

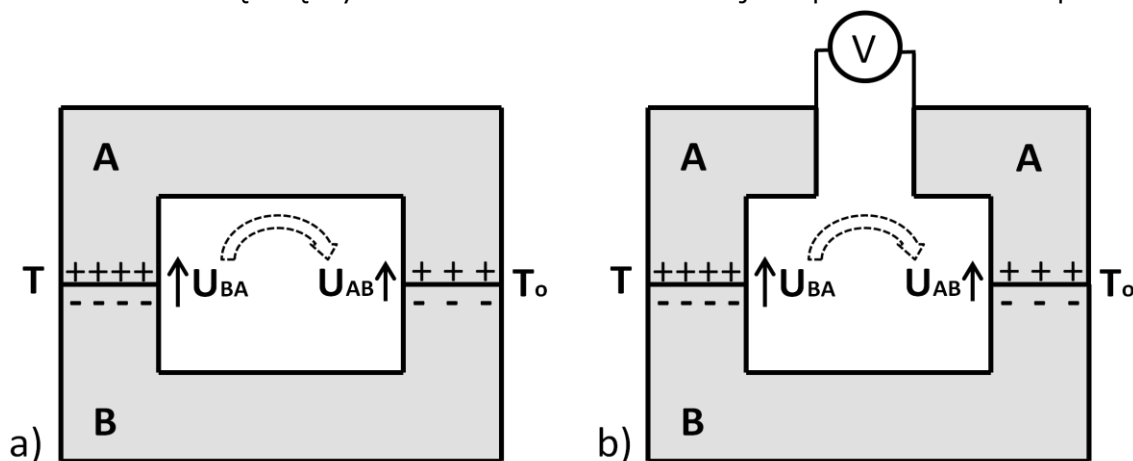
**ĆWICZENIE
20****SKALOWANIE TERMOPARY I WYZNACZANIE TEMPERATURY
KRZEPNIĘCIA STOPU**

Cel ćwiczenia: Poznanie budowy i zasady działania termopary. Skalowanie termopary i wyznaczenie jej współczynnika termoelektrycznego. Badanie zjawiska krzepnięcia i wyznaczenie temperatury krzepnięcia stopu metali. Przykłady zastosowań zjawisk termoelektrycznych.

Zagadnienia: Zjawisko Seebecka, kontaktowa różnica potencjałów, termopara, współczynnik termoelektryczny, krzepnięcie metali, temperatura krzepnięcia, ciepło przemiany fazowej.

1. Wprowadzenie**Budowa i zasada działania termopary**

Termopara to proste urządzenie służące do pomiaru temperatury. Działanie termopary można wytłumaczyć odwołując się do zjawiska Seebecka polegającego na powstawaniu siły termoelektrycznej w obwodzie zawierającym dwa różne połączone metale lub półprzewodniki jeżeli złącza między nimi znajdują się w różnych temperaturach. Żeby to wyjaśnić założmy, że mamy pojedynczy metal A. Cechą charakterystyczną metalu jest to, że posiada on tzw. elektrony swobodne o określonej koncentracji (tj. liczby elektronów przypadających na jednostkę objętości) zbliżonej do koncentracji atomów, z których dany metal jest zbudowany. Skąd wzięły się te elektrony swobodne? Okazuje się, że w procesie wytwarzania metalu z obojętnych atomów określonego pierwiastka atomy te tworzą regularną sieć krystaliczną i z każdego atomu "odrywa" się jeden (lub więcej) najslabiej związany elektron walencyjny. Te elektrony nazywane elektronami swobodnymi nie są związane z konkretnym atomem, lecz mogą przemieszczać się w całej sieci krystalicznej zbudowanej z dodatnio zjonizowanych atomów. Metal jest obojętny elektrycznie bo ujemny ładunek elektronów swobodnych neutralizowany jest dodatnim ładunkiem zjonizowanych atomów. Jeżeli obojętny metal A, o określonej koncentracji elektronów, zetkniemy z obojętnym metalem B o innej koncentracji elektronów swobodnych, przyjmijmy, że mniejszej niż w metalu A, to w okolicy styku elektrony z metalu A będą przepływać (dyfundować) do obszaru gdzie jest ich mniej czyli do metalu B. Więc w okolicy złącza dotychczas obojętne metale naładują się; metal A dodatnio, a metal B ujemnie (rys. 1a). Jeżeli ujemny potencjał elektryczny metalu B wskutek napływu elektronów wzrośnie (co do wartości bezwzględnej), to będzie on hamował napływ kolejnych elektronów z metalu A i ustali się między metalami określona w danej temperaturze różnica potencjałów U_{BA} .



Rys. 1. a) Obwód zamknięty złożony z metalu A o większej koncentracji elektronów swobodnych oraz metalu B o mniejszej koncentracji elektronów swobodnych. **b)** Ten sam obwód z podłączonym woltmierzem do pomiaru napięcia termoelektrycznego.

Jest to tzw. kontaktowa różnica potencjałów, która zależy od temperatury T obu metali w miejscu styku.

Załóżmy teraz, że metale A i B mają formę drutów i jedne ich końce stykają się w temperaturze T , dzięki czemu powstaje na tym złączu kontaktowa różnica potencjałów $U_{BA}(T)$ (rys. 1a). Przyjmijmy też, że drugie końce drutów zetknięto ze sobą w temperaturze T_0 , dzięki czemu na tym złączu powstaje kontaktowa różnica potencjałów $U_{AB}(T_0)$. Jeżeli będziemy teraz "obchodzić" obwód złożony z obu drutów dookoła np. zgodnie z kierunkiem wskazanym przez przerywaną podwójną strzałkę, to widzimy, że te napięcia są przeciwnie zwrócone, więc się odejmują dając w układzie termopary wypadkową siłę termoelektryczną, którą można zmierzyć, ale bezprądowo, podłączając do układu woltomierz o nieskończenie dużej rezystancji wewnętrznej tak jak na rys. 1b. W praktyce dobre woltomierze mają dużą, ale jednak skończoną wartość rezystancji wewnętrznej, więc zamiast siły termoelektrycznej woltomierze te mierzą jej przybliżoną wartość zwaną napięciem termoelektrycznym. Ponadto, dzięki dużej rezystancji wewnętrznej woltomierza, a co za tym idzie praktycznie bezprądowemu pomiarowi możemy zaniedbać inne efekty termoelektryczne, te które związane są z przepływem prądu, takie jak zjawisko Peltiera czy Thomsona. Jeżeli temperatury obu złączy będą jednakowe ($T=T_0$), to również obie kontaktowe różnice potencjałów będą jednakowe i woltomierz wskaże zerowe napięcie. Tu należy zwrócić uwagę na to, że podłączenie samego woltomierza do układu przy pomocy dodatkowych przewodów wykonanych z innego metalu niż metal A wprowadza kolejne złącza w układzie. Ale jeżeli te złącza znajdują się w jednakowej temperaturze T_1 (która może być inna niż T i T_0), np. w temperaturze otoczenia, to kontaktowe różnice potencjałów powstające na tych dodatkowych złączach wzajemnie się kompensują i nie zmieniają wypadkowego napięcia mierzonego przez woltomierz. Jest to tzw. prawo trzeciego metalu.

Najważniejszymi zaletami termopar są: małe rozmiary, niska pojemność cieplna, mała bezwładność czasowa, wysoka czułość, szeroki zakres pomiarowy oraz to, że przetwarzają bezpośrednio wielkość nieelektryczną — temperaturę na wielkość elektryczną — napięcie. Umożliwia to przesyłanie sygnału na duże odległości, przetwarzanie i gromadzenie danych o temperaturze badanego obiektu, a także sterowanie różnymi procesami. Do zalet termopar należą również niezawodność, prostota i niskie koszty wykonania.

Należy zauważyć też, że jeżeli w układzie przedstawionym na rys. 1b woltomierz zastąpimy odbiornikiem elektrycznym, to dzięki napięciu termoelektrycznemu przez urządzenie to popłynie prąd elektryczny i może ono działać bez dodatkowego zasilacza. Wystarczy zapewnić odpowiednią różnicę temperatur obu złączy żeby taki układ zwany ogniwem termoelektrycznym pełnił rolę generatora prądu małej mocy. Jest to przykład bezpośredniej zamiany energii cieplnej (włożonej w podgrzanie jednego ze złączy) na energię elektryczną.

W ostatnim przykładzie ogniwa termoelektrycznego mieliśmy bezpośrednią zamianę energii cieplnej na elektryczną. Żeby do tej zamiany doszło musieliśmy zapewnić różnicę temperatur obu złączy w ogniwie aby to spowodowało przepływ prądu w układzie. Ale można też uzyskać efekt odwrotny. Jeżeli do układu z dwoma złączami o jednakowej temperaturze przedstawionym na rys. 1b zamiast woltomierza podłączymy zasilacz wymuszający przepływ prądu, to prąd ten spowoduje grzanie jednego złączy i chłodzenie drugiego, w efekcie czego ustali się różnica temperatur obu złączy. Jeżeli wymusimy przepływ prądu w przeciwnym kierunku to złącza zamienią się rolami: pierwsze będzie się schładzać, a drugie grzać. Efekt grzania lub schładzania się złączy pod wpływem płynącego przez nie prądu zwany jest efektem Peltiera i wykorzystywany jest głównie w chłodziarkach, ale również w grzejnikach choć ze względu na koszty znacznie rzadziej. Jeżeli przez złącze płynie prąd o natężeniu I , to energia cieplna wydzielana lub pobierana w jednostce czasu (moc) P_p określona jest równaniem:

$$P_p = \pi_p \cdot I, \quad (1)$$

gdzie: π_p – stała Peltiera zależna od rodzajów metali (półprzewodników) tworzących złącze i od temperatury złącza. Większą wydajność cieplną mają złącza półprzewodnikowe $p-n$. Obecnie w sprzedaży znajdują się wielostopniowe moduły Peltiera dające maksymalną różnicę temperatur części chłodzonej w stosunku do grzanej przekraczającą nawet 100°C .

Wydzielanie się ciepła lub jego pochłanianie występuje również wtedy gdy prąd elektryczny płynie przez jednorodny przewodnik (lub półprzewodnik), wzdłuż którego występuje zmiana temperatury. To zjawisko termoelektryczne nazywa się efektem Thomsona, a wydzielone lub pochłonięte w tym zjawisku ciepło nazywamy ciepłem Thomsona. Oznacza to, że np. w samym metalu B na rys. 1 wydziela się, lub pochłaniane jest ciepło w zależności od tego, w którą stronę płynie prąd i od tego czy temperatura w kierunku płynącego prądu rośnie czy maleje. Dla małych różnic temperatur na końcach przewodnika ciepło Thomsona wymienione z otoczeniem w jednostce czasu (czyli moc) P_T można obliczyć korzystając z przybliżonego równania:

$$P_T \cong \sigma \cdot I \cdot (T - T_o), \quad (2)$$

gdzie: σ – współczynnik Thomsona zależny od rodzaju materiału i temperatury, I – natężenie prądu, T i T_o – temperatury na końcach przewodnika, w którym wydziela się lub pochłaniane jest ciepło Thomsona. Współczynnik σ uznaje się za dodatni, jeżeli przepływ prądu od punktu o temperaturze wyższej do punktu o temperaturze niższej powoduje wydzielanie ciepła. Tu należy jeszcze zwrócić uwagę na to, że ciepło Thomsona, jest innym ciepłem niż ciepło Joule'a-Lentza, które zawsze się wydziela gdy przez przewodnik płynie prąd, bez względu na to w którą stronę prąd płynie oraz na to czy wzdłuż przewodnika występuje zmiana temperatury.

W układzie termopary, w którym płynie prąd wszystkie opisane wyżej zjawiska cieplne występują jednocześnie. W ćwiczeniu, jak już wspomniano, mierzymy napięcie w układzie przedstawionym na rys. 1b woltomierzem o bardzo dużej rezystancji wewnętrznej. W związku z tym prąd w układzie praktycznie nie płynie i występuje jedynie zjawisko Seebecka odpowiedzialne za powstanie napięcia termoelektrycznego.

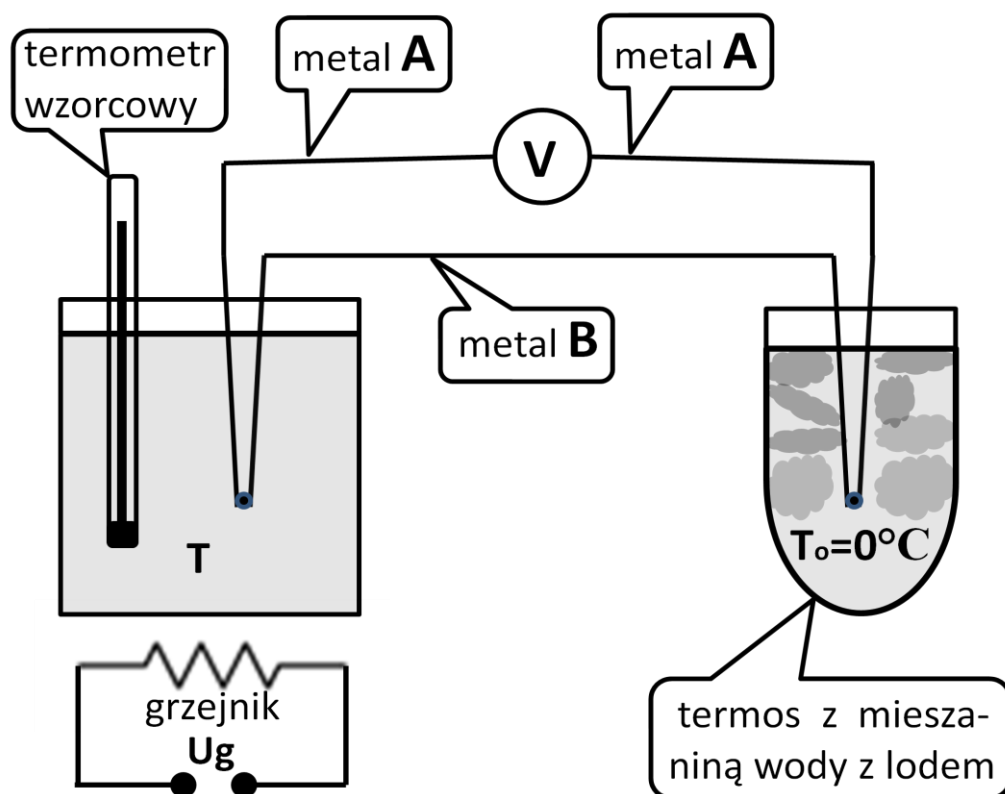
2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Skalowanie termopary

Idea wykorzystania obwodu przedstawionego na rys. 1 zwanego termoparą do pomiaru temperatury polega na tym, że jedno ze złączy utrzymywane jest w stałej temperaturze odniesienia T_o , np. w mieszaninie wody z lodem (rys. 2), która pod normalnym ciśnieniem ma temperaturę 0°C , a drugie złącze umieszczone jest w miejscu, którego temperaturę T chcemy zmierzyć. W tych warunkach wszelkie zmiany temperatury T będą wpływać na zmiany kontaktowej różnicy potencjałów $U_{BA}(T)$, a więc i na mierzone woltomierzem napięcie termoelektryczne U . Żeby wykorzystać termoparę do pomiaru temperatury należy wcześniej ją wyskalować, tzn. przy pomocy termometru wzorcowego ustalić zależność mierzonego woltomierzem napięcia od zmienianej przy pomocy grzejnika temperatury złącza T umieszczonego w tym samym naczyniu co termometr wzorcowy.

Termopary wykonane z określonych metali mają powtarzalne, ściśle określone charakterystyki uzależniające napięcie mierzone w układzie termopary od temperatury jednego złącza, gdy drugie utrzymywane jest w stałej temperaturze odniesienia. Te charakterystyki można znaleźć w odpowiednich tablicach. Różny dobór metali lub stopów metali daje możliwość wykonania termopar o wysokiej czułości pracujących w różnych zakresach temperatury przy zachowaniu odpowiednich własności mechanicznych (np. termopara nie topi się) i chemicznych. I tak najczęściej termopary wykonywane są z:

- miedzi i konstantanu (40% Ni i 60% Cu) – zakres pomiarowy od 70 K do 800 K,
- platyny i platynorodu (90% Pt i 10% Rh) – zakres pomiarowy do 1300 K,
- irydu i stopu irydu z rodem – zakres pomiarowy do 2300 K.

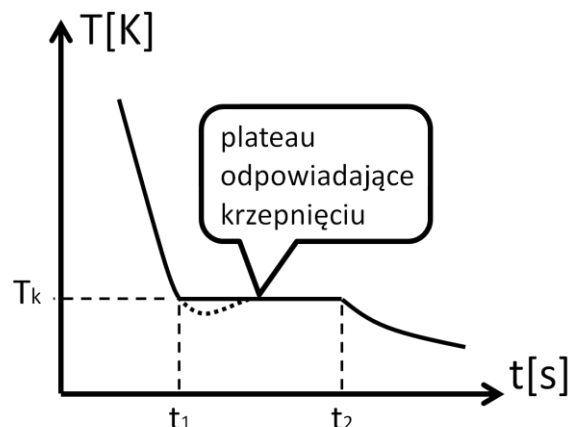


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego służącego do skalowania termopary lub do pomiaru temperatury T gdy termopara jest już wyskalowana (wtedy termometr wzorcowy jest zbędny).

Wyznaczanie temperatury krzepnięcia stopu metali

Zajmijmy się przemianą fazową pierwszego rodzaju. Podczas takiej przemiany wydzielane jest lub pochłaniane ciepło, a temperatura ciała pozostaje stała. Do przemian fazowych pierwszego rodzaju zaliczamy między innymi przemiany, w których zachodzi zmiana stanu skupienia ciała czyli krzepnięcie, topnienie, parowanie, skraplanie, sublimacja i resublimacja. W ćwiczeniu badany jest proces krzepnięcia. Podczas tego procesu krzywa stygnięcia, czyli zależność temperatury ciała od czasu będzie wyglądać jak na rys. 3. Początkowo, gdy ciało znajduje się w fazie ciekłej, oddawaniu ciepła do otoczenia towarzyszy obniżanie się temperatury.

Gdy ciało zaczyna krzepnąć (na wykresie chwila t_1) ciepło w dalszym ciągu jest oddawane do otoczenia, lecz temperatura utrzymuje stałą wartość odpowiadającą temperaturze krzepnięcia T_k — na wykresie obserwujemy tzw. plateau (czytaj: plato) reprezentowane poziomą linią ciągłą. Gdy już całe ciało ulegnie skrzepnięciu (t_2) oddawaniu ciepła do otoczenia znowu zacznie towarzyszyć dalsze obniżanie się temperatury ciała. Ciepło oddane podczas krzepnięcia pomiędzy chwilami t_1 i t_2 wynika z tego, że energia wewnętrzna ciała w fazie ciekłej w temperaturze krzepnięcia jest wyższa niż energia wewnętrzna ciała w tej temperaturze w fazie stałej. Wobec tego gdy ciało krzepnie to wydzielane jest ciepło, której ilość jest równa różnicy energii wewnętrznych ciała w obu fazach.



Rys. 3. Zależność temperatury stygnącego ciała od czasu dla ciała, w którym występuje przemiana fazowa pierwszego rodzaju

Ciepło oddane lub pochłonięte przez ciało podczas przemiany fazowej pierwszego rodzaju w stałej temperaturze podzielone przez masę ciała nazywamy utajonym ciepłem przemiany fazowej. Wartości tego ciepła są charakterystyczne dla rodzaju substancji i można je znaleźć w tablicach fizycznych.

Na wykresie odpowiadającym krzepnięciu badanego w ćwiczeniu stopu w przedziale czasu, w którym występuje plateau mierzona temperatura może się początkowo obniżyć, a następnie wzrosnąć. Powodem tego może być przechłodzenie cieczy, czyli obniżenie temperatury cieczy poniżej temperatury krzepnięcia T_k (linia przerywana na wykresie). Taki stan można uzyskać albo poprzez wolne chłodzenie bardzo czystej cieczy (tzn. bez zarodków krystalizacji, na których mógłby rozpocząć się proces krystalizacji), albo w wyniku bardzo szybkiego chłodzenia nawet cieczy zanieczyszczonej. Innym powodem odstępstw od plateau może być fakt, że wskutek szybkiego oddawania ciepła do otoczenia ciecz nie stygnie jednorodnie w całej objętości (zaczyna krzepnąć od powierzchni gdzie jest najniższa temperatura), a pomiar temperatury odbywa się w jednym punkcie. Jeszcze inną przyczyną małych zmian temperatury ciała podczas krzepnięcia może być fakt, że badany stop jest wieloskładnikowy i wskutek krzepnięcia dochodzi do częściowej segregacji składników, a zatem skład cieczy, która nie uległa jeszcze skrzepnięciu może nieznacznie się zmieniać, co pociąga za sobą niewielką zmianę temperatury krzepnięcia. W tym przypadku w celu wyznaczenia temperatury krzepnięcia stopu metali należy stosować się do poleceń zawartych w instrukcji wykonawczej.

Zwróćmy uwagę na to, że gdy na wykresie przedstawionym na rys. 3. temperaturę T zastąpimy napięciem termoelektrycznym U mierzonym w układzie termopary (taki wykres należy wykonać w sprawozdaniu z ćwiczenia), to kształt wykresu się nie zmieni ponieważ w badanym zakresie temperatury napięcie termoelektryczne jest liniową funkcją temperatury.

3. Zadania do wykonania

3.1. Pomiary i ich opracowanie – skalowanie termopary

W wykonywanym ćwiczeniu pierwszym zadaniem do wykonania jest skalowanie termopary czyli wykreślenie zależności $U=f(T)$ tj. napięcia termoelektrycznego U mierzonych w układzie termopary od zmienianej temperatury T jednego ze złączy termopary podczas gdy drugie złącze utrzymywane będzie w stałej temperaturze odniesienia $T_o=0^{\circ}\text{C}$. Skalowanie należy przeprowadzić w zakresie temperatury od 20°C do 90°C (dla bezpieczeństwa nie należy przekraczać górnej granicy). W badanym zakresie zależność $U(T)$ z bardzo dobrym przybliżeniem można opisać zależnością liniową:

$$U = \alpha \cdot (T - T_o) , \quad (3)$$

gdzie α – współczynnik termoelektryczny termopary. Wartość tego współczynnika jest równa wartości siły termoelektrycznej w układzie termopary, gdy różnica temperatur pomiędzy złączami wynosi jeden stopień Celsjusza (lub jeden Kelwin), czyli mówi o czułości termopary.

Współczynnik termoelektryczny należy wyznaczyć posługując się metodą regresji liniowej, która pozwala znaleźć równanie prostej najlepiej dopasowanej do zmierzonych punktów na wykresie skalowania $U=f(T)$. Współczynnik kierunkowy wyznaczonej prostej jest zarazem współczynnikiem termoelektrycznym termopary. Zatem wartość niepewności wyznaczenia współczynnika kierunkowego prostej, ustalona również metodą regresji liniowej, jest też wartością niepewności wyznaczanego współczynnika termoelektrycznego.

Szczegółowy opis czynności wykonywanych w trakcie skalowania termopary znajduje się w instrukcji wykonawczej do tego ćwiczenia.

3.2. Pomiary i ich opracowanie – wyznaczenie temperatury krzepnięcia stopu

W celu wyznaczenia temperatury krzepnięcia badanego stopu metali wykorzystujemy układ pomiarowy przedstawiony schematycznie na rys. 2. Złącze, które znajdowało się w naczyniu z wodą o temperaturze T przekładamy do tygla, w którym znajduje się badany stop. Tygiel

umieszczamy na grzałce i podgrzewamy do temperatury ok. 85°C (nie należy przegrzewać układu). Następnie wyłączamy grzałkę i przekładamy tygiel na odpowiednią metalową podstawkę przyspieszającą odprowadzanie ciepła do otoczenia. Podczas stygnięcia stopu notujemy czas t oraz napięcie termoelektryczne U , a następnie sporządzamy wykres stygnięcia stopu $U=f(t)$. Z wykresu wyznaczamy napięcie U_k odpowiadające krzepnięciu (plateau). Następnie wykorzystując równanie (3) oraz wyznaczony podczas skalowania termopary współczynnik termoelektryczny α obliczamy temperaturę krzepnięcia stopu T_k . Szczegółowy opis czynności wykonywanych w celu wyznaczenia temperatury krzepnięcia oraz analiza niepewności pomiarowych znajduje się w instrukcji wykonawczej do tego ćwiczenia.

4. Pytania:

1. Budowa termopary i jej zastosowanie. Zalety termopary.
2. Wyjaśnić powstawanie kontaktowej różnicy potencjałów na styku dwóch metali.
3. Przedstawić mechanizm powstawania siły termoelektrycznej.
4. Wyjaśnić na czym polega skalowanie termopary.
5. Podać zależność siły termoelektrycznej od temperatury jednego złącza termopary podczas gdy drugie złącze utrzymywane jest w stałej temperaturze odniesienia.
6. Zdefiniować współczynnik termoelektryczny i podać jego jednostkę. Jak można go wyznaczyć?
7. Na czym polegają zjawiska Peltiera i Thomsona?
8. Naszkicować i objaśnić krzywą krzepnięcia metali.
9. Podać sposób wyznaczania temperatury krzepnięcia metalu.
10. Podaj sposób obliczania niepewności wyznaczonej temperatury krzepnięcia stopu.
11. Co to jest ciepło przemiany fazowej pierwszego rodzaju?

Opracował: Janusz Bożym