

FEROMAGNETICKÁ HYSTERÉZIA

Úlohy:

1. Z nameraných hodnôt magnetickej indukcie a intenzity magnetického poľa zaznamenajte priebeh hysteréznej krivky materiálu.

TEORETICKÝ ÚVOD

Magnetické pole v látke

Niektoré látky vložené do magnetického poľa toto pole ovplyvňujú . Prostredie ovplyvňujúce magnetické pole sa nazýva *magnetikum*. Najjednoduchšie chovanie magnetického poľa je v látkach *paramagnetických*. Sú to látky, ktoré pole mierne zosilňujú.

Elektróny obiehajú podľa modelovej atómovej teórie okolo jadier atómov po približne kruhových dráhach konštantnou plošnou rýchlosťou s veľkou frekvenciou, takže ich môžeme nahradiť prúdovými slučkami s magnetickým momentom \vec{m} . V nezmagnetizovanom stave sú tieto slučky orientované v priestore neusporiadane a ich magnetické polia sa navzájom rušia. Vonkajšie magnetické pole v paramagnetických látkach tieto slučky natočí tak, že ich magnetické momenty majú smer súhlasne rovnobežný s vektorom magnetickej indukcie magnetického poľa. Takto sa vytvoria paralelne usporiadané prúdové slučky (elektrické víry). Môžeme si to schematicky predstaviť ako sústavu veľkého počtu elementárnych solenoidov s polomeri rovnými polomeru elektrónových dráh a osami rovnobežnými so smerom poľa. Každý takýto solenoid vytvára magnetické pole, ktoré je mimo valca v jeho tesnej blízkosti nulové a vo vnútri valca homogénne s indukciou \vec{B}_p , pre ktorú platí

$$\vec{B}_p = \mu_0 j_p \vec{n}_0 \quad (1)$$

kde j_p je hustota líniového prúdu takéhoto elementárneho solenoidu a \vec{n}_0 je jednotkový vektor v osi solenoidu orientovaný v pravotočivom smere vzhľadom k toku prúdu solenoidom. Výsledné magnetické pole je superpozíciou pôvodného poľa a poľa vytvoreného mikroprúdmi v látke. Predpokladajme, že prostredie je magneticky dokonale mäkké (a izotropné), čo znamená že toto pole v látke rastie priamo úmerne s indukciou \vec{B} (indukcia výsledného poľa) a zároveň s ňou vymizne.

$$\vec{B}_p = \kappa_m \vec{B} \quad (2)$$

Bezrozmerná konštanta κ_m charakterizuje magnetické chovanie sa látky a nazýva sa *magnetická susceptibilita*.

Pole \vec{B}_p vzniknuté magnetovaním prostredia sa podľa princípu superpozície skladá s poľom \vec{B}_0 , ktoré by magnetické zdroje vzbudili, keby sa prostredie nezmagnetovalo. Výsledná indukcia je

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_p$$

Po dosadení z (2)

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \kappa_m \vec{B}$$

a z toho

$$\vec{B} = \frac{\vec{B}_0}{1 - \kappa_m}$$

Susceptibilita neferomagnetických látok je omnoho menšia ako jedna, takže môžeme písať

$$\frac{1}{1 - \kappa_m} = \frac{1 + \kappa_m}{1 - \kappa_m^2} \approx 1 + \kappa_m$$

Dostatočne presne potom platí

$$\vec{B} = (1 + \kappa_m) \vec{B}_0 = \mu_r \vec{B}_0$$

kde materiálová konštanta

$$\mu_r = (1 + \kappa_m)$$

sa nazýva *relatívna permeabilita*. Pre vákuum sa rovná jednej. Konštanta

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

je *absolútna permeabilita*.

Vhodné je zaviesť ešte ďalšiu veličinu popisujúcu magnetické pole – *intenzitu magnetického poľa*

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$$

Látky paramagnetické, diamagnetické a feromagnetické

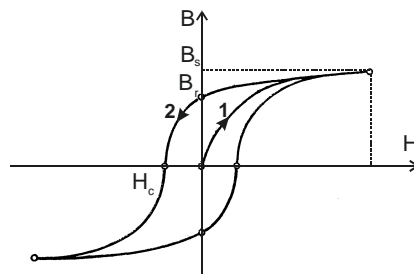
Ak atómy látky majú nenulový magnetický moment, pôsobí na ne vonkajšie magnetické pole usmerňujúcim momentom. Nenulový magnetický moment atómu môže vzniknúť dvojakým spôsobom: buď ako dráhový moment elektrónov pri obehu okolo jadra, ale tiež aj ako moment spinový. *Spinový magnetický moment* je magnetický moment vznikajúci vplyvom rotácie elektrónu. Ak je vonkajšie pole nehomogénne, pôsobí na atómy tiež posuvnou silou, ktorá látku vtáhuje do miest silnejšieho poľa. Látka sa zmagnetizuje súhlasne so smerom poľa, ktoré sa tým zosilní, takže susceptibilita je kladná a relatívna permeabilita je väčšia ako jedna. Látka sa chová ako *paramagnetická* alebo *feromagnetická*.

Aj napriek tomu, že v atónoch všetkých prvkov obiehajú elektróny okolo jadra a okrem toho rotujú okolo vlastnej osi (spin), nemá každý atóm nenulový magnetický moment. U väčšiny prvkov sa totiž vzájomne rušia magnetické momenty elektrónov obiehajúcich po obežných dráhach opačným smerom a tiež momenty spinové tým že dvojice elektrónov rotujú opačným smerom. Na takéto „nemagnetické“ atómy bez magnetického momentu nepôsobí síce magnetické pole výsledným točivým momentom, ale spôsobuje zmeny v obehu jednotlivých elektrónov. Elektrón obiehajúci po obežnej dráhe sa chová ako prudko roztočený zotrvačník, na ktorý pôsobí magnetické pole momentom sily. Za jeho účinku bude zotrvačník vykonávať precesný pohyb, pri ktorom os zotrvačníka opisuje kužeľ. Po takomto kuželi sa bude pohybovať aj spoločná os dvojice elektrónov, ktoré si navzájom rušia magnetické momenty. Vplyvom precesného pohybu vzniká precesný moment, ktorý má opačný smer ako vonkajšie pole. Takáto látka sa nazýva *diamagnetická*. Vonkajšie pole zoslabuje. Susceptibilita diamagnetických látok je záporná a jej hodnoty sú veľmi malé oproti jednej. Relatívna permeabilita je len o málo menšia než jedna.

Zvláštne postavenie medzi magnetikami zaujímajú *feromagnetické látky*, a to ako z hľadiska teoretického, tak aj pre praktický význam. Sú to látky, v ktorých je možné aj dosť slabým magnetickým poľom vzbudiť veľmi silnú magnetizáciu, ktorú si udržujú aj po odstránení vonkajšieho poľa (permanentné magnety). Feromagnetizmus je pozorovateľný u štyroch prvkov – železo, kobalt, nikel, gadolínium, v zliatinách týchto kovov. Okrem toho je pozorovateľný v niektorých zliatinách mangánu s cínom, hliníkom, arzénom, antimónom atď.. Veľký praktický význam majú nekovové feromagnetiká – *ferity*. Sú to polovodivé zlúčeniny železa a kyslíka alebo aj iných prvkov.

Podmienkou feromagnetického stavu je nenulový magnetický moment atómov. Táto podmienka však nie je postačujúca. Druhou podmienkou je existencia tzv. výmenných síl. Vznikajú u atómov, ktorých spinové magnetické momenty sa úplne nerušia. To má za následok vzájomné pôsobenie susedných atómov v kryštálovej mriežke. Tieto sa samy navzájom usmerňujú a udržujú v paralelnom usporiadaní svoje magnetické momenty, a to i napriek existujúcemu tepelnému pohybu.

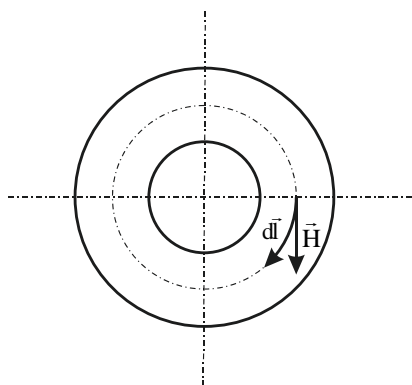
U feromagnetických látok nie je magnetická susceptibilita κ_m a potom ani permeabilita $\mu = \mu_0 \mu_r$ konštantná, a preto závislosť magnetickej indukcie B nie je lineárnou funkciou intenzity poľa H , ale zložitou funkciou, ktorá sa v grafickom zobrazení nazýva *magnetizačná krivka* alebo aj *hysterézná slučka* (Obr.1). Magnetická indukcia B feromagnetických látok pôvodne nezmagnetovaných po ich vložení do magnetického poľa rastie spočiatku podľa krivky **1** (*krivka prvotnej magnetizácie*) až do maximálnej hodnoty B_s (*stav nasýtenia*). Ak sa začne zmenšovať intenzita poľa, magnetická indukcia sa nezmenšuje podľa krivky **1**, ale podľa krivky **2**. Pri nulovej intenzite má pole nenulovú magnetickú indukciu B_r – *remanentnú magnetizáciu*. Aby sa dosiahla nulová magnetizácia je potrebné magnetické pole opačného smeru s hodnotou H_c , ktorá sa nazýva *koercitívna intenzita*. Podľa veľkosti koercitívnej intenzity, t. j. podľa šírky hysteréznej slučky delíme feromagnetické látky na *magneticky mäkké* (malá koercitívna intenzita) a *magneticky tvrdé* (veľká koercitívna intenzita).



Obr.1

PRINCÍP METÓDY

Magnetické pole je generované jednosmerným prúdom tečúcim dvoma cievkami v prstenci z testovaného materiálu, ktorý tvorí jadro. Pre jednoduchosť sa môžeme v priblížení pozeráť na tieto cievky ako na cievku tvaru štíhleho toroidu s N závitmi ktorými tečie prúd I (Obr. 2). Magnetické pole v priereze jadra takejto cievky môžeme považovať za homogénne a intenzita poľa je kolmá na prierez. Ak aplikujeme na takéto pole zákon celkového prúdu, kde integrujeme cez stredný polomer toroidu, dostávame



Obr.2

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

A z toho

$$H = \frac{NI}{L}$$

kde L je dĺžka stredného polomeru toroidu.

V našom prípade môžeme za L považovať dĺžku osi jadra cievok.

$$L = 232 \text{ mm} \quad \text{pre plné jadro}$$

$$L = 244 \text{ mm} \quad \text{pre laminované jadro}$$

$$N = 600$$

V laboratórnej úlohe sa používa meracie zariadenie COBRA 3 od firmy PHYWE. Pretože interface COBRA meria iba napätie, je meranie prúdu realizované meraním úbytku napätia na odpore 10Ω .

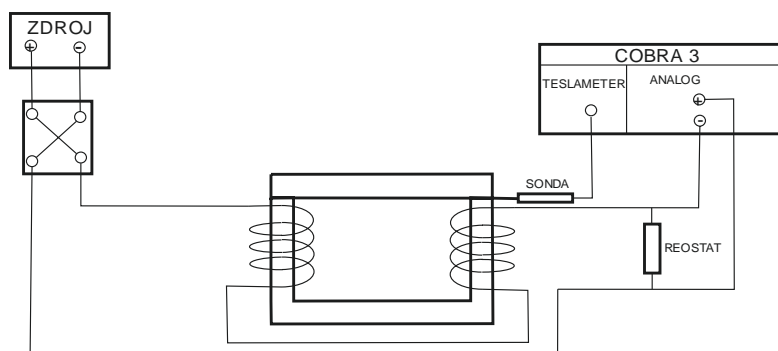
Korelácia medzi intenzitou magnetického poľa a meraným napätím je:

$$H = 258,6 U \quad \text{pre tvrdý materiál (oceľové jadro)}$$

$$H = 245,9 U \quad \text{pre mäkký materiál (laminované jadro)}$$

MERANIE

Usporiadanie experimentu je na obr. 3.



Obr.3

Sondu teslametru umiestnite tak, aby čidlo sondy bolo nad otvorom v jadre. Reostat nastavte na 10Ω . Orientácia indukčných čiar magnetického poľa v jadre sa dá otočiť prepínačom. Meňte túto iba pri prúde tečúcom cievkami $I = 0$, v opačnom prípade sú generované napätové špičky, ktoré môžu

ovplyvní prenos dát. Hodnoty prúdu zvyšujte a následne znižujte po 0,2 A. Pri nulovej hodnote zmeňte polaritu poľa. Nastavenie programu je na nasledovných obrázkoch.

Cobra3 - Force / Tesla <Serial no.: 12345678-515-05945>

Modules
Modul: Flux density B0 S1: no module S2: Current I

Channels
Flux density B0
Current I
User input

Timer / Counter
not connected Angel

X data
Current I

Allocate memory for
100.000 Values

Normal Measurement | Fast Measurement

Start of measurement
 on key press
 time 10:31:19
 if Flux density B0
 bigger smaller 0

End of measurement
 on key press
 time 10:31:19
 after 0 values
 if Flux density B0
 bigger smaller 0

Display
 Digital display 1 Digital display 2
 Digital display 3 Digital display 4
 Analog display 1 Analog display 2
 Diagram 1 Diagram 2

Options...

High precision measurement
 Use high precision measurement

Get value
 on key press
 every 5 s

Continue Cancel

Cobra3 - 01.20/3

Options ✕

Angle / Distance	User input	Calibration
Force	Flux density	Voltage / Current

Preferences Voltage

y Range: Voltage U

Unit: Voltage U

Preferences Current

Resistor Ω

y Range: Current I

Unit: Current I

no averaging

OKCancel

Display options [X]

General | left y-axis | right y-axis

Setup of x-axis

Displayed area: - A/m

Display options

Display crosses
 Hide curve
 Display zero line
 Label x-axis
 Label y-axis

Display x-grid
 Display y-grid

according to left y-axis
 according to right y-axis

OK Cancel Help

Channel modification [X]

Source channel

1: :=

2: :=

Calculate
Cancel
Help

Operation

f :=
 differentiate
 integrate
 progressive average value

Destination channel

add new y-channel
 overwrite

into new measurement
 as x-channel
 as y-channel

Titel:
 Unit:
 Symbol:

