

STANISŁAW KOPACZ

Katedra Informatyki

WPLYW NIEJEDNORODNOŚCI TERMoeLEKTROD NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU TEMPERATURY, METODY BADANIA NIEJEDNORODNOŚCI

Streszczenie. Wyprowadzono ogólne zależności wiążące niejednorodność termoelektrod i rozkład temperatury wzdłuż termoelementu z błędem pomiaru temperatury. Dokonano przeglądu stosowanych metod badania niejednorodności analizując ich właściwości w oparciu o wyprowadzone zależności.

1. Wstęp

Jednym z czynników w istotny sposób ograniczającym dokładność pomiaru temperatury termoelementami jest termoelektryczna niejednorodność termoelektrod. Istnieje więc potrzeba kontroli niejednorodności zwłaszcza termoelektrod przeznaczonych dla dokładnych pomiarów oraz termoelektrod uprzednio stosowanych przez dłuższy okres czasu.

Opracowano wiele sposobów badania niejednorodności termoelektrod, jednakże rezultaty tych badań są interpretowane w dużej mierze intuicyjnie, brak bowiem opisu matematycznego wiążącego niejednorodność termoelektrod z błędem pomiaru temperatury.

W niniejszym opracowaniu wyprowadzono ogólne zależności wiążące niejednorodność termoelektrod i rozkład temperatury wzdłuż termoelementu z błędem pomiaru temperatury.

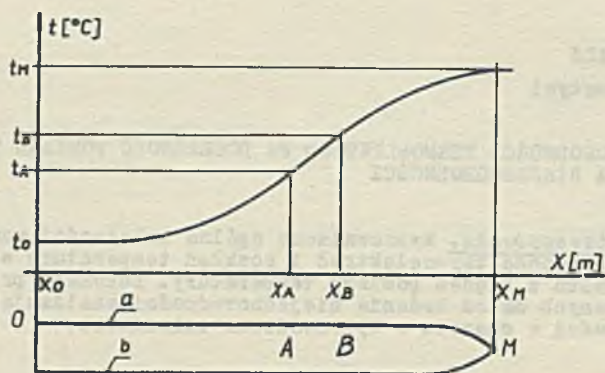
2. Termoelektryczna niejednorodność termoelektrod.

Termoelektroda jest niejednorodna, gdy występują w niej odcinki o różnych właściwościach termoelektrycznych.

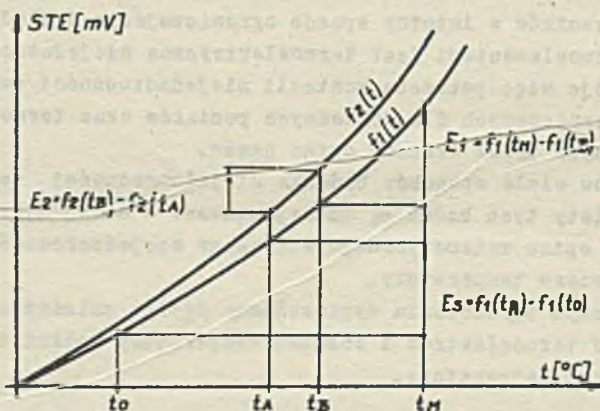
Niejednorodność termoelektrod powoduje, że STE generowana przez termoelement jest zależna nie tylko od temperatury spoiny pomiarowej i spoiny odniesienia, lecz również od rozkładu temperatury wzdłuż termoelementu. Niejednorodność jest więc przyczyną niejednorodności charakterystyki termometrycznej termoelementu.

Na rys. 1 pokazano termoelement, którego jedna termoelektroda (a) zawiera odcinek AB o odmiennej charakterystyce. Na rys. 2 pokazano charakterystykę termoelementu utworzonego z termoelektrody a (bez odcinka AB) i

termoelektrody b (krzywa $f_1(t)$) oraz termoelementu składającego się z odcinka AB i termoelektrody b (krzywa $f_2(t)$).



Rys. 1. Niejednorodny termoelement w polu temperatur



Rys. 2. Charakterystyki termomasyjne termoelementów

1) $f_1(t)$ - termoelektroda a (bez odcinka AB) termoelektroda b, 2) $f_2(t)$ - termoelektroda AB - termoelektroda b

STE generowana przez termoelement zawierający odcinek niejednorodny może być obliczona ze wzoru:

$$E_{OM} = f_1(t_M) - f_1(t_B) + f_2(t_B) - f_2(t_A) + f_1(t_A) - f_1(t_0) \quad (1)$$

Gdyby elektroda a nie zawierała odcinka AB, to generowana STE byłaby równa:

$$E'_{OM} = f_1(t_M) - f_1(t_0), \quad (2)$$

Różnica $E_{OM} - E'_{OM} = \Delta E$ jest równa STE niejednorodności

$$\Delta E = f_1(t_B) - f_1(t_A) - f_2(t_B) - f_2(t_A) \quad (3)$$

Jeżeli t_A niewiele różni się od t_B , zależność (3) można zapisać w postaci:

$$\Delta E = e_1(t_B - t_A) - e_2(t_B - t_A) = (e_1 - e_2)(t_B - t_A) \quad (4)$$

gdzie:

e_1, e_2 - średnie nachylenia charakterystyk termometrycznych elektrody a i odcinka AB.

Z zależności (4) wynika, że STE niejednorodności jest zależna od stopnia niejednorodności ($e_1 - e_2$) oraz od warunków pracy ($t_B - t_A$). Nawet przy niezmiennionej temperaturze spoiny pomiarowej i spoiny odniesienia może więc wystąpić zmiana generowanej STE. Zjawisko to jest przyczyną powstawania błędu pomiaru temperatury - błędu niejednorodności.

Długość odcinka AB, jak wynika z rys. 1, również wpływa na wartość STE niejednorodności. Zwiększenie długości spowoduje wzrost ΔE . Oczywiście przy innych rozkładach temperatury efekt może być przeciwny.

Ze względu na rozmiary odcinków o odmiennych charakterystykach rozróżnia się niejednorodność punktową i rozłożoną [1]. Niejednorodność punktowa występuje, gdy odcinki te mają stosunkowo małe długości (rzędu kilku milimetrów). Przy niejednorodności rozłożonej natomiast omawiane odcinki mają znaczne długości. Granica pomiędzy niejednorodnością punktową i rozłożoną nie może być ściśle określona, tym niemniej stwierdzenie jakiego rodzaju niejednorodność występuje w danej termoelektrodzie pozwala uproszczyć zarówno sposób wyznaczania niejednorodności jak też i obliczanie STE niejednorodności.

3. Zależność STE niejednorodności od niejednorodności termoelektrod i rozkładu temperatury

Przeprowadzimy podział niejednorodnej termoelektrody na odcinki o tak wybranej długości, aby z dostatecznie dobrym przybliżeniem można było przyjąć, że odcinki te są jednorodne oraz, że charakterystyki termometryczne tych odcinków są liniowe^{x)}.

^{x)} Warunek ten będzie spełniony, jeżeli przyrost temperatury wzdłuż każdego odcinka będzie dostatecznie mały.

Wtedy

$$E_{OM} = \sum_{i=0}^M e_1(t_1) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (5)$$

gdzie:

$e_1(t_1)$ - nachylenie charakterystyki termometrycznej i-tego odcinka termoelementu przy temperaturze t_1 ;

$t_{i+1}; t_i$ - temperatura początku i końca i-tego odcinka termoelementu;

t_M, t_0 - temperatura spiny pomiarowej i spiny odniesienia.

Różnica temperatur początku i końca każdego odcinka może być obliczona ze wzoru

$$t_{i+1} - t_i = \text{grad}_1 t \cdot \Delta x_1 \quad (6)$$

gdzie:

$\text{grad}_1 t$ - gradient temperatury wzdłuż termoelementu na i-tym odcinku,

Δx_1 - długość i-tego odcinka.

Podstawiając do wzoru (5) zależność (6) otrzymamy:

$$E_{OM} = \sum_{i=0}^M e_1(t_1) \cdot \text{grad}_1 t \cdot \Delta x_1 \quad (7)$$

Przechodząc do nieskończonej liczby małych odcinków zależność (7) można zapisać w postaci:

$$E_{OM} = \int_{x_0}^{x_M} e[t(x); x] \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx \quad (8)$$

gdzie:

x_0, x_M - współrzędne początku i końca termoelementu.

Funkcję $e[t(x); x]$ można zapisać w postaci sumy^{x)}

$$e[t(x); x] = e_p t(x) + e t(x); x \quad (9)$$

^{x)} w dalszej części dla uproszczenia zapisu zastosowano oznaczenia:
 $e_p[t(x)] = e_p(t)$, $e[t(x); x] = e(t, x)$ itp.

Podstawiając (9) do wzoru (8) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} E_{0M} &= \int_{x_0}^{x_M} [e_p(t) + \Delta e(t;x)] \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx = \\ &= \int_0^{t_M} e_p(t) dt + \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad } t(x) dx \end{aligned} \quad (10)$$

Wartość całki $\int_0^{t_M} e_p(t) dt$ nie zależy od rozkładu temperatury wzdłuż termoelementu. Przy zmianie funkcji $t(x)$ zmienia się natomiast wartość drugiej całki określającej STE niejednorodności:

$$\Delta E = \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx \quad (11)$$

Przebieg funkcji niejednorodności $\Delta e(t;x)$ określony jest niejednorodnością obydwu termoelektrod. Z prawa kolejnych metali wynika, że funkcja niejednorodności termoelementu jest równa różnicy funkcji niejednorodności obydwu termoelektrod:

$$\Delta e(t;x) = \Delta e_a(t;x) - \Delta e_b(t;x) \quad (12)$$

W związku z tym wzór na STE niejednorodności przyjmuje postać:

$$\Delta E = \int_{x_0}^{x_M} [\Delta e_a(t;x) - \Delta e_b(t;x)] \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx \quad (13)$$

Funkcja niejednorodności $\Delta e_a(t;x)$ tak jak i $\Delta e_b(t;x)$ równa różnicy nachylenia charakterystyki termometrycznej rozpatrywanego odcinka i odcinka porównawczego jest najpełniejszą miarą niejednorodności termoelektrody. Jak zostanie wykazane poniżej w charakterze odcinka porównawczego może być wybrany w zasadzie dowolny odcinek badanej termoelektrody.

4. Błąd niejednorodności termoelementu

Błąd niejednorodności termoelementu jest równy różnicy pomiędzy wskazaniem termoelementu w warunkach pomiaru a wskazaniem obliczonym z odpowiedniego wzoru interpolacyjnego, wyznaczonego w oparciu o wyniki wzorcowania. Zakłada się przy tym, że temperatura spiny pomiarowej, a także temperatura spiny odniesienia jest w obydwu przypadkach jednakowa oraz że wpływ innych czynników zakłócających pomiar jest pomijalnie mały.

Rozpatrzmy przypadek, gdy funkcja interpolacyjna ma postać wielomianu n -tego stopnia:

$$E(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i \quad (14)$$

Funkcję tę można przedstawić w dogodniejszej dla obliczeń postaci:

$$E(t) = \sum_{k=1}^n E_k \cdot \varphi_k(t) \quad (15)$$

gdzie:

- E_k - wartość STE generowanej przez termoelement przy temperaturze spiny pomiarowej t_k w warunkach wzorcowania;
 $\varphi_k(t)$ - funkcja wpływu określona wzorem:

$$\varphi_k(t) = \frac{\prod_{l=1}^{l=k-1} (t-t_l) \prod_{l=k-1}^{l=n} (t-t_1)}{\prod_{l=1}^{l=k-1} (t_k-t_l) \prod_{l=k-1}^{l=n} (t_k-t_1)} \quad (16)$$

Każda zmierzona wartość STE zawiera składnik niezależny od gradientu temperatury E_{pk} oraz STE niejednorodności ΔE_k

$$E_k = E_{pk} + \Delta E_k \quad (17)$$

w związku z czym wzór (14) przyjmuje postać:

$$E(t) = \sum_{k=1}^n E_{pk} \varphi_k(t) + \sum_{k=1}^n \Delta E_k \varphi_k(t) \quad (18)$$

Wartość STE rozpatrywanego termoelementu obliczona przy założeniu, że temperatura spiny pomiarowej jest równa t_x wynosi więc:

$$E(t_x) = \sum_{k=1}^n E_{pk} \varphi_k(t_x) + \sum_{k=1}^n \Delta E_k \varphi_k(t_x) \quad (19)$$

W warunkach pomiaru termoelement generuje STE równa:

$$E'(t_x) = E_{px} + \Delta E_x \quad (20)$$

Różnica STE generowanej w warunkach pomiaru i obliczonej ze wzoru (18) jest równa błędowi niejednorodności E_N :

$$\Delta E_N = E_{px} - \sum_{k=1}^n E_{pk} \varphi_k(t_x) + \Delta E_x - \sum_{k=1}^n \Delta E_k \varphi_k(t_x) \quad (21)$$

$$E_{px} = \sum_{k=1}^n E_{pk} \varphi_k(t_x)$$

ponieważ E_{px} i E_{pk} są wartościami tej samej funkcji przy różnych wartościach zmiennej t .

W związku z tym wzór (21) upraszcza się do postaci:

$$\Delta E_N = \Delta E_x - \sum_{k=1}^n \Delta E_k \varphi_k(t_x) \quad (22)$$

a po podstawieniu zależności (11) przyjmuje postać:

$$\Delta E_N = \sum_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_x t(x) dx - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \cdot \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_k t(x) dx \quad (23)$$

Aby stwierdzić, czy sposób rozdziału funkcji $e(t;x)$ na składową zależną tylko od temperatury $e_p(t)$ oraz na składową $\Delta e(t;x)$ zależną zarówno od temperatury jak i od położenia odcinka na termoelektrodzie - wpływa na

wartość obliczonego błędu niejednorodności, obliczymy ten błąd dla dwu przypadków, a mianowicie:

$$a) \quad e(t; x) = e_p(t) + \Delta e(t; x)$$

$$b) \quad e(t; x) = e_p'(t) + \Delta e'(t; x)$$

Oczywiście

$$\Delta e(t; x) = \Delta e'(t; x) + e_p'(t) - e_p(t) = \Delta e'(t; x) + \Delta e_p(t) \quad (24)$$

Po podstawieniu (24) do wzoru (23) i wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymamy:

$$\begin{aligned} \Delta E_N = & \int_{x_0}^{x_M} \Delta e'(t; x) \operatorname{grad}_x t(x) dx - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \int_{x_0}^{x_M} \Delta e'(t; x) \cdot \\ & \cdot \operatorname{grad}_k t(x) dx + \int_{x_0}^{x_M} \Delta e_p(t) \operatorname{grad}_x t(x) dx - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \int_{x_0}^{x_M} \Delta e_p(t) \cdot \\ & \cdot \operatorname{grad}_k t(x) dx \end{aligned} \quad (25)$$

I dalej po zmianie granic całkowania

$$\begin{aligned} \Delta E_N = & \int_{x_0}^{x_M} \Delta e'(t; x) \operatorname{grad}_x t(x) - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \int_{x_0}^{x_M} \Delta e'(t; x) \cdot \\ & \cdot \operatorname{grad}_k t(x) dx + \left[\int_{t_0}^{t_x} \Delta e_p(t) dt - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \int_{t_0}^{t_k} \Delta e_p(t) dt \right] \end{aligned} \quad (26)$$

Po podstawieniu:

$$\int_{t_0}^{t_x} \Delta e_p(t) dt = \Delta E_p(t_x) - \Delta E_p(t_0)$$

1

$$\int_{t_0}^{t_k} \Delta e_p(t) dt = \Delta E_p(t_k) - \Delta E_p(t_0) \quad (27)$$

składnik wzoru (26) ujęty w nawias kwadratowy przyjmuje postać:

$$\left[\int_{t_0}^{t_x} \Delta e_p(t) dt - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \int_{t_0}^{t_k} \Delta e_p(t) dt \right] =$$

$$= \Delta E_p(t_x) - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \Delta E_p(t_k) - \Delta E_p(t_0) \left[1 - \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_k) \right] \quad (28)$$

$$E_p(t_x) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(t_x) \Delta E_p(t_k)$$

ponieważ $E_p(t_x)$ oraz $E_p(t_k)$ są wartościami tej samej funkcji przy różnych wartościach zmiennej t . $\sum_{k=1}^n \varphi_k(t) = 1$ co wynika z właściwości funkcji wpływu.

Z powyższego wynika, że wyrażenie ujęte w nawias kwadratowy ma wartość zerową dla dowolnego t_x , a więc wartość błędu niejednorodności nie jest zależna od sposobu rozdziału funkcji $e(t; x)$. Wniosek ten ma istotne znaczenie praktyczne, gdyż pozwala wybierać w charakterze odcinka porównawczego dowolny odcinek badanej termoelektrody, a nawet dowolny odcinek innej termoelektrody.

5. Przykłady zastosowania wyprowadzonych zależności

Przykład 1

Rozpatrzmy proces wyznaczenia temperatury krzepnięcia stopu eutektycznego AgCb przy pomocy termoelementu PtRh10-Pt wzorcowanego w 3 punktach stałych np. w punktach krzepnięcia Sb, Ag i Cu.

Jak wiadomo, charakterystyka termometryczna termoelementu PtRh10-Pt jest w rozpatrywanym zakresie wielomianem drugiego stopnia, co można zapisać:

$$E(t) = E_{Sb} \cdot \varphi_{Sb}(t) + E_{Ag} \cdot \varphi_{Ag}(t) + E_{Cu} \cdot \varphi_{Cu}(t) \quad (29)$$

gdzie:

E_{Sb} , E_{Ag} , E_{Cu} - wartości STE generowanej przez termoelement w czasie wzorcowania w temperaturze krzepnięcia antymonu t_{Sb} , srebra t_{Ag} i miedzi t_{Cu} .

$$\begin{aligned}\varphi_{Sb}(t) &= \frac{(t - t_{Ag})(t - t_{Cu})}{(t_{Sb} - t_{Ag})(t_{Sb} - t_{Cu})}, \\ \varphi_{Ag}(t) &= \frac{(t - t_{Sb})(t - t_{Cu})}{(t_{Ag} - t_{Sb})(t_{Ag} - t_{Cu})}, \\ \varphi_{Cu}(t) &= \frac{(t - t_{Sb})(t - t_{Ag})}{(t_{Cu} - t_{Sb})(t_{Cu} - t_{Ag})}\end{aligned}\quad (30)$$

Błąd niejednorodności przy pomiarze temperatury krzepnięcia stopu eutektycznego AgCu jest więc określony wzorem:

$$\begin{aligned}\Delta E_{AgCu} &= \Delta E_{AgCu} - \Delta E_{Sb} \cdot \varphi_{Sb}(t_{AgCu}) - \Delta E_{Ag} \cdot \varphi_{Ag}(t_{AgCu}) - \\ &\quad - \Delta E_{Cu} \cdot \varphi_{Cu}(t_{AgCu})\end{aligned}\quad (31)$$

gdzie:

t_{AgCu} - temperatura krzepnięcia stopu AgCu.

$$\begin{aligned}\Delta E_{AgCu} &= \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_{AgCu} t(x) dx \\ \Delta E_{Sb} &= \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_{Sb} t(x) dx \\ \Delta E_{Ag} &= \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_{Ag} t(x) dx \\ \Delta E_{Cu} &= \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad}_{Cu} t(x) dx\end{aligned}\quad (32)$$

Zazwyczaj dla zmniejszenia wpływu błędów przypadkowych na niedokładność wyznaczenia temperatury krzepnięcia stopu wykonuje się serie pomiarów. Przy każdym pomiarze zarówno głębokość zanurzenia termoelementu jak i gradient temperatury wzdłuż szybu pieca zmienia się nieco. Zmiany te są jednakże stosunkowo niewielkie w związku z czym należy się spodziewać, że

uśrednianie wyników w niewielkim tylko stopniu zmieni STE niejednorodności. Zmniejszenie błędu niejednorodności można osiągnąć mierząc temperaturę kilkoma termoelementami.

Przeprowadzone rozważania pozwalają stwierdzić, że:

- a) niejednorodność termoelementu może wprowadzić do wyniku pomiaru temperatury krzepnięcia stopu błąd systematyczny,
- b) błąd niejednorodności można wyeliminować wprowadzając poprawkę obliczoną ze wzoru (34).

Przykład 2

Termoelement wzorcuje się w dwu temperaturach t_1 i t_2 , a wynik pomiaru oblicza stosując liniową interpolację.

Taki schemat postępowania można stosować przy pomiarach termoelementami o praktycznie liniowej charakterystyce np. NiCr-Ni, Fe-konstantan.

Zgodnie ze wzorem (22) błąd niejednorodności będzie równy:

$$\Delta E_N = \Delta E_x - \Delta E_1 \frac{(t_x - t_2)}{(t_1 - t_2)} - \Delta E_2 \frac{(t_x - t_1)}{(t_2 - t_1)}$$

gdzie:

ΔE_x - STE niejednorodności w warunkach pomiaru,

ΔE_1 - STE niejednorodności w warunkach wzorcowania w temperaturze t_1 ,

ΔE_2 - STE niejednorodności w warunkach wzorcowania w temperaturze t_2 .

W szczególnym przypadku, gdy $t_x = t_1$ błąd niejednorodności można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta E_N = \Delta E_x - \Delta E_1 = \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(tx) \cdot [\text{grad}_x t(x) - \text{grad}_1 t(x)] \cdot dx \quad (34)$$

Analogicznie dla $t_x = t_2$

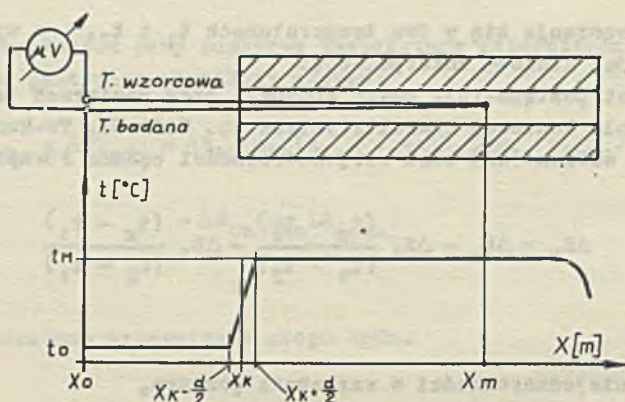
$$\Delta E_N = \Delta E_x - \Delta E_2 = \int_{x_0}^{x_M} \Delta e(tx) \cdot [\text{grad}_x t(x) - \text{grad}_2 t(x)] \cdot dx \quad (35)$$

6. Metody badania niejednorodności

Jak wynika z poprzednich rozważań, niejednorodność najlepiej charakteryzuje funkcja $\Delta e(t;x)$, to też określenie "badanie niejednorodności" należy rozumieć jako wyznaczenie funkcji $\Delta e(t;x)$.

W praktyce stosowane są metody uproszczone.

Najprostszą metodą jest porównywanie termoelektrody badanej z termoelektrodą wzorcową. W tym celu łączy się obie termoelektrody i umieszcza się w piecu o dużym gradiencie temperatury na dolocie i dużym obszarze wyrównanej temperatury (rys. 3). Zmieniają stopniowo głębokość zanurze-



Rys. 3. Układ do badania niejednorodności termoelektrod przez porównanie z termoelektrodą wzorcową

nia termoelektrod mierzy się generowana przez nie STE. Generowaną STE określa wzór:

$$\Delta E_N(x_k) = \int_{x_0}^{x_M} e_b(t;x) \text{grad } t(x) dx - \int_{x_0}^{x_M} e_w(t;x) \text{grad } t(x) dx \quad (36)$$

gdzie: $e_b(t;x)$, $e_w(t;x)$ nachylenie charakterystyki termometrycznej termoelektrody badanej i wzorcowej (w połączeniu z dowolną termoelektrodą odniesienia).

W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że:

$$\begin{aligned} \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & \quad x < x_k - \frac{d}{2} \\ \text{grad } t(x) &= G = \text{const} & \text{dla} & \quad x_k - \frac{d}{2} < x < x_k + \frac{d}{2} \\ \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & \quad x > x_k + \frac{d}{2} \end{aligned} \quad (37)$$

Przy tych założeniach wzór (38) przyjmuje postać:

$$\Delta E_H(x_k) = G \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} e_b(t;x) dx - G \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} e_w(t;x) dx \quad (38)$$

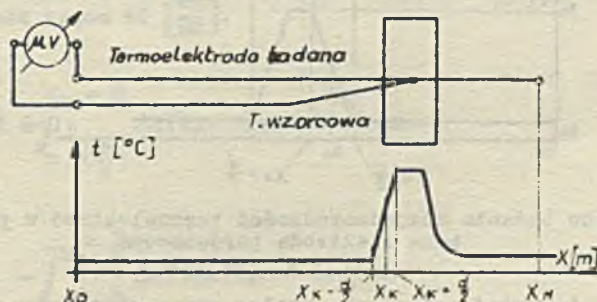
a po wprowadzeniu oznaczeń jak we wzorze (9):

$$\begin{aligned} \Delta E(x_k) = & G \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} e_{pb}(t) dx - \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} e_{pw}(t) dx - \\ & - G \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} \Delta e_b(t,x) dx - G \int_{x_k - \frac{d}{2}}^{x_k + \frac{d}{2}} \Delta e_w(t,x) dx \end{aligned} \quad (39)$$

skąd wynika, że zmierzona wartość STE będzie proporcjonalna do średniej wartości niejednorodności termoelektrody badanej tylko w tym przypadku, gdy $\Delta e_w(t,x) = \Delta e_w(t)$ tzn. gdy termoelektroda wzorcowa będzie jednorodna. Odstępstwa od warunków (37) prowadzą do dalszych błędów, tym większych im większa jest różnica $e_{pb}(t) - e_{pw}(t)$.

Wymienione wymagania są trudne do spełnienia w związku z czym metoda ta nie znajduje szerszego zastosowania.

Wymagania odnośnie termoelektrody wzorcowej mogą być znacznie łagodniejsze, gdy termoelektroda wzorcowa i obie termoelektrody umieszcza się w piecu w ten sposób, aby termoelektroda wzorcowa za każdym razem znajdowała się w tym samym położeniu względem pieca (rys. 4). Spełnienie tego wy-



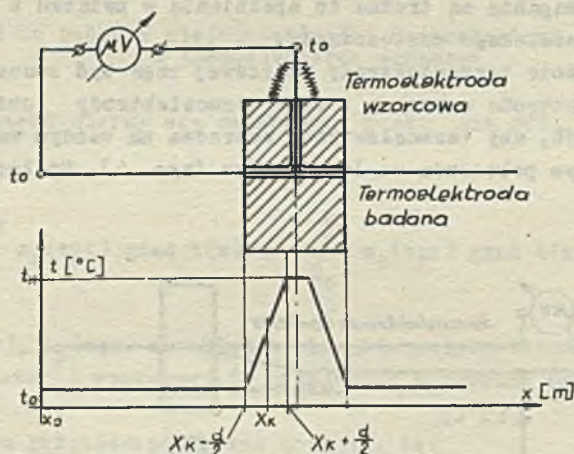
Rys. 4. Układ badania niejednorodności termoelektrod metoda skręcania

magania powoduje, że STE niejednorodności termoelektrody wzorcowej jest stała a zmierzona wartość STE jest proporcjonalna do średniej niejednorodności na odcinku $(x_k - \frac{d}{2} : x_k + \frac{d}{2})$. Ponieważ rozkład temperatury na odcinku $(x_k - \frac{d}{2} : x_m)$ nie wpływa na wartość generowanej STE piecyk może mieć stosunkowo małą długość. Termoelektrody łączy się przez skręcanie, co wiąże się z naprężeniami mechanicznymi zmieniającymi niejednorodność obu termoelektrod [2]. Zmienia się więc zarówno obiekt pomiaru jak i wzorec. Oprócz tego następuje trudności dokładne ustawienie spoiny w tym samym położeniu względem pieca. Czynniki te wprowadzają stosunkowo dużą niepewtarzalność pomiarów.

Połączenie przez skręcenie może zapewnić dobry kontakt elektryczny tylko przy badaniu termoelektrod z metali szlachetnych, co ogranicza zakres zastosowania tej metody.

Elektroda porównawcza może być umieszczona w piecyku na stałe [3]. Zakłóceniem termoelektrody jest wtedy blok wykonany z takiego samego materiału jak elektroda badana. Kontakt elektryczny jest uzyskiwany przez docisk termoelektrody do bloku. W badanej termoelektrodzie powstają więc stosunkowo duże naprężenia.

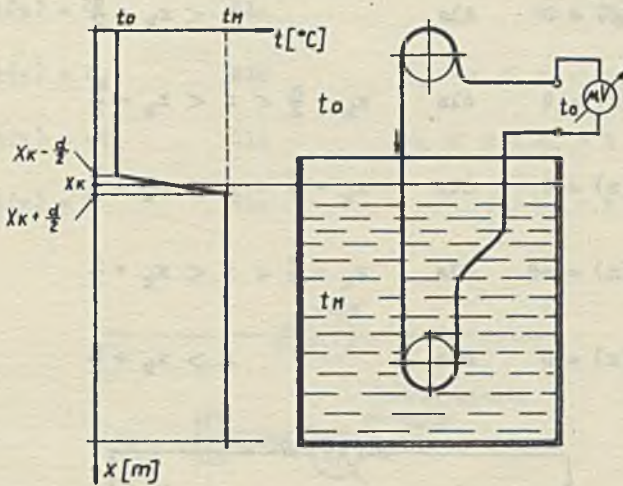
Dalszym udoskonaleniem tej metody jest zastosowanie ruchomej elektrody porównawczej dociskanej do termoelektrody badanej przy pomocy sprężynki (rys. 5) [4]. Sprężynki zapewniają stały docisk dostateczny dla uzyskania dobrego kontaktu elektrycznego, lecz znacznie mniejszy niż niezbędny przy zastosowaniu poprzedniego piecyka.



Rys. 5. Układ do badania niejednorodności termoelektrod w piecyku z dociskaną elektrodą porównawczą

Analogiczna do wyżej opisanych metoda, zwana metodą dwu ośrodków [4], [5], [6], różni się od nich sposobem realizacji skoku temperatur. Badana termoelektroda jest częściowo zanurzona w ośrodku o odmiennie od otocze-

nia temperaturze, np. w gorącym oleju lub ciekłym azocie, jak to pokazano na rys. 6. Maksymalny gradient temperatur powstaje na granicy dwu ośrodków



Rys. 6. Badanie niejednorodności termoelektrody metodą dwu ośrodków

ków. Obwód elektryczny zamyka się przez nieruchomą elektrodę wyprowadzającą. Mierzona wartość STE jest proporcjonalna do średniej na odcinku $(x_k - \frac{d}{2}; x_k + \frac{d}{2})$ niejednorodności termoelektrody. Metodą tą można badać w zasadzie termoelektrody z dowolnych materiałów. Istotną wadą opisanej metody jest złożoność procesu badania.

Wady opisywanych metod skłaniają do budowy piecyków z punktowym nagrzewem i piecyków i niwymetrycznym polem temperatur.

Przykładem metody punkowego nagrzewu może być piecyk [7], którego element grzewczy składa się z dwu zwoi drutu platynowego o średnicy 0,7 [mm] i długości 6 [mm]. W piecyku tym osiąganą maksymalną temperaturę rzędu 1200°C i gradient rzędu 60 $[\frac{°C}{mm}]$.

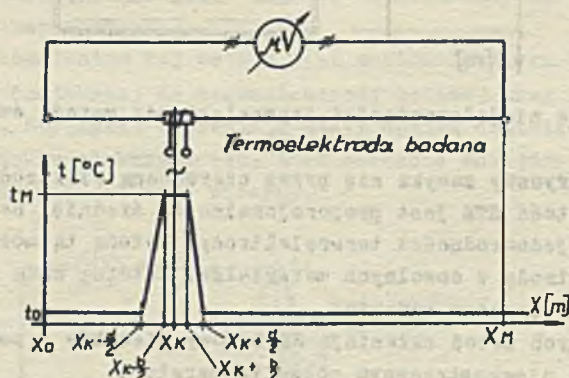
$$\Delta E(x_k) = \int_{x - \frac{d}{2}}^{x_k - \frac{d}{2}} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx -$$

$$- \int_{x_k + \frac{d}{2}}^{x + \frac{d}{2}} \Delta e(t;x) \cdot \text{grad } t(x) \cdot dx$$

(40)

Przybliżenie we wzorze (4) wynika z założenia symetrycznego trapezowego rozkładu temperatury wzdłuż termoelektrody (rys. 7) założeniu, że:

$$\begin{aligned}
 \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & & x < x_k - \frac{a}{2} \\
 \text{grad } t(x) &= G & \text{dla} & & x_k - \frac{a}{2} < x < x_k - \frac{b}{2} \\
 \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & & x_k - \frac{b}{2} < x < x_k + \frac{b}{2} \\
 \text{grad } t(x) &= -G & \text{dla} & & x_k + \frac{b}{2} < x < x_k + \frac{a}{2} \\
 \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & & x > x_k + \frac{a}{2}
 \end{aligned} \tag{41}$$



Rys. 7. Piecyk z punktowym nagrzewem

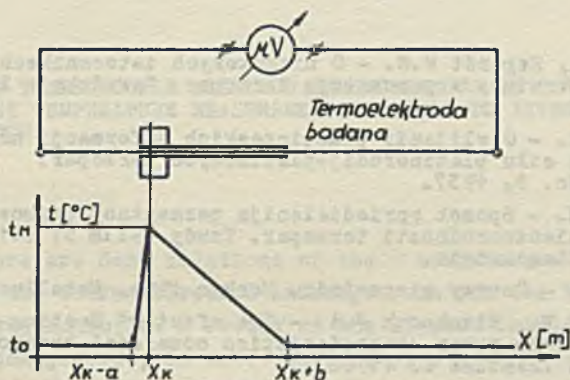
Przy tych założeniach wzór (40) upraszcza się do postaci:

$$E(x_k) = G \int_{x_k - \frac{b}{2}}^{x_k - \frac{a}{2}} e(t;x) dx - G \int_{x_k + \frac{b}{2}}^{x_k + \frac{a}{2}} e(t;x) dx \tag{42}$$

co oznacza, że zmierzona wartość STE jest proporcjonalna do różnicy średnich wartości niejednorodności termoelektrody na odcinku $(x_k - \frac{a}{2}; x_k - \frac{b}{2})$ i odcinku $(x_k + \frac{b}{2}; x_k + \frac{a}{2})$. Przebieg funkcji $\Delta E(x_k)$ pozwala wyznaczyć funkcję niejednorodności w sposób przybliżony, przy czym ze względu na to, że przebieg tej funkcji może być dany w postaci tablicy lub wykresu obliczenia są pracochłonne i uciążliwe.

Podobna sytuacja ma miejsce w piscoyku z niesymetrycznym polem temperatur [8], [9]. Przy rozkładzie temperatur jak na rys. 8 można przyjąć, że

$$\begin{aligned}
 \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & & x < x_k - a \\
 \text{grad } t(x) &= G_1 & \text{dla} & & x_k - a < x < x_k \\
 \text{grad } t(x) &= -G_2 & \text{dla} & & x_k < x < x_k + b \\
 \text{grad } t(x) &= 0 & \text{dla} & & x > x_k + b
 \end{aligned} \tag{43}$$



Rys. 8. Piscoyk z niesymetrycznym rozkładem temperatur

STE generowaną w obwodzie określa wzór:

$$\Delta E(x_k) = G_1 \int_{x_k - a}^{x_k} \Delta e(t, x) dx - G_2 \int_{x_k}^{x_k + b} \Delta e(t, x) dx \tag{44}$$

z którego wynika, że STE niejednorodności odcinka $(x_k - a; x_k)$ jest porównywana ze średnią niejednorodnością odcinka $(x_k; x_k + b)$. Gradient temperatury na odcinku $(x_k; x_k + b)$ jest na ogół wielokrotnie mniejszy niż gradient na odcinku $(x_k - a; x_k)$. Jeżeli więc w termoelektrodzie występuje wyłącznie niejednorodność punktowa, to istnieje duże prawdopodobieństwo, że generowaną STE będzie zależna wyłącznie od niejednorodności odcinka $(x_k - a; x_k)$ tzn.

$$\Delta E(x_k) \approx \Delta e(t_M, x_k). \tag{45}$$

Zależność (45) przestaje być słuszna, gdy w termoelektrodzie występują odcinki niejednorodne o długości porównywalnej z długością odcinka (x_k ; $x_k + b$).

W ogólnym przypadku wyznaczenie funkcji niejednorodności $\Delta e(t; x)$ wymaga bardziej skomplikowanych obliczeń. Podobnie jak i przy zastosowaniu poprzedniej metody obliczenia dają przybliżony przebieg $e(t; x)$. Ocena stopnia przybliżenia wyznaczenia funkcji niejednorodności i związanego z nią błędu pomiaru temperatury wydaje się celowa i możliwa dla konkretnych elektrod. Niestety brak w literaturze wystarczających dla tych celów danych.

LITERATURA

- [1] Gordow A.N., Ergardt N.N. - O niekotorych istocznikach oszibok izmierenija temperatury s pomoszczuju termopar. Zavodskaja Laboratorija, T.24 No 12, 1958.
- [2] Brjagin B.K. - O wlijanii pŁastiozeskich deformacii na termoelektrodwiŁuszczozuju siŁu platinorodij-platinowych termopar. Izmeritelnaja teohnika, No. 5, 1957.
- [3] Ergardt N.N. - Sposob opriedielenija parazitnoj termoelektrodwiŁuszczozujej siŁy nieodnorodnosti termopar. Trudy WNIIM 51 (111) Moskwa-Lenin grad 1961 Standartgiz.
- [4] Gordow A.N. - Osnovy pirometrii. Moskwa 1964. Metallurgija ss. 471.
- [5] Northover E.W., Hitchcock J.A. - The effect of Heating on the local thermo-electric power characteristics commercial thermocouples wires. Instrumenta Praotice 22 (1968) 7.
- [6] Brjagin B.K., Tjetjujewa R.N. - Termoelektriceskaja odnorodnost ohromelwnych, kopelewych, alumelwycch i mednych prowoŁok pri niskich temperaturach. Izmeritelnaja teohnika, No. 6, 1964.
- [7] Tanaka M., Okada K.: - O pogrizznostiaoh termopar wyzwannych tieploprownostiu i o nowoj termoparis dla tocznych izmierenij tiempieratur. Metody izmierenia temperatur. Sbornik statej pod red. SokoŁowa W.A. Moskwa 1954.
- [8] ButkiewicŁ J. - Badania niejednorodnoŁci termoelektrycznej drutów termoelektrodowych. Pomiaru Automatyka Kontrola Nr 1, 1968.

Rękoпись złożono w Redakcji w dniu 26.I.1970 r.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРОД НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРОД

Резюме

Выведены общие формулы связывающие неоднородность термоэлектрод и распределение температуры вдоль термоэлемента с погрешностью измерения температуры. Проведен обзор применимых методов испытания неоднородности проволоки. На основе выведенных формул проанализированы свойства этих методов.

THE EFFECT OF THE THERMOCOUPLE ELEKTROD INHOMOGENEOUS ON THE
PRECISENESS OF THE TEMPERATURE MEASUREMENT. METHODS TO INVESTIGATION
OF THE INHOMOGENEOUS

S u m m a r y

In this paper there are done relations of the temperature measurements preciseness with the thermo-electrod inhomogeneous and the thermal gradient along the thermocouple. A review of the adapted methods, to investigation of the inhomogeneous, is made. The analysis of the methods is based on the equations lead out in this article.