

HUTNICTWO
METALI
NIEŻELAZNYCH

Materiały magnetycznie miękkie
Wyznaczanie dynamicznych krzywych
magnesowania metodą ferrometryczną

Grupa katalogowa III 59

1. WSTĘP

1.1. Przedmiot normy. Przedmiotem normy jest metoda wyznaczania przebiegu dynamicznej pętli histerezy i dynamicznej krzywej magnesowania za pomocą ferrometru.

1.2. Zakres stosowania normy. Norma obowiązuje w zakresie kontroli dynamicznych własności magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich ujętych w normach przedmiotowych.

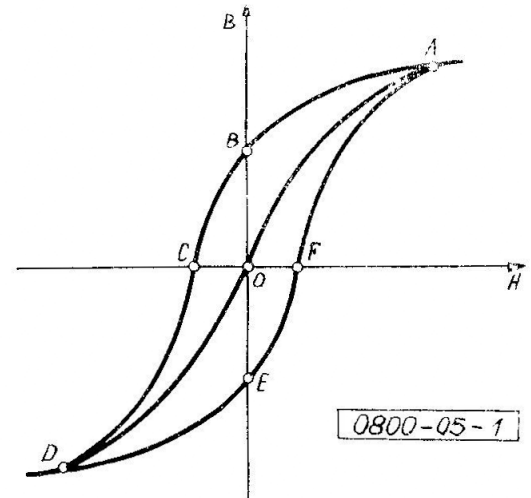
1.3. Określenia podstawowe

1.3.1. Dynamiczna pętla histerezy — krzywa określająca zmianę stanu magnetycznego magneto-wodu w wyniku okresowych zmian natężenia pola magnesującego od dodatniej do ujemnej wartości amplitudy. Powierzchnia zamknięta dynamiczną pętlą histerezy jest proporcjonalna do strat spowodowanych histerezą, prądami wirowymi i opóźnieniem magnetycznym.

Przebieg krzywej uzależniony jest od własności badanego materiału, wymiarów próbki, grubości materiału, z którego wykonano próbki i częstotliwości zmian natężenia pola magnetycznego. Z tych względów jest ona zawsze szersza od statycznej krzywej histerezy. Dynamiczną krzywą histerezy reprezentuje krzywa ABCDEF przedstawiona na rys. 1.

1.3.2. Dynamiczna krzywa indukcji — miejsce geometryczne punktów odpowiadających wierzchołkom dynamicznych pętli histerezy o różnych wartościach indukcji maksymalnej.

Przebieg jej zgodnie z definicją zależy od parametrów wymienionych w 1.3.1. Dynamiczną krzywą indukcji reprezentuje krzywa OA przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Dynamiczna pętla histerezy i dynamiczna krzywa indukcji

1.3.3. Natężenie pola magnesującego. W przypadku pól okresowo zmiennych symetrycznych względem osi czasu natężenie pola magnesującego (H_t) określa się w erstedach ze wzoru

$$H_t = H_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + H_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + H_{5m} \sin(5\omega t + \varphi_5) \quad (1)$$

w którym:

H_{1m}, H_{3m}, H_{5m} — harmoniczne natężenia pola magnetycznego, Oe,

ω — pulsacja, Hz^{-1} ,

t — czas, s,

$\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5$ — kąt przesunięcia fazowego, stopni.

W szczególnym przypadku, gdy materiał jest magnesowany polem o natężeniu sinusoidalnym, natężenie pola magnesującego określa się w erstedach ze wzoru

$$H_t = H_m \sin \omega t \quad (2)$$

w którym: H_m — maksymalna wartość pola magnetycznego, Oe.

Instytut Metali Nieżelaznych

Ustanowiona przez Generalnego Dyrektora Zjednoczenia Górniczo-Hutniczego

Metali Nieżelaznych METALE dnia 12 czerwca 1973 r.

jako norma obowiązująca w zakresie czynności określonych normą

od dnia 1 stycznia 1974 r. (Dz. Norm. i Miar nr 31/1973 poz. 98)

1.3.4. Indukcja magnetyczna. W przypadku gdy przebieg indukcji jest odkształcony względem osi czasu, indukcję magnetyczną (B_t) określa się w teslach ze wzoru

$$B_t = B_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + B_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + B_{5m} \sin(5\omega t + \psi_5) \quad (3)$$

w którym:

B_{1m}, B_{3m}, B_{5m} — harmoniczna indukcji magnetycznej, T,

ψ_1, ψ_3, ψ_5 — kąt przesunięcia fazowego, stopni.

W szczególnym przypadku gdy indukcja jest przebiegiem sinusoidalnym indukcję magnetyczną określa się w teslach ze wzoru

$$B_t = B_m \sin \omega t \quad (4)$$

w którym B_m — maksymalna wartość indukcji magnetycznej, T.

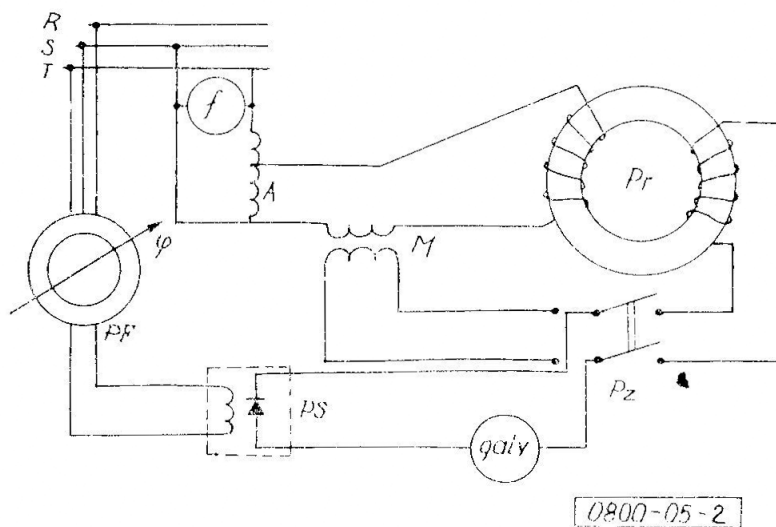
1.3.5. Wzajemna korelacja natężenia pola magnesującego i indukcji magnetycznej. Symetria pętli histerezy sprawia, że jeżeli w przebiegu natężenia pola nie ma parzystych harmonicznych, to nie ma ich także w przebiegu indukcji i odwrotnie.

2. METODA POMIARU

2.1. Zasada pomiaru. Pomiar polega na kolejnym wyznaczaniu odpowiadających sobie wartości chwilowych prądu magnesującego i napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym próbki. Z otrzymanych wartości oblicza się natężenie pola magnesującego i indukcję magnetyczną w próbce. Wartości te naniesione na wykres w układzie współrzędnych B i H tworzą dynamiczną krzywą histerezy. Wierzchołki dynamicznych pętli histerezy uzyskiwanych dla różnych wartości indukcji maksymalnej B_m tworzą dynamiczną krzywą indukcji. Do wyznaczania wartości chwilowych służą przyrządy znane pod nazwą ferrometrów. Wykonywane są one w różnych postaciach.

2.2. Układ pomiarowy

2.2.1. Schemat układu pomiarowego. Układ pomiarowy zależnie od wykonania zawiera szereg elementów połączonych w jedną całość i tworzących jeden zespół. W niektórych wykonaniach poszczególne elementy są oddzielnymi jednostkami łączonymi w układ pomiarowy zależnie od warunków pomiaru. Wszystkie układy ferrometryczne sprowadzić można do schematu zasadniczego przedstawionego na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zasadniczego układu pomiarowego Pr — próbka z dwoma uzwojeniami, M — indukcijność wzajemna służąca do pomiaru chwilowej wartości natężenia prądu magnesującego, A — autotransformator regulacyjny, PF — przesuwnik fazowy, PS — prostownik synchroniczny, $galv$ — galwanometr magnetocelektryczny, Pz — przełącznik rodzaju pomiaru, R, S, T — sieć prądu przemiennego, f — częstotściomierz

2.2.2. Elementy układu pomiarowego. Przyrządy stosowane w układzie pomiarowym muszą spełniać następujące wymagania:

a) Prostownik synchroniczny o błędzie czasu przełączania nie przekraczającym $\pm 1\%$.

b) Galwanometr ze wskaźnikiem świetlnym wyskalowany w wartościach skutecznych o czułości co najmniej $2 \cdot 10^{-8}$ A/dz.

c) Indukcyjność wzajemna o dokładności co najmniej $\pm 0,5\%$ i błędzie fazowym nie większym od $5'$.

d) Przesuwnik fazowy z możliwością regulacji od 0 do 360° .

e) Autotransformator regulacyjny.

f) Częstotściomierz o napięciu zasilającym 380 V i częstotliwości 50 Hz.

2.2.3. Źródło zasilania. Źródłem zasilania jest sieć prądu zmiennego o napięciu 220 V i częstotliwości 50 Hz. Napięcie z sieci podawane jest na autotransformator, który powinien umożliwić dostarczenie układowi pomiarowemu energii elektrycznej potrzebnej do periodycznego przemagnesowania badanych próbek. Źródło powinno umożliwiać pobór mocy od 100 VA do 10 kVA. Regulacja napięcia powinna odbywać się w sposób płynny z możliwością dokładnego ustawienia w wybranym zakresie.

2.2.4. Dokładności pomiaru. Dokładność pomiaru zarówno chwilowej wartości natężenia pola magnesującego jak i indukcji magnetycznej zależy od dokładności pomiaru napięcia w obwodzie wtórnym próbki lub w obwodzie wtórnym indukcijności wzajemnej, dokładności obliczenia ilości nawiniętych zwojów, dokładności wyznaczania

przekroju poprzecznego próbki oraz od dokładności wyznaczenia długości drogi magnetycznej. W procesie przygotowania próbek jak i podczas pomiaru należy przestrzegać, aby suma błędów poszczególnych operacji nie przekroczyła dopuszczalnej wartości $\pm 3\%$.

2.3. Pobieranie i przygotowanie próbek

2.3.1. Kształt próbek. Metodą ferrometryczną można badać wszystkie znane rodzaje próbek o grubości nie przekraczającej 35 mm. W przypadku próbek pierścieniowych składanych z kształtek lub zwijanych z taśm zaleca się stosowanie próbek o następujących wymiarach geometrycznych:

$$d_z = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}; d_w = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}; h = 10^{-2} \text{ m}$$

gdzie:

- d_z — średnica zewnętrzna,
- d_w — średnica wewnętrzna,
- h — grubość próbki.

W przypadku kontroli gotowych magnetowodów dopuszcza się pomiar na próbkach o innych wymiarach. W przypadku magnetowodów składanych z kształtek lub stosowanych stałych cewek pomiarowych w postaci np. aparatu Epsteina dopuszcza się stosowanie próbek wymaganych w każdym z tych przypadków. Odnosi się to głównie do próbek przyjętych w odpowiednich normach przedmiotowych. Poszczególne kształtki lub paski należy odizolować od siebie w celu zmniejszenia do minimum prądów wirowych.

2.3.2. Obróbka cieplna próbek powinna odpowiadać obróbce cieplnej wyrobu. Rodzaj obróbki cieplnej poszczególnych gatunków materiałów określają normy przedmiotowe.

2.3.3. Wyznaczanie średniej długości drogi magnetycznej l_{sr} próbek. Średnią długość drogi magnetycznej z wystarczającą dokładnością wyznacza się w metrach z następujących zależności:

a) próbki w postaci pierścieni toroidalnych i o małych wymiarach geometrycznych

$$l_{sr} = \frac{(d_z + d_w) H}{2} \quad (5)$$

b) próbki w postaci pierścieni toroidalnych i o większych wymiarach geometrycznych ($d_z > 0,05 \text{ m}$)

$$l_{sr} = \frac{(d_z - d_w) H}{\ln \frac{d_z}{d_w}} \quad (6)$$

c) próbki w postaci kwadratowej lub prostokątnej ramy

$$l_{sr} = 4 l_p \quad \text{— dla kwadratowej ramy} \quad (7)$$

gdzie l_p — długość paska, m.

$$l_{sr} = 2 (l_a + l_p) \quad \text{— dla prostokątnej ramy} \quad (8)$$

gdzie:

- l_a — długość paska dłuższego, m,
- l_p — długość paska krótszego, m.

d) magnetowody innego kształtu; długość średniej drogi magnetycznej oblicza się dla każdego typu kształtki oddzielnie z jej wymiarów geometrycznych.

2.3.4. Wyznaczanie powierzchni przekroju poprzecznego próbki. Powierzchnię przekroju poprzecznego próbek w przypadku próbek toroidalnych i ramowych wyznacza się w metrach kwadratowych zgodnie z wzorem (9)

$$S = \frac{m}{l_{sr} \rho} \quad (9)$$

w którym:

- m — masa próbki, kg,
- l_{sr} — średnia długość drogi magnetycznej magnetowodu, m,
- ρ — gęstość materiału, kg/m^3 .

W przypadku magnetowodów składanych z typowych kształtek powierzchnię przekroju poprzecznego rdzenia wyznacza się w metrach kwadratowych ze wzoru

$$S_r = \frac{m a}{S_k \rho} \quad (10)$$

w którym:

- m — masa próbki, kg,
- a — szerokość kolumny roboczej magnetowodu, m,
- S_k — powierzchnia kształtki, m^2 ,
- ρ — gęstość materiału, kg/m^3 .

3. PRZEBIEG POMIARU

3.1. Określenie chwilowej wartości natężenia pola magnesującego. Chwilową wartość natężenia pola magnesującego oblicza się w A/m ze wzoru

$$H_t = \frac{Z_1 i_t}{l_{sr}} = \frac{Z_1 E_{H sr}}{2f l_{sr} M} = a_{H sr} E_{H sr} \quad (11)$$

w którym:

- Z_1 — liczba zwojów uzwojenia magnesującego,
- l_{sr} — średnia długość drogi magnetycznej, m,
- i_t — chwilowa wartość prądu magnesującego, A,
- $E_{H sr}$ — średnia wartość siły elektromotorycznej we wtórnym uzwojeniu indukcyjności wzajemnej, V,
- f — częstotliwość prądu magnesującego, Hz,
- M — wartość współczynnika indukcyjności wzajemnej,
- $a_{H sr}$ — $Z_1/2f l_{sr} M$ stały współczynnik proporcjonalności.

Przy pomiarach seryjnych należy założyć stałą wartość współczynnika a_H , np. równą jakiejś liczbie całkowitej 5, 10, 20 lub 50 i mając długość drogi magnetycznej obliczać liczbę zwojów magnesujących.

3.2. Określenie chwilowej wartości indukcji magnetycznej. Chwilową wartość indukcji magnetycznej należy obliczać w teslach ze wzoru

$$B_t = \frac{E_{B_{sr}}}{2fZ_2S} = a_B E_{B_{sr}} \quad (12)$$

w którym:

$E_{B_{sr}}$ — średnia wartość siły elektromotorycznej wyindukowanej we wtórnym uzwojeniu próbki, V,

f — częstotliwość prądu magnesującego, Hz,

Z_2 — liczba zwojów uzwojenia pomiarowego,

S — powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, m²,

a_B — $1/2fZ_2S$ stały współczynnik proporcjonalności.

Przy pomiarach seryjnych wskazane jest przyjęcie całkowitego współczynnika a_B , np. 1, 2, 5, 10, 50 lub 100, i obliczanie liczby zwojów pomiarowych.

3.3. Wykonanie pomiaru

3.3.1. Warunki pomiaru. Zaleca się prowadzenie pomiaru przy sinusoidalnym przebiegu indukcji. Jednak w przypadkach szczególnych po uzgodnieniu warunków pomiaru między producentem i odbiorcą dopuszcza się prowadzenie pomiarów przy odkształconym przebiegu indukcji. Badania należy przeprowadzać w pomieszczeniach o temperaturze $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Gęstość prądu przepływającego przez uzwojenie magnesujące nie powinna przekraczać wartości, przy której występuje dostrzegalne nagrzewanie drutu nawojowego. W powszechnie spotykanych warunkach wartość ta nie powinna przekraczać $2 \cdot 10^3$ kA/m². Wilgotność względna otaczającego powietrza nie powinna przekraczać 60%. Metodę ferrometryczną można stosować jedynie w badaniach materiałów bez dodatkowego podmagnesowania prądem stałym.

3.3.2. Wyznaczanie dynamicznego przebiegu pętli histerezy. Pomiar przeprowadza się za pomocą układu przedstawionego na rys. 2. Przez uzwojenie próbki Z_1 przepływa prąd zmienny nastawiony za pomocą autotransformatora A . Wytworzony w próbce strumień magnetyczny Φ wy-

wołuje w uzwojeniu Z_2 siłę elektromotoryczną o określonej wartości chwilowej. Równocześnie ten sam prąd przepływając przez pierwotne uzwojenie indukcji wzajemnej wytwarza strumień magnetyczny, który wywołuje powstawanie w uzwojeniu wtórnym siły elektromotorycznej o innej wartości chwilowej. Obie wartości mierzy się za pomocą czułego galwanometru (galv) z prostownikiem synchronicznym PS. Napięcie po stronie wtórnej indukcji wzajemnej jest przesunięte w fazie o 90° względem prądu magnesującego. Podobnie napięcie indukowane we wtórnym uzwojeniu próbki jest opóźnione o 90° względem indukcji w próbce. Mierząc kolejno $E_{H_{sr}}$ i $E_{B_{sr}}$ bez przesuwника fazy prostownika otrzymuje się odpowiadające sobie chwilowe wartości H_t i E_t . Przesuwając kolejno fazę wzbudzenia prostownika od 0 do 180° co określoną ilość stopni mierzy się każdorazowo inne wartości $E_{H_{sr}}$ i $E_{B_{sr}}$. W ten sposób otrzymuje się wartości współrzędnych połówki obiegu dynamicznego. Zmierzone wartości należy notować w zalecanym wzorze zapisu wyników (załączniki 1 i 2). Stanowią one podstawę do obliczeń wartości określonych zgodnie z wzorami (11) i (12).

3.3.3. Wyznaczanie przebiegu dynamicznej krzywej magnesowania. Dynamiczna krzywa magnesowania jest miejscem geometrycznym wierzchołków dynamicznych pętli histerezy o różnych wartościach H_m i odpowiadających im wartościach B_m . W celu zmierzenia tych wartości przesuwnik fazy należy nastawić przy danym prądzie magnesującym tak, aby otrzymać maksymalne wychylenie galwanometru, a więc maksymalną wartość indukcji B_m . Następnie przełączyć przełącznik rodzaju pomiaru w położenie do pomiaru H i określić maksymalną wartość H_m . W ten sam sposób postępuje się przy innych wartościach prądu magnesującego. Po przeprowadzeniu odpowiednich przeliczeń zgodnie z wzorami (11) i (12) otrzymuje się zbiór współrzędnych określających przebieg dynamicznej krzywej magnesowania w postaci $B_m = f(H_m)$.

Błąd pomiaru charakterystyki magnesowania — wg załącznika 3.

3.3.4. Sprawdzenie układu pomiarowego. Sprawdzenie poprawności działania układu pomiarowego należy wykonać zgodnie z założeniami wytwórców aparatury. Okresowe kontrole należy prowadzić za pomocą próbek wzorcowych o dokładnie znanych przebiegach pętli dynamicznej i dynamicznej krzywej magnesowania.

K O N I E C

**ZALECANY WZÓR ZAPISU WYNIKÓW POMIARU WSPÓLRZĘDNYCH
DYNAMICZNEJ PĘTLI HISTEREZY**

Nr próbki		Nr zlecenia			Data pomiaru				
Rodzaj materiału				Obróbka cieplna					
Gęstość $\rho =$ kg/m ³				Długość średniej drogi magnetycznej $l_{sr} =$ m					
Masa próbki $m =$ kg				Powierzchnia czynna przekroju poprzecznego $S =$ m ²					
Liczba zwojów magnesujących $Z_1 =$				Współczynnik proporcjonalności $a_H = Z_1 / 2f l_{sr} M =$					
Liczba zwojów pomiarowych $Z_2 =$				$a_H = 1/2f Z_2 S =$					
Nateżenie prądu magnesującego $I =$ A									
Lp.	φ°	Zakres miernika H	a_H dz	E_{Hsr} V	H_t A/m	Zakres miernika B	a_B dz	E_{Hsr} V	B_t T
1	0								
2	5								
3	10								
4	15								
5	20								
6	25								
7	30								
8	35								
9	40								
10	45								
11	50								
12	55								
13	60								
14	65								
15	70								
16	75								
17	80								
18	85								
19	90								
20	95								
21	100								
22	105								
23	110								
24	115								
25	120								
26	125								
27	130								
28	135								
29	140								
30	145								
31	150								
32	155								
33	180								

**ZALECANY WZÓR ZAPISU WYNIKÓW POMIARU WSPÓLRZĘDNYCH
DYNAMICZNEJ KRZYWEJ INDUKCJI**

Nr próbki		Nr zlecenia			Data pomiaru			
Rodzaj materiału					Obróbka cieplna			
Gęstość $\rho =$ kg/m ³					Długość średniej drogi magnetycznej $l_{sr} =$ m			
Liczba zwojów magnesujących $Z_1 =$					Powierzchnia czynna przekroju poprzecznego $S =$ m ²			
Liczba zwojów pomiarowych $Z_2 =$					Współczynnik proporcjonalności $a_H = Z_1/2fl_{sr}M =$			
					$a_H = 1/2fZ_2S =$			
Lp.	Zakres miernika H	α_H dz	E_{Hsr} V	H_T A/m	Zakres miernika B	α_B dz	E_{Bsr} V	B_m T
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								

BŁĄD POMIARU CHARAKTERYSTYKI MAGNESOWANIA

Błędy pomiaru charakterystyki magnesowania, czyli różnica między krzywą magnesowania wyznaczoną doświadczalnie a krzywą rzeczywiście opisującą własności badanego materiału, są spowodowane przede wszystkim trzema czynnikami:

- błędami popełnionymi podczas przygotowania próbki,
- niedokładnościami pomiaru indukcji i natężenia w próbce,
- uchybami przyrządów i uchybami odczytu popełnianymi przy pomiarze indukcji i natężenia.

W przypadku natężenia pola błąd względny można obliczyć ze wzoru

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{Z_1}{2fl_{sr}M} \left[\left(\Delta E_{Hsr} - E_{Hsr} \right) \frac{1}{f} \Delta f + \frac{1}{l_{sr}} \Delta l_{sr} + \frac{1}{M} \Delta M \right]$$

W przypadku indukcji magnetycznej błąd względny można obliczyć ze wzoru

$$\frac{\Delta B_t}{B_t} = \frac{1}{2fZ_2S} \left[\left(\Delta E_{Bsr} - E_{Bsr} \right) \frac{1}{f} \Delta f + \frac{1}{S} \Delta S \right]$$