

Józef KWICZAŁA

## BADANIA MATERIAŁÓW TERMOMAGNETYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule opisano problemy związane z badaniami materiałów termomagnetycznych. Przedstawiono wyniki badań właściwości próbek materiałów termomagnetycznych przy zmiennych warunkach wymuszeń parametrów zewnętrznych, tj. temperatury oraz natężenia pola magnetycznego. Porównano wyniki badań tych materiałów z wynikami uzyskanymi metodami stałoprądowymi.

## INVESTIGATION OF TERMOMAGNETIC MATERIALS

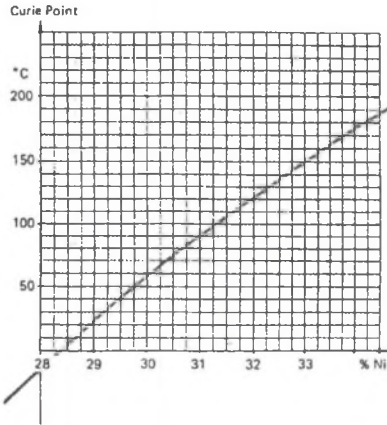
**Summary.** Problems concerning investigation of termomagnetic materials have been described. The results of investigation of termomagnetic material samples at variable conditions, i.e. temperature and magnetic field strength have been presented. The results of investigation have been compared with the results obtained from the direct current method.

### 1. WPROWADZENIE

Materiały termomagnetyczne otrzymuje się jako stopy żelaza oraz niklu. Największe praktyczne zastosowanie znalazły materiały, których punkt Curie jest bliski temperatury pokojowej: (20 - 70)°C. Zmienność punktu Curie w funkcji zawartości Ni jest przedstawiona na rysunku 1. Jak wynika z tej charakterystyki, zawartość niklu w materiałach termomagnetycznych powinna być zapewniona z dość dużą dokładnością (dziesiąte części procent). Wynikają stąd poważne trudności technologiczne w otrzymaniu materiałów o odpowiedniej temperaturze Curie i zarazem o odpowiednich właściwościach metrologicznych. Istotne stało się zatem opracowanie właściwych metod badań materiałów termomagnetycznych, pozwalających na dokładne określenie ich właściwości metrologicznych.

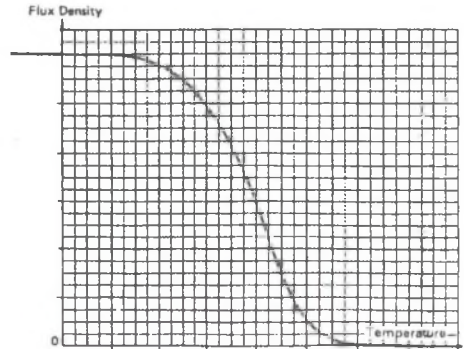
Podstawową fizyczną właściwością materiałów termomagnetycznych są odwracalne zmiany magnetyzmu w okolicach punktu Curie. W czasie nagrzewania stopy te wykazują stopniowe zmniejszanie ich własności magnetycznych i po osiągnięciu punktu Curie stają się

materiałami niemagnetycznymi. Po ochłodzeniu do temperatury początkowej odzyskują one taki sam stan magnetyczny jak poprzednio, co oznacza, że zmiana właściwości magnetycznych jest dla tych materiałów odwracalna.



Rys.1. Zależność punktu Curie od zawartości niklu w termomagnetykach

Fig.1. Curie point of Fe-Ni Alloys, as a function of their Ni content



Rys.2. Zależność indukcji nasycenia od temperatury

Fig. 2. Saturation induction vs. temperature for magnetic material

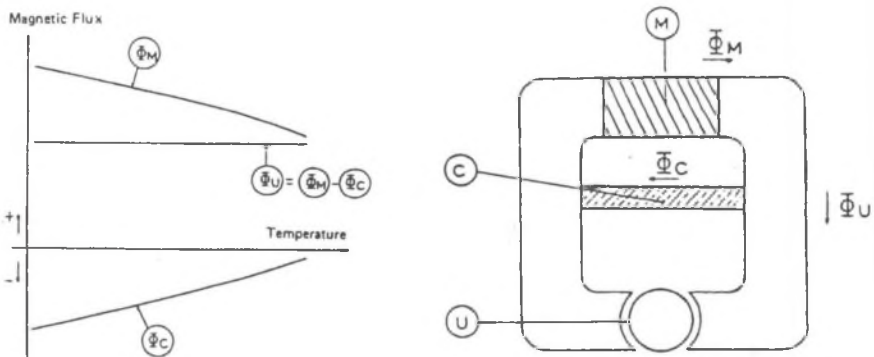
Właściwości materiałów termomagnetycznych są najczęściej wykorzystywane w przyrządach pomiarowych opartych konstrukcyjnie na materiałach magnetycznych, których wyniki pomiarów (wskazań) ulegają wpływowi wywołanym przez zmiany temperatury podczas ich działania, np. mierniki elektryczne, liczniki energii elektrycznej, prędkościomierze lub obrotomierze samochodowe.

W każdym materiale magnetycznym indukcja magnetyczna oraz indukcja nasycenia zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury i odwrotnie. Zależność tę przedstawiono graficznie na rys.2. Stąd, aby uzyskać dużą dokładność przyrządów pomiarowych, konieczna jest kompensacja strumienia magnetycznego w żądanym zakresie temperatury. Dodatkowym problemem pojawiającym się wraz ze zmianami temperatury jest fakt, że wraz ze wzrostem temperatury powiększa się rezystancja uzwojeń cewek z rdzeniami magnetycznymi przyrządów pomiarowych. Powoduje to zmniejszenie prądu (przy zasilaniu napięciowym), a zatem zmianę sił magnetomotorycznych tych cewek.

W konsekwencji prowadzi to do zmiany głównego strumienia magnetycznego płynącego w materiałach magnetycznych użytych w konstrukcji tych przyrządów. Kompensację wpływu temperatury, poprzez stabilizację strumienia magnetycznego, uzyskuje się poprzez zastosowanie bocznika magnetycznego wykonanego ze stopu materiału termomagnetycznego.

## 2. ZASADA KOMPENSACJI MAGNETYCZNEJ

Zasada stabilizacji głównego strumienia magnetycznego (kompensacji magnetycznej) jest pokazana na rysunku 3. Kompensację magnetyczną uzyskuje się przez rozdzielenie głównego strumienia magnetycznego  $\Phi_M$  za pomocą bocznika wykonanego ze stopu materiału termomagnetycznego.



Rys.3. Zasada kompensacji magnetycznej. M – magnes, C – bocznik z materiału termomagnetycznego, U – szczelina użytkowa

Fig.3. Principle of thermal compensation. M – magnet, C – shunt (compensating alloy), U – useful air gap

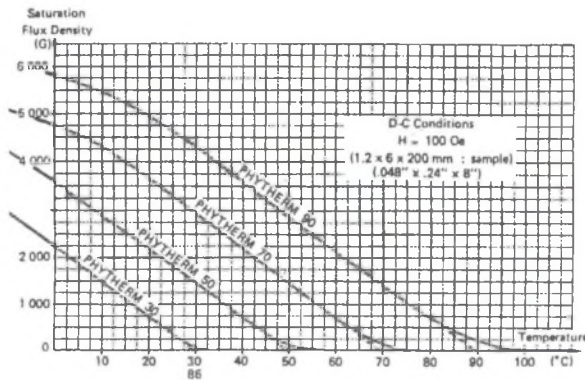
Wartość użytecznego strumienia  $\Phi_U$  w szczelinie powietrznej, w której jest umieszczony np. organ ruchomy miernika, wynosi

$$\Phi_U = \Phi_M - \Phi_C$$

Krzywa przebiegu strumienia kompensacyjnego  $\Phi_C$  jest odwrotna w stosunku do krzywej przebiegu strumienia głównego  $\Phi_M$ , ponieważ strumień bocznika powinien być odejmowany od strumienia głównego. Jeżeli bocznik jest zaprojektowany stosownie do zmian temperaturowych indukcji magnetycznej materiału magnetycznego i dobrany jest odpowiedni stop termomagnetyka, to wartość strumienia użytkowego  $\Phi_U$  w szczelinie powietrznej może być utrzymywana na stałym poziomie w całym zakresie zmian temperatury.

### 3. POMIARY MAGNETYCZNE

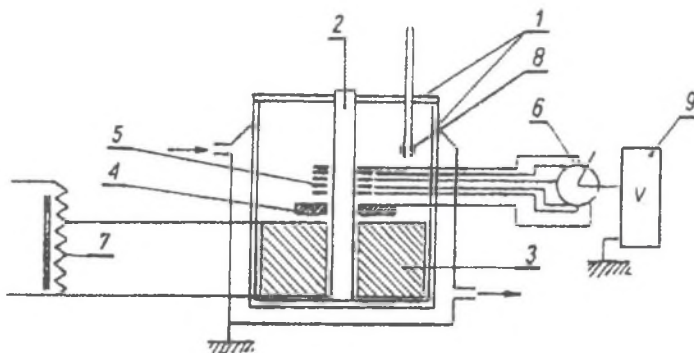
W celu spełnienia wymagań temperaturowych różnorodnych przyrządów pomiarowych zachodzi konieczność stosowania materiałów termomagnetycznych o różnych charakterystykach. Przykładowe charakterystyki indukcji magnetycznej nasycenia różnych materiałów termomagnetycznych, w funkcji temperatury, przedstawiono na rys.4. Ponieważ temperatury punktu Curie materiałów termomagnetycznych są gwarantowane z niedokładnością  $\pm 10$  K, materiały te produkuje się najczęściej z odstępem wartości znamionowych temperatur punktu Curie wynoszącym 20 K.



Rys.4. Zależność indukcji od temperatury w materiałach termomagnetycznych  
Fig.4. Typical magnetic induction vs. temperature

Przedmiotem badań były próbki pierścieniowe o wymiarach 33 mm x 22 mm (średnica zewnętrzna i wewnętrzna) oraz grubości 3 mm, wycięte z taśmy termomagnetycznej. Zgodnie z normami [1, 2] stosunek średnic był nie większy od 1.5. Warunek ten zapewnia dostateczną jednorodność pola w kierunku promieniowym wewnątrz próbki. Pomiary przeprowadzono w przemiennym polu magnetycznym o częstotliwości 50 Hz. Zapewniono sinusoidalny przebieg czasowy indukcji oraz jednostajny rozkład natężenia pola w próbce. Szczytową wartość indukcji magnetycznej obliczono z napięcia indukowanego w uzwojeniu pomiarowym próbki. W celu osiągnięcia pełnego nasycenia indukcji w próbce przyjęto, że natężenie pola magnetycznego powinno mieć amplitudę 10 kA/m.

Zasadniczą część zestawu pomiarowego stanowi termopermeometr, przedstawiony na rys.5. Służy on do wytworzenia wymaganego natężenia pola magnetycznego (o cylindrycznym rozkładzie linii pola) i temperatur w zakresie od  $-40$  °C do  $+80$  °C. Temperatury te obejmują najczęściej stosowane warunki pracy dla różnych odmian stopów termomagnetycznych.



Rys.5. Termopermeametr. 1 – naczynie miedziane w kształcie walca, 2 – rdzeń środkowy, 3 - uzwojenie wzbudzające, 4 – uzwojenie pomiarowe, 5 – badane próbki, 6 – przełącznik, 7 – autotransformator, 8 – termometr, 9 – woltomierz

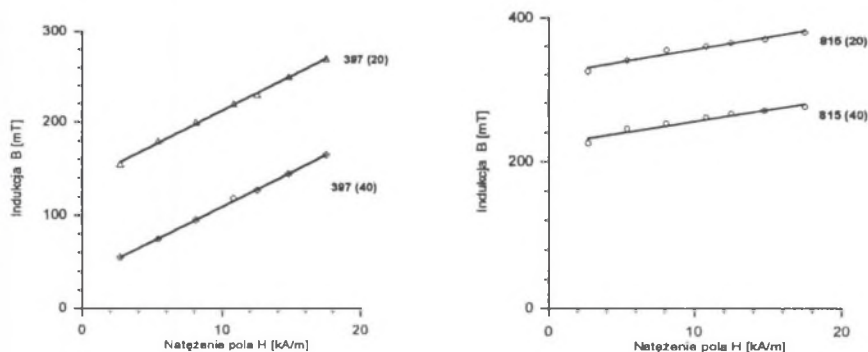
Fig.5. Termopermeameter. 1 – copper cylinder, 2 – central core, 3 – exciting winding, 4 - measuring winding, 5 – tested samples, 6 – switch, 7 – autotransformer, 8 – thermometer, 9 – voltmeter

Termopermeametr jest dwuściennym naczyniem miedzianym w kształcie walca (1), zapatrzonym w centryczny pręt (2), również z miedzi, i szczelnie dopasowaną pokrywą miedzianą. Zestawienie tych trzech elementów miedzianych tworzy obwód, w którym płynie prąd wzbudzający. Na środkowy pręt nałożony jest toroidalny transformator (3), służący do zasilania obwodu wzbudzającego. Odpowiednia wartość prądu zapewnia żądaną wartość natężenia pola w próbce.

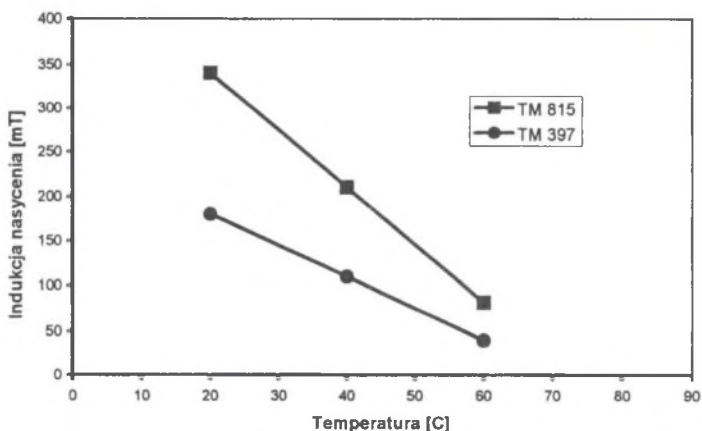
Parametrem charakteryzującym odpowiednie właściwości materiałów termomagnetycznych jest, zgodnie z normą [1], indukcja magnetyczna mierzona w poszczególnych temperaturach i przy określonej wartości natężenia pola. Przyjęto w normie wartość 8 kA/m, jako wartość maksymalną tego natężenia. Temperatury próbek powinny wynosić 20°C oraz 40°C. Istotnym wg normy jest również określenie temperatury Curie.

Wyniki badań próbek różnych materiałów termomagnetycznych, dla różnych temperatur, przedstawiono na rys.6. Charakterystyki magnesowania tych materiałów wykazują różny przyrost indukcji przy tym samym przyroście natężenia pola. Parametrem różnicującym te właściwości jest zatem przenikalność magnetyczna tych materiałów w obszarze nasycenia.

Przenikalność magnetyczna w obszarze nasycenia, co okazuje się bardzo istotne, jest jednak stała w szerokim zakresie natężenia pola. Pozwala to na dokonanie badań próbek przy znacznie mniejszych wartościach natężenia pola niż zakłada norma. Jest to istotny wniosek z punktu widzenia dokładności badań. Okazuje się bowiem, że dla prądu wzbudzającego rzędu 600 A – co odpowiada 10 kA/m wartości maksymalnej natężenia pola - obserwowano wzrost temperatury próbek, spowodowany ich nagrzewaniem od prądu wzbudzenia. Zmniejszenie prądu termokompensatora pozwoli zatem na pominięcie składnika błędu spowodowanego przyrostem temperatury od tego prądu



Rys.6. Charakterystyki magnesowania różnych materiałów termomagnetycznych  
Fig.6. Magnetization curves of various thermomagnetic materials



Rys.7. Charakterystyki temperaturowe termomagnetyków –  $t_c$  – punkt Curie  
Fig.7. Dependence of the saturation flux density on temperature –  $T_c$  - Point Curie

W celu określenia temperatury Curie, wyniki pomiarów przedstawiono w postaci wykresu indukcji w funkcji temperatury przy określonym, jednakowym natężeniu pola. Temperaturę Curie wyznaczono z przecięcia stycznej do krzywej wykresu (rys.7) w punkcie jej przecięcia z osią temperatur. Punkt styczności jest punktem największej stromości krzywej.

Badane materiały, pomimo różnych charakterystyk magnesowania i różnych właściwości, charakteryzowały się taką samą wartością temperatury Curie. Parametrem charakteryzującym właściwości metrologiczne materiałów termomagnetycznych powinna być zatem nie tylko

wartość temperatury Curie, ale również stromość opadania charakterystyki temperaturowej. Stromość opadania należy wyznaczać w środkowym zakresie temperatury badań tych materiałów.

#### 4. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań materiałów termomagnetycznych wyciągnięto następujące wnioski, które posłużyły do modyfikacji metody badań tych materiałów.

1. Materiały termomagnetyczne należy badać w zakresie natężeń pola do ok. 5 kA/m, czyli przy natężeniach pola znacznie mniejszych od wymagań normy. Charakterystyki te pozwolą na wystarczająco dokładne wyznaczenie przenikalności magnetycznej w obszarze nasycenia.
2. Zmniejszenie prądu magnesującego pozwoli na zmniejszenie wpływu nagrzewania się badanych próbek i na pominięcie składnika błędu spowodowanego przyrostem temperatury od prądu termokompensatora.
3. Parametrami koniecznymi i wystarczającymi do określenia właściwości magnetycznych materiałów termomagnetycznych, niezbędnymi do ich zróżnicowania do zastosowań w przyrządach pomiarowych są:
  - przenikalność magnetyczna w obszarze nasycenia
  - temperatura Curie,
  - stromość spadku charakterystyki temperaturowej indukcji  $\Delta B / \Delta T$  tych materiałów
4. Z porównania charakterystyk magnesowania badanych materiałów prądem przemiennym z charakterystykami uzyskanymi dla tych materiałów podczas badań prądem stałym (firma IMPHY – Francja) wynika, że odpowiednikiem wartości stałego natężenia pola jest wartość maksymalna natężenia pola przemiennego.

#### LITERATURA

1. Norma IEC 404-2. Magnetic materials. Part 2: Method of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip.
2. Norma Branżowa BN-75/0892-04. Stopy termomagnetyczne żelaza z niklem.
3. Polska Norma PN-72/T-01019. Magnetyzm. Nazwa i określenia.

Recenzent: Dr hab. inż. Grzegorz CIESIELSKI

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 grudnia 1998 r.

## Abstract

Thermomagnetic materials are iron-nickel alloys. Their Curie point ( $20 \pm 30$ ) °C is close to the room temperature. There are serious technological difficulties to obtain materials with appropriate both Curie point and metrological properties. The basic physical property of thermomagnetic materials is the invertible changes of magnetism around Curie point. During heating the magnetism of these alloys decreases gradually, and when Curie point is reached the alloys become non-magnetic materials. After cooling down to the initial temperature they recover the same level of the magnetism (that is the level which they had before heating) which means that the change of magnetic properties of these materials is invertible.

Thermomagnetic materials are also used in measuring instruments. In order to obtain the high accuracy of measuring instruments it is necessary to compensate the magnetic flux within the required temperature range. To meet the temperature requirements of different measuring instruments it is necessary to use thermomagnetic materials with different magnetic characteristics. The exemplary characteristics of the saturation magnetic flux density versus temperature are presented in Fig.4.

The following conclusions can be drawn from the performed investigations:

- thermomagnetic materials should be tested within the magnetic field strength range up to 5 kA/m., that is for the magnetic field strength values considerably lower than those recommended by the standards. The characteristics obtained during investigations in such a range enable the sufficiently accurate determination of the magnetic permeability in the saturation region ,
- the necessary and sufficient parameters used for determination of the magnetic properties of thermomagnetic materials are:
  - the magnetic permeability in the saturation region,
  - Curie temperature,
  - the slope of the temperature characteristic of the magnetic flux density  $\Delta B/\Delta T$  of these materials.

Thermal compensation is realized by means of a magnetic shunt made of compensating alloy. The ring samples of 33 mm x 22 mm dimensions cut out of a thermomagnetic strip have been used for investigation. The measurements have been made in an alternating magnetic field of 50 Hz frequency. The sinusoidal magnetic flux density and distribution of the magnetic field strength in the sample have been provided.

The results of investigation of various thermomagnetic materials for different temperatures are presented in Fig.6. The magnetization curves of these materials show various increments of the magnetic flux density at the same increment of the magnetic field strength.

The magnetic permeability of these materials is constant in the wide range of magnetic field strength (in saturation region). Investigation of the samples can be made at considerably smaller values of the magnetic field strength than those resulting from the standards. It is essential considering the accuracy of investigation.