nawet na dzień dzisiejszy jest dość skomplikowanym fizyko-technologicznym zadaniem [1].

Próba zrealizowania funkcjonalnie-gradientowych termoelementów o niejednorodnej mikroporowatości MT na odcinku o długości ok. 500 m była omawiana w [3]. Biorąc pod uwagę, że długości MT czujników termoelektrycznych (CT), znajdujących się w zasięgu gradientu temperatury w trakcie eksploatacji, są znacznie mniejsze - 10^{-3} ...1,0 m, możemy nie uwzględniać wpływu niejednorodności MT na charakterystyki badane. Jeszcze jedną wadą analizowanego wyżej podejścia jest uproszczona analiza MT, a mianowicie - jako obiektu jednowymiarowego, chociaż efekty termoelektryczne, jak również i MT z zasady nie są jednowymiarowymi.

2. Cel pracy i podstawy teoretyczne

Główny cel pracy - podwyższenie stabilności metrologicznej CT poprzez badanie oddziaływania na nią procesów i zjawisk, zachodzących w warstwach powierzchniowych MT, przy zmianie średnicy MT na roboczym odcinku CT w zasięgu wpływu gradientu temperatury.

Badanie próbek MT, otrzymywanych metodami charakterystycznymi dla metalurgii proszków, przewiduje przeprowadzenie badań wpływu na ich właściwości procesów i zjawisk powierzchniowych poprzez charakterystyki, które zależą od stanu powierzchni i czynnika „powierzchnia / objętość”.

Opisane w [4] zmiany funkcji przetwarzania CT są powiązane z modułem Jounga E_U , który w [5] wyrażono przez energię drgań cieplnych atomów kT i średni kwadrat amplitudy drgań atomów

$(\Delta a)^2$ materiału termometrycznego: $E_U \sim \frac{kT}{(\Delta a_i)^2}$. Przy tym,

powierzchniowy moduł Jounga E_{US} jak również i temperaturowy współczynnik rozszerzalności liniowej α_S są różne od objętościowych (tab. 1). Wartość E_{US} oszacowano na podstawie badań widm fononowych (tab. 1): uśredniony kwadrat amplitudy drgań atomów na powierzchni jest większy niż objętościowy, a więc $E_{US} < E_{UV}$ (S - powierzchnia; V - objętość).

Analogicznie jest ze współczynnikiem α i współczynnikiem Grjuneizena G (tab. 2). Z analizy uzyskanych danych wynika, że powierzchniowy współczynnik Grjuneizena G_S zależy od stanu powierzchni i że $G_S > G_V$.

Tab. 1. Charakterystyki atomowe powierzchni granicy „atomy – próżnia”
Tab. 1. Atomic characteristics of surface of boundary „atoms - vacuum”

Monokryształy	$\frac{(\Delta a_s)^2}{(\Delta a_v)^2}$	$\frac{\alpha_s}{\alpha_v}$
Si	2 ... 6	8
Ge	4	4
Al	-	2
Cu	2	1,5 ... 2
Mo	2,5	3
Nb	7	3

Tab. 2. Współczynniki Grjuneizena powierzchniowe i objętościowe dla szkła kwarcowego

Tab. 2. The Grjuneizena coefficients for a surface and volume of quartz glass

Kwarc topiony	$\frac{G_s}{G_v}$
Polerowany	8
Obrobiony w rozładowaniu gazowym	5
Obrobiony w rozładowaniu niskoczęstotliwościowym	3
Rdzeń próbki	1

W badaniach wykorzystano wyżej podane materiały w celu oszacowania ogólnego wpływu procesów powierzchniowych i stanu powierzchni na stabilność funkcji przetwarzania CT.

3. Badania eksperymentalne

W procesie badań ustalono, że wpływ zmniejszenia średnicy MT na stabilność funkcji przetwarzania CT w miarę zbliżania się do spoiny roboczej można eksperymentalnie analizować podanymi dalej sposobami.

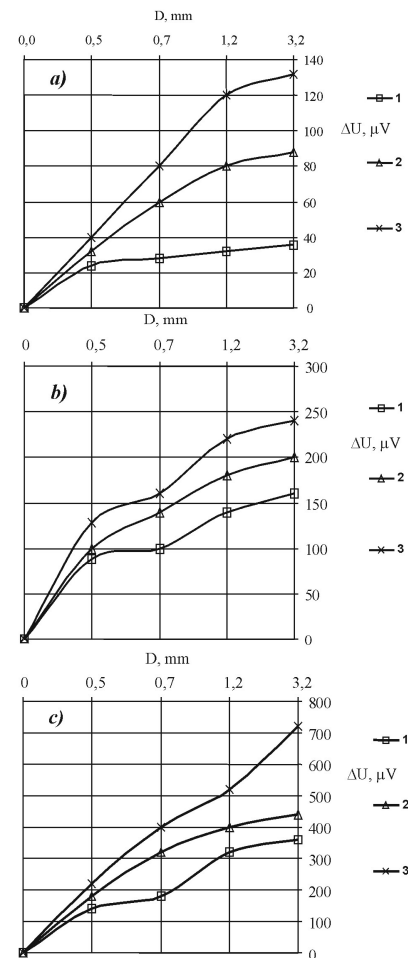
Pierwszy z nich, zrealizowany w [6], - przez badanie oddzielnych partii MT o różnych średnicach (rys. 1). Powstające tu odchylenia funkcji przetwarzania CT rosną przy zmniejszeniu średnicy MT przy tych samych temperaturach i czasie wyżarzania. Naszym zdaniem, wskazuje to na dominującą rolę wpływu stanu powierzchni, ponieważ przy znacznej wartości czasu wyżarzania wpływ technologicznie wniesionych w MT napięć mechanicznych jest znikomy.

Drugi sposób – to badanie temperaturowo-czasowych zmian funkcji przetwarzania czujników przy zmniejszeniu średnicy MT przez przeciąganie. W taki sposób, pręty MT o średnicy 7,0mm, otrzymywane metodą metalurgii proszków, przeciągane są w drut o średnicy 0,1mm, przy czym w trakcie deformowania MT wielokrotnie poddawane są obróbce termicznej. Pobierane próbki dla oceny zagęszczenia liniowego MT.

Zmiany średniej siły termo-elektro-motorycznej (termo-e.m.s.) próbek badane były w odniesieniu do monokryształowego molibdenowego drutu o średnicy 0,5 mm (rys. 2). W ten sposób, eksperymentalnie otrzymano informacje o korelacji dryftu funkcji przetwarzania czujników i zagęszczenia MT, otrzymywanych metodą metalurgii proszków [3].

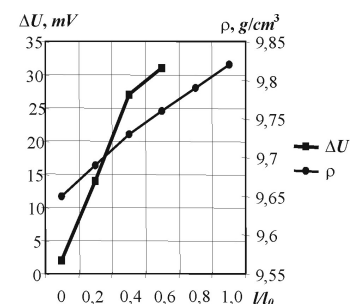
Omówiona wyżej technologia produkowania drutu dla CT zabezpiecza jego jednorodność termoelektryczną w granicach $\pm 50 \mu V$ i to już w pierwszych fazach obróbki półfabrykatu, których ogólna ilość wynosi około 70. Przy czym, im bardziej zagęszcza się MT, w procesie cyklicznie powtarzającego się deformowania i wyżarzania, niejednorodność jego zagęszczenia wyrównuje się, a dryft termo-e.m.s. zmniejsza się. A więc, niejednorodność termoelektryczna gotowego drutu wywołana jest technologicznie bliskimi czynnikami, do których można zaliczyć mecha-no-deformacyjne i temperaturowo-czasowe, które kształtowały właściwości zagęszczenia MT. Przez wyrównanie temperaturowych reżimów deformowania i prowadzenie procesu deformowa-

nia w zakresie temperatur „deformowania ciepłego” udało się istotnie zmniejszyć odchylenie termo-e.m.s. i o 30-40 % polepszyć jednorodność termoelektryczną MT. Mechanizm wpływu czynników temperaturowo-mechanicznych na poziomie nanostrukturalnym realizuje się w MT przez „szumy termometryczne”, obserwowane eksperymentalnie [7] w foliach molibdenu (grubość 247,0 i 560,0 nm; szybkość osadzania, odpowiednio 1,0 i 2,4 nm/s).



Rys. 1. Zmiany funkcji przetwarzania termoelementów (typ K), wyżarzonych przy: a) - 700°C; b) - 900°C; c) - 1000°C w zależności od średnicy drutu: 1 - 200 godz.; 2 - 500 godz.; 3 - 1000 godz.

Fig. 1. Changes of function of transformation of thermo-couples (typ K), annealed at: 700 °C (a); 900 °C (b); 1000 °C (c); dependently from the diameter of wires: 1 - 200 hours; 2 - 500 hours; 3 - 1000 hours



Rys. 2. Zmiany właściwości termoelektrycznej ΔU i gęstości ρ molibdenowego drutu, otrzymanego technologią metalurgii proszków, w zależności od jego miejsca l/l_0 w szpuli

Fig. 2. Changes of thermo-electric ΔU property and density ρ of the molybdenum wire got by powder-like technology, depending on his place of l/l_0 in the bay

4. Analiza danych eksperymentalnych

Technologia produkowania MT i praktyka ich stosowania pozwala aktualnie stosować dowolne, jednoznacznie odtwarzalne charakterystyki termometryczne, co spowodowane jest wysokim poziomem rozwoju skomputeryzowanych urządzeń pomiarowych. Coraz większe znaczenie ma podanie warunków zapewnienia stabilności struktury MT, co odpowiednio zapewnia stabilność oporu elektrycznego i termo-e.m.s. Jak wykazano w [8], dryft charakterystyk przewodności elektrycznej MT spowodowany jest odchyleniami (szumami) fluktuacyjno-dysypacyjnymi, które istotnie zależą od technologicznej – przeważnie mechaniczno-termicznej przeszłości MT. Etiologia tych szumów – elektro-mechano-chemiczna, a powstają one, w każdym oddzielnym przypadku, w wyniku dominowania tych lub innych stopni swobody w podstawowym równaniu termodynamiki. Powstawanie ich jest interpretowane w [9] z zastosowaniem mechanizmu gromadzenia i dyssypacji energii na lokalnych quasi-defektach rozciągania: współdziałanie defektów z fononami odzwierciedla się w zmianach właściwości elektrycznych MT. Niezależnie od rodzaju materiałów: stopy żelaza czy tworzywa sztuczne – proces ich niszczenia ma charakter termofluktuacyjny. Wydzielanie defektów (mikrokoncentratorów, mikropęknięć lub mikropor), jako elementarnych fizycznych podzespołów mezoskopijnego poziomu, pozwoliło uzasadnić zastosowanie termodynamiki procesów nierównoważonych dla badania i prognozowania zmian funkcji przetwarzania CT. Na podstawie tego sformowano statystyczno-deformacyjne zasady badania jej niestabilności [10]. Przy pochłanianiu fononów defektami rozciągania - ich temperatury lokalne rosną. I tak w przezroczystych materiałach polimerowych dostrzeżono [11], niezależnie od obecności deformacji rozciągania, punktowe źródła promieniowania z temperaturą w 2 do 5 razy przekraczającą temperaturę otoczenia. Zasilane są one, prawdopodobnie, energią sił zewnętrznych, które wpływają na MT.

Dlatego, ze wzrostem obciążenia mechanicznego wzrasta temperatura lokalna defektów. Temperatury lokalne defektów rozciągania, w momencie rozerwania się MT, okazują się jednakowymi (~950 K) dla różnych obciążeń, co jest argumentem na korzyść dominującej roli mikrokoncentratorów napięć mechanicznych.

Odchylenia rozkładu defektów według rozmiarów i rozmieszczenia w zasięgu gradientu temperatury odpowiadają zmianom intensywności szumów termometrycznych w MT [8 - 10]. Dryft funkcji przetwarzania CT w czasie może być opisany z uwzględnieniem istniejących gradientów potencjału chemicznego $\mu(t)$, napięć mechanicznych $\sigma(t)$ i pola powierzchni $M(t)$ (dla przypadku rozwiniętej porowatości) MT i wyraża się przez odpowiednie składowe niestabilności $\Delta U(t)$:

$$\begin{aligned} \Delta U(t) &= \Delta U_{\mu}(t) + \Delta U_{\sigma}(t) + \Delta U_{\gamma}(t) = \\ &= 1/e \int \nabla_x \mu(t) dx + 1/k \int \nabla_x \sigma(t) dx + \gamma/\rho \int \nabla_x M(t) dx \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie e – ładunek elementarny; k – stała, związana z deformacją; p – stała, związana z napięciem powierzchniowym γ .

Dla określenia drugiej i trzeciej składowych zależności (1) wykorzystano odrębne zasady teorii konsolidacji dla kompaktowych materiałów jednorodnych. Wtedy moduł Younga rzeczywistego, otrzymanego metodą metalurgii proszków, MT o gęstości ρ i określony przez odpowiednie charakterystyki E_{v0} ; i idealnego MT (ρ_0), można określić jak: $E_v(\rho) = E_{v0} \rho/\rho_0$. Z tego wynika,

że rzeczywiste MT charakteryzują się mniejszymi zmianami integralnej termo-e.m.s. w odniesieniu do idealnie zagęszczonych MT. To również powoduje liniowy charakter zależności $\Delta U = \Delta U(\rho_0 - \rho/\rho_0)$, podanej na rysunku 2.

W warstwie powierzchniowej materiałów udział defektów gęstości typu mikroporowatości jest o jeden-dwa rzędy większy w stosunku do rdzenia tychże materiałów [12].

Tab. 3. Akumulacja defektów gęstości w przekroju próbek różnych materiałów [12]

Tab. 3. Piling up of defects of density in the cut of the samples of different materials [12]

Materiał	Al	Zn	NaCl
Wartość średnia	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$
W warstwie powierzchniowej (głębokość 2 ... 4 μm)	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
W warstwie powierzchniowej (głębokość 20 ... 35 μm)	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Po usunięciu warstwy powierzchniowej na głębokość 20 ... 35 μm	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$

Pobudzająca rola powierzchni wywołana jest osobliwościami dynamiki sieci krystalicznej ze względu na niewystępowanie warstw sąsiadujących. A to, z kolei, wywołuje istotną nieliniowość drgań atomów warstw powierzchniowych, co jest ekwiwalentne dodatkowemu powierzchniowemu obciążeniu i przyspiesza akumulowanie energii. Wzrost temperatury odcinków MT w miarę zbliżania się do spoiny roboczej CT wywołuje coraz szybszą relaksację tej energii. Prawdopodobnie, rzeczywistemu wykładniczemu profilowi temperatury elektrod CT odpowiada podobny charakter zmniejszenia ich średnicy w miarę zbliżania się do spoiny roboczej. W tym wypadku dryft funkcji przetwarzania, wywołany głównie dla aktualnych warunków przyczyną – niejednorodnością właściwości termomechanicznych MT, jest mniejszy [13].

Mechanizm fizyczny zachodzących procesów, analizowano na podstawie badań efektów szumowych. Według termodynamiki procesów nierównoważonych, szumy elektryczne, odpowiedzialne za funkcje przetwarzania czujników termometrów szumowych, powstają jako reakcja układu termodynamicznego na zmiany w czasie jego entropii wskutek odbywających się procesów dyssypacji energii. Nieodwracalne straty energii na poziomie mezoskopijnym realizują się przez rozpraszanie fononów na quasi-defektach rozciągania, co zmienia charakter oddziaływania elektrycznego i parametry szumów elektrycznych. W celu analizy wykorzystano współczynnik pochłaniania Γ , który uwzględnia szybkość dyssypacji energii W , okres czasowy Δt , a także strumień energii cW w fali sprężystej, rozchodzącej się z szybkością c . O ile akumulowana z częstotliwością kołową ω i przy długością fali λ energia $W \sim \omega^2 (\Delta W \sim 2\omega \Delta\omega)$, a okres czasowy $\Delta t = \lambda/c$, to wtedy współczynnik pochłaniania może być wyrażony zależnością: $\Gamma = \frac{\Delta W}{2cW\Delta t} = \frac{\Delta\omega}{\lambda\omega}$.

W przybliżeniu Grjuneizena, gdzie względna zmiana częstotliwości $\frac{\Delta\omega}{\omega} = G\varepsilon$ jest wyznaczana przez odkształcenie $\varepsilon = \Delta V/V$ objętości V i współczynnik termodynamiczny Grjuneizena G ; maksymalne pochłanianie powstawało przy przechodzeniu najkrótszych fal przez sieć krystaliczną z $\lambda_{\max} \approx 2a$, gdzie a , odległość międzyatomowa: $\Gamma_{\max} \approx \frac{G\varepsilon}{2a}$. Pochłanianie fononów w quasi-defektach rozciągania charakteryzuje się szybkością dopływu energii $V_+ = 2\Gamma_{\max}c$. Przy niskim poziomie energii, dopływającej do quasi-defektu rozciągania, V_+ jest proporcjonalna do mocy elektrycznej P_{el} . Zanik quasi-defektu charakteryzuje się szybkością relaksacji temperaturowej: $V_- = \frac{c}{\Lambda}$. Istnieje, wyznaczona zależnością $V_+(\varepsilon_d) = V_-$, krytyczna moc quasi-defektu

rozciągania $\varepsilon_d = \frac{a}{GA}$, rozdzielająca dwie fazy jego ewolucji – odwracalną ($\varepsilon < \varepsilon_d$) i nieodwracalną ($\varepsilon > \varepsilon_d$) [14]. Przyjmijmy, że zależność $\Delta U = \Delta U(r)$ (rys. 1) opisuje wzór (1), wtedy przechodząc dalej: przy zmniejszeniu się średnicy elektrod – wzrasta waga względna drugiej i trzeciej składowych wzoru (1), co również jest zgodne tak z danymi z rys. 1, jak i z danymi z tab. 2.

Wyznaczenie optymalnego stosunku gradientu temperaturowego do średnicy elektrod, oraz jego zmiana przez naniesienie zewnętrznych warstw specjalnej substancji, jak pokazano w [15, 16], pozwala wpływać na stabilność funkcji przetwarzania CT. W związku z tym, zwykle termometryczne rozwiązanie przeobraża się z liniowego w przestrzenne, z możliwością zastosowania koncepcji termoelektrycznych prądów wirowych [17].

5. Wnioski

W artykule wykazano, że przy zmniejszaniu średnicy elektrod, dodatkowe defekty powierzchni wywołują wzmacnianie udziału składowych mechanicznej i powierzchniowej, jak i udziału szumów elektrycznych, w kształtowaniu dryftu funkcji przetwarzania CT, co daje nowe możliwości dla poznawania zachodzących procesów i wpływania na zwiększenie stabilności charakterystyk metrologicznych czujników temperatury.

6. Literatura

- [1] Anatychnuk L.I. Thermoelectric Transducers of Energy. Institute of thermoelectricity. Kyiv-Chernivtsi. 2003.
- [2] Nowikow I.I., Stadnyk B.I., Jacyszyn S.P. i dr. O fenomenologiczkiej modeli niestabilności integralnej termo-e.d.s. termopar // Izv. AN ZSSR. Ser. Metally. 1990. № 3.
- [3] Lucyk J.T., Stadnyk B.I., Jacyszyn S.P., Dominiuk T.I. Wpływ porowatosti na zmiany termo-e.r.s. termometrycznych materiałów // Wisnyk NU „Lwowska politechnika”. Awtomatyka, wymirjuwania i keruwannia. 2005. № 530.
- [4] Dominiuk T.I., Jacyszyn S.P. Do wywczennia mozlywosti termodynamicznoho wrachuwannia wplywu mechanicznych napruzen i deformacji na termo-e.r.s. // Wymiriwalna technika i metrolohija. 2002. № 59.
- [5] Korsukow W.E. Zawisimost procznosti twiordych tiel ot sostojanija ich powierchnosti. Fizika procznosti i plasticznosti. Leningrad: Nauka. 1986.
- [6] Samsonow W.G. i dr. Datecziki dla izmierenija temperatury w promyszlennosti. Kijew: Naukowa dumka. 1972.
- [7] Zigalskij G.P. Nierawnowiesnyj 1/fy szum w prowadiaszczich plionkach i kontaktach // Uspiechi fizycznych nauk. 2003. T. 173. № 5.
- [8] Jacyszyn S., Stadnyk B., Lucyk J. Efekty szumowe w termometrii // Pomiary, automatyka, kontrola. 2003. № 7/8.
- [9] Kolodij Z.O. i in. Riznowydni fluktuacii w twerdyh tilach ta koncepcija ich pojednanoho wywczennia // Wisnyk NU „Lwowska politechnika”. 2002. № 445.
- [10] Stadnyk B.I., Jacyszyn S.P. Statystyczno-deformacijna model stabilizacii metrologicznych charakterystyk termoperetworuwacziv // Wymiriwalna technika i metrolohija. 2003. № 63.
- [11] Wettegren W.I. Spektroskopiczskoje izuczennije razruszajuszczich fluktuacij plotnosti. Fizika procznosti i plasticznosti. Leningrad: Nauka. 1986.
- [12] Betehtin W.I. Mikrorazruszenije w objomie i na powierchnosti kristalliczeskich tiel w processie ich ispytanija na dolhowiecznost. Zaroprocnost i zarostojkost metalliczeskich materialow. Moskwa: Nauka. 1976.
- [13] Lucyk J.T., Stadnyk B.I., Jacyszyn S.P., Parakuda W.W. Termodinamiczeskije aspekty niestabilnosti termometriczeskich charakteristik // Metody i technika przetwarzania sygnalów w pomiarach fizycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. № 223. Seria Elektrotechnika. 2005. z. 28.
- [14] Petrow W.A. Tieplovyje fluktuacii kak generator zarodyszewych treszczin. Fizika procznosti i plasticznosti. Leningrad: Nauka. 1986.
- [15] Huk O.P. Zachysni pokryttia termoelektrodiw jak efektywnyj sposib pokraszczennia technicznych charakterystyk termoelektrycznych termoperetworuwacziv // Wymiriwalna technika i metrolohija. 2002. № 61.
- [16] Mikrodugowoje oksidirowanije. Materiały naukowoji konferencii "Współczesne Materiałoznawstwo. Nanotechnologie i nanomateriały". Polska, Warszawa. 2006.
- [17] Luste O.J., Kuz' R.V. Computer control of Eddy thermoelectric currents // Thermoelectricity. 2004. № 2.

Artykuł recenzowany

IMPREZY NAUKOWO-TECHNICZNE

KONGRESY ☆ KONFERENCJE ☆ SYMPOZJA ☆ TARGI ☆ WYSTAWY

NAUKA

12-16 lutego 2007 – Międzyzdroje, POLSKA
 VI Sympozjum nt. Niepewności Pomiaru oraz XX Seminarium
 Naukowe Sekcji Kształcenia i Rozwoju Kadry KMİAN PAN
 Organizator: Politechnika Szczecińska,
 Instytut Automatyki Przemysłowej, Zakład Metrologii
 oraz Sekcja Kształcenia i Rozwoju Kadry KMİAN PAN
 ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin
 tel. (91) 449-51-19

NAUKA

14-16 marca 2007 - Warszawa, POLSKA
 AUTOMATION 2007 - Konferencja Naukowo-Techniczna
 AUTOMATYZACJA - NOWOŚCI I PERSPEKTYWY
 Organizator: Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
 Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa
 tel. (022) 8740-205, fax. (022) 8740-220
 e-mail: konferencja@piap.pl
 www.piap.pl