



8. Úloha

Teplotní závislost magnetických vlastností materiálů

Teoretický úvod

V případě použití magnetických materiálů za zvýšených teplot je třeba mít na paměti, že jejich magnetické vlastnosti nejsou s rostoucí teplotou neměnné. V případě feromagnetických materiálů dochází se zvyšující se teplotou k poklesu permeability a tím i ke snižování jejich využitelnosti. Vedle hodnoty remanentní indukce a koerzivní intenzity je tedy jedním z nejdůležitějších parametrů magnetik i tzv. **Curieova teplota**.

Podle velikosti relativní permeability dělíme obecně materiály do tří základních skupin:

- a) diamagnetika ($\mu_r < 1$)
- b) paramagnetika ($\mu_r > 1$)
- c) feromagnetika ($\mu_r \gg 1$)

Paramagnetické látky

Látky, které magnetické pole mírně zesilují. Do této skupiny látek patří např. hliník ($\mu_r = 1,000023$), mangan, chrom a platina. Magnetizace paramagnetik je založena na stáčení magnetických momentů jednotlivých atomů do směru působícího magnetického pole. Magnetismus paramagnetických látek je nepřímo úměrný teplotě, tj. s klesající teplotou se intenzita magnetického pole zvětšuje (obr. 1).

Diamagnetické látky

Látky, které magnetické pole zeslabují. Patří mezi ně např. všechny inertní plyny (He, Ne, Ar atd.), většina organických sloučenin, ale také některé kovy (Cu, Ag, Au, Hg, Bi) a rovněž voda. Diamagnetika po vložení do magnetického pole toto pole zeslabují a jejich magnetické vlastnosti jsou téměř nezávislé na teplotě.

Feromagnetické látky

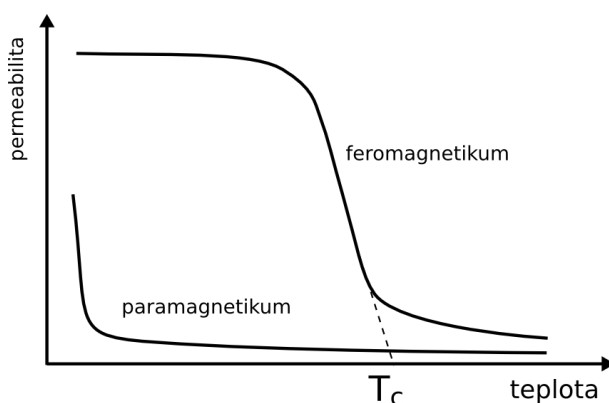
Relativní permeabilita feromagnetických látek je velká (10^2 až 10^5), což znamená, že tyto látky značně zesilují magnetické pole. Feromagnetismus pozorujeme za běžných teplot u čtyř prvků (Fe, Co, Ni, Gd) a u různých slitin těchto kovů. Kromě toho byl ale zjištěn i u několika slitin, jež feromagnetické prvky neobsahují. Příkladem mohou být tzv. Heuslerovy slitiny, což jsou některé slitiny manganu s cínem, hliníkem, arzenem, antimonem, bizmutem nebo borem a mědí (přitom As, Sb, Bi, B a Cu jsou dokonce diamagnetika!).

Na rozdíl od diamagnetismu a paramagnetismu (jevy závislé na atomové struktuře) je feromagnetismus jev, který je závislý na uspořádání atomů (iontů) v krystalické mřížce. Samotné atomy feromagnetických látek jsou paramagnetické. O tom svědčí to, že pokud feromagnetický materiál zahřejeme na určitou teplotu, zvanou *Curieova teplota*, ztrácí skokem



svoje feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou látkou. Při této teplotě totiž dochází k porušení uspořádání atomů v krystalické mřížce a rozpadá se tzv. doménová struktura feromagnetik. Domény jsou mikrooblasti ve feromagnetiku, které se vyznačují spontánní magnetizací shodného směru. Při ochlazení pod Curieovu teplotu se stává odagnetovaným feromagnetikem.

Jak je patrné z obr. 1, klesá v závislosti na teplotě permeabilita nejprve pozvolna, teprve v blízkosti T_c začíná velice strmě klesat teoreticky na nulu (čárkovaný průběh). V praxi se však průběh nule bude blížit asymptoticky, což je způsobeno nehomogenitami a příměsemi v materiálu, které jsou vždy přítomny. Jako Curieova teplota proto bývá udávána hodnota získaná z průsečíku směrnice strmého poklesu křivky s osou teploty (jak je naznačeno v obrázku).



Obr. 1: Schématické znázornění závislosti permeability na teplotě

Jednou z možností měření Curieovy teploty je měření na feromagnetickém vzorku ve tvaru tyče nebo magnetického obvodu, na kterém jsou navinuty 2 cívky: primární, buzená střídavým proudem, a sekundární, do které se indukují napětí dle vztahu

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = -S \cdot N \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

kde Φ je magnetický tok, S plocha uzavřená jedním závitěm, N počet závitů sekundární cívky a B je magnetická indukce. Vzorek se postupně zahřívá. Při překročení Curieovy teploty výrazně klesne permeabilita materiálu jádra, tím i magnetická indukce a velikost naindukovaného napětí.

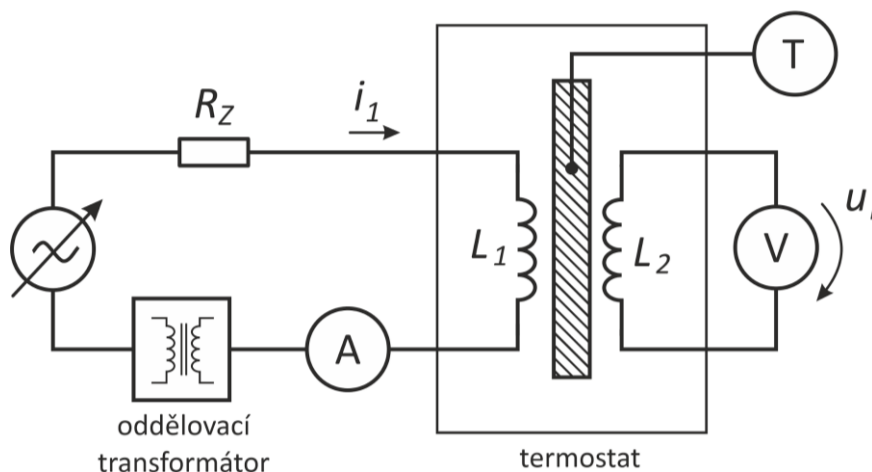
2. Zadání úlohy

1. Změřte teplotní závislost cívky s jádrem ze slitiny MONEL 400 (Ni65/Cu33/Fe2) v teplotním intervalu 10 °C až 50 °C.
2. U získané závislosti proveďte lineární regresi strmě klesající části křivky a určete Curieovu teplotu slitiny MONEL 400.



3. Používané přístroje a další laboratorní vybavení

- autotransformátor
- oddělovací transformátor
- cirkulační termostat
- voltmetr
- ampérmetr
- digitální teploměr



Obr. 2: Schéma zapojení pro měření Curieovy teploty feromagnetika (R_Z - omezovací odpor, i_1 - budicí proud, u_i - naindukované napětí, L_1 - budicí cívka, L_2 - měřicí cívka, T - senzor teploty, V voltmetr, A - ampérmetr)

4. Postup měření

1. Spustíte cirkulační termostat a pomocí tlačítek na ovládacím panelu nastavíte hodnotu požadované teploty na 10 °C.
2. Protože slitina MONEL 400 má Curieovu teplotu v blízkosti běžné laboratorní teploty, je před měřením soustava cívek s jádrem s MONELU umístěna v mrazáku. Proved'te tedy zapojení většiny měřicího obvodu dle schématu na obr. 2 bez připojení cívek. Ty budou připojeny těsně před začátkem měření.
3. Od vyučujícího obdržíte cívku s jádrem v polystyrenovém boxu s ledem. Do jádra je vsunuta teplotní sonda termoelektrického článku pro měření jeho teploty.
4. Připojte termoelektrický článek na vstup digitálního teploměru, vodiče budicího vinutí (červené) a vodiče měřicího vinutí (černé) připojte k obvodu dle schématu (obr. 2).



5. Cívku s monelovým jádrem vložte do igelitového sáčku a stáhněte ho stahovací páskou. Sáček pomocí lepicí pásky přichyťte k horní hraně nádrže termostatu.
6. Připravený obvod si nechte zkontrolovat vyučujícím.
7. Zapněte autotransformátor a nastavte proud obvodem na konstantní hodnotu 100 mA (velikost proudu se bude v průběhu měření měnit, proto je třeba ji pomocí napětí autotransformátoru doladit).
8. Po ustálení teploty jádra na hodnotě 10 °C odečtěte hodnotu indukovaného napětí v měřicí cívice.
9. Na termostatu nastavte teplotu na 65 °C a začněte s ohřevem vodní lázně.
10. Zaznamenejte průběh indukovaného napětí při konstantním proudu 100 mA v teplotním rozsahu 10 °C až 50 °C s krokem 2 °C (tzn. pro teploty 10, 12, 14 °C atd.). Řiďte se teplotou jádra na digitálním teploměru.
11. Z naměřených hodnot vytvořte graf závislosti $U = f(T)$. V grafu najděte oblast strmého lineárního poklesu napětí, na které proveďte lineární regresi a zjistěte rovnici získané přímky. Z ní poté určete hodnotu Curieovy teploty T_c jako průsečík regresní přímky s osou teploty.
Pozn.: Protože MS Excel neumí proložit lineární spojnicí trendu jen část dat křivky, je nejjednodušší cestou vložit požadovaná data do nového grafu a tak spojnicí proložit jen požadovaný úsek.