

Paramagnetna jekla

Paramagnetic Steels

F. Grešovnik, Železarna Ravne, Ravne na Koroškem

Opisane so značilnosti magnetizma pri paramagnetnih materialih. Glavna izmed njih je majhna permeabilnost; relativna permeabilnost je le malo nad 1. V elektromagnetnih strojih zato taki materiali preprečujejo vzporeden tok magnetnih silnic.

V nekaterih primerih uporabe paramagnetnih materialov se zahteva neka minimalna trdnost, kar izpolnjujejo paramagnetna jekla. Imajo austenitno strukturo. Kot primer je obravnavano jeklo z 19% Mn, 13% Cr in dodatkom N.

Kontrola takih jekel obvezno zajema merjenje permeabilnosti, ki je podrobno opisano — vključno z umerjanjem potrebne aparature.

Ključne besede: paramagnetna jekla, permeabilnost, mehanske lastnosti

Characteristics of magnetism in paramagnetic materials are described. The most important one is the low permeability; the relative permeability is only slightly above 1. Such materials prevent the parallel flow of magnetic force lines in electromagnetic appliances.

In some cases of applying the paramagnetic materials certain minimal strength is required; which is fulfilled in the case of paramagnetic steels. They have austenitic structure. As an example, steel with 19% Mn, 13%Cr, and addition of N is considered.

The control of such steels obviously includes the measurement of permeability which is described in details — together with the calibration of the equipment.

Key words: paramagnetic steels, permeability, mechanical properties

1 Uvod

Magnetno polje opišemo z dvema vektorjema: magnetno poljsko jakostjo \mathbf{H} in magnetno poljsko gostoto (indukcijo) \mathbf{B} . Prvi vektor je odvisen od razporeditve električnih tokov v prostoru. Magnetna poljska gostota je v praznem prostoru povezana z magnetno poljsko jakostjo preko induksijske konstante μ_0 :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1)$$

Vpliv snovi na magnetno poljsko gostoto popišemo s faktorjem μ , ki se imenuje permeabilnost.

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2)$$

\mathbf{M} imenujemo magnetizacija, to je volumska gostota magnetnih momentov \mathbf{p} sestavnih delov snovi. $\mu_0 \mathbf{M}$ je prispevek snovi k magnetni poljski gostoti in je enak

$$\mu_0 \mathbf{M} = (\mu - 1) \mu_0 \mathbf{H} = \kappa \mu_0 \mathbf{H} \quad (3)$$

κ imenujemo susceptibilnost. V splošnem je to tenzorska količina, tako da \mathbf{M} in \mathbf{H} nista nujno kolinearna. Magnetni momenti \mathbf{p} so ob odsotnosti magnetnega polja pri večini snovi naključno orientirani in ne dajejo prispevka k magnetni poljski gostoti. Ob prisotnosti magnetnega polja pa med \mathbf{p} in \mathbf{H} vpeljemo zvezo s polarizabilnostjo α

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{H} \quad (4)$$

in velja

$$\mathbf{M} = n \alpha \mathbf{H} \quad (5)$$

n je številčna gostota delcev z magnetnim momentom. Iz (3) in (5) sledi

$$\mu = 1 + n \alpha \quad (6)$$

Glede na velikost susceptibilnosti razdelimo snovi na

- diamagnetne: $-1 \ll \kappa < 0$
- paramagnetne: $0 < \kappa \ll 1$
- feromagnetne: $\kappa \gg 0$

2 Značilnosti paramagnetnih kovin

Na magnetne lastnosti snovi vplivajo poleg značilnosti osnovnih gradnikov snovi še njihova medsebojna razporeditev; jekla, ki so zgrajena pretežno iz železovih atomov, so lahko pri sobni temperaturi glede na kristalno mrežo tako feromagnetna kot tudi paramagnetna. Elementarni magnetni momenti so tokovne zanke, te pa nastanejo bodisi zaradi tirnega gibanja nabitih delcev ali pa zaradi spinskega gibanja delcev. Proučevanje magnetizma snovi je skoncentrirano predvsem na raziskave orientacijske porazdelitve elementarnih magnetnih momentov.

Glavni pojavi, ki prispevajo k magnetizaciji paramagnetnih kovin, so:

- *Larmourjeva precesija*, ki nastane zaradi navora na magnetni moment tirno gibajočih se elektronov in predstavlja dodatno inducirani magnetni moment, ki je antiparalelen zunanjemu magnetnemu polju. V diamagnetnih snoveh je to bistven pojav, v paramagnetnih pa le majhen

negativen dodatek k ostalim prispevkom. Njegova vrednost je¹

$$\mathbf{M}_L = - \left(\frac{ne^2\mu_0}{6m} \sum_{i=1}^Z \overline{r_i^2} \right) \mathbf{H} \quad (7)$$

e je osnovni naboj elektrona, m njegova masa in $\overline{r_i^2}$ poprečni kvadrat polmera tira i -tega elektrona v atomu z vrstnim številom Z .

- *Konstantni magnetni momenti atomov (ionov) \mathbf{p}_a* , ki pa imajo zaradi termičnega gibanja izotropno porazdelitev orientacij, če ni zunanjšega magnetnega polja in zato v tem primeru ne dajejo rezultirajočega prispevka k magnetizaciji. Ko vključimo zunanje magnetno polje, dobimo

$$\mathbf{M} = n\mathbf{p}_a L(x) \quad (8)$$

kjer je

$$x = \frac{\mu_0 p_a H}{kT}$$

k je Boltzmannova konstanta, T pa absolutna temperatura, $L(x)$ je Langevinova funkcija; pri majhnih argumentih je enaka $\frac{x}{3}$ in velja

$$\mathbf{M}_m = \frac{np_a^2\mu_0}{3kT} \mathbf{H} \quad (9)$$

- *V kovinah je pomemben še prispevek prostih elektronov.* Zaradi spina $\frac{1}{2}$ imajo v magnetnem polju dve stacionarni stanji z energijama

$$W(1/2) = -\mu_B\mu_0 H$$

in

$$W(-1/2) = \mu_B\mu_0 H$$

μ_B je magnetni moment elektrona (Bohrov magneton).

Prvotno simetrična porazdelitev elektronov po energiji postane nesimetrična (slika 1); del elektronov s projekcijo spina $-\frac{1}{2}$ se preorientira v projekcijo $\frac{1}{2}$, saj energije segajo le do Fermijevega nivoja E_F . K magnetizaciji prispeva razlika med številsko gostoto elektronov s projekcijo spina $\frac{1}{2}$ in $-\frac{1}{2}$, to je

$$n(1/2) - n(-1/2) = 2 \frac{dn}{dE}(E_F)\mu_B\mu_0 H$$

Prispevek k magnetizaciji je

$$\mathbf{M}_e = \mu_B(n(1/2) - n(-1/2)) = 2 \frac{dn}{dE}(E_F)\mu_B^2\mu_0 \mathbf{H} \quad (10)$$

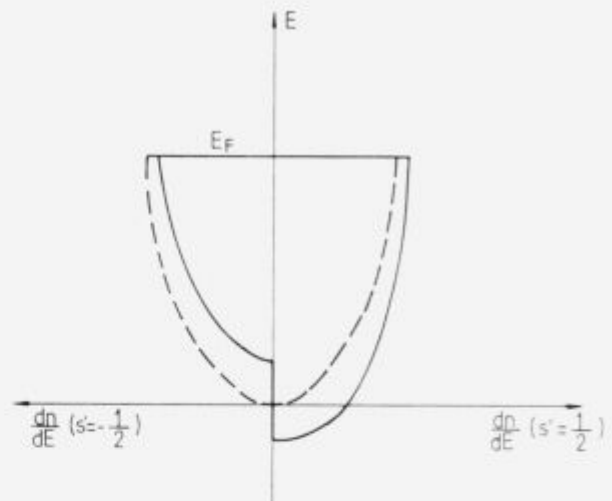
Vidimo, da so vsi trije prispevki k magnetizaciji sorazmerni z magnetno poljsko jakostjo. Magnetilna krivulja paramagnetnih snovi je torej premica. Tu ne srečamo pojava histerese.

Drugi prispevek je obratno sorazmeren z absolutno temperaturo, prvi in tretji pa sta neodvisna od temperature.

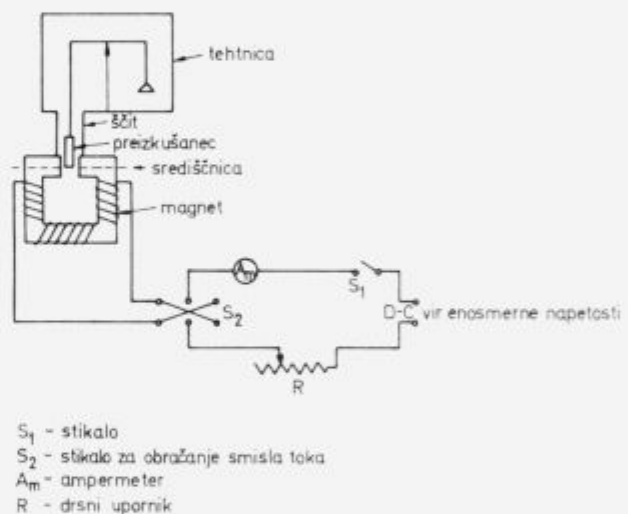
3 Merjenje permeabilnosti paramagnetnih kovin

Permeabilnost paramagnetnih materialov, ki imajo

$$1 < \mu < 1.05$$



Slika 1. Porazdelitev prostih elektronov po energiji pri izključenem magnetnem polju - - - - - vključenem magnetnem polju —
Figure 1. Distribution of free electrons according to their energy, at the switched-on magnetic field - - - - - switched-off magnetic field —



Slika 2. Skica merilnika permeabilnosti.
Figure 2. Scheme of the permeability measuring equipment.

določimo z merilno opremo, ki je shematsko prikazana na sliki 2. Metoda je standardizirana².

Dokler v reži elektromagneta ni vzorca z volumnom V , je energija magnetnega polja na tistem mestu

$$W'_m = \int_0^V \frac{1}{2} \mu_0 H^2 dV \quad (11)$$

ker je permeabilnost zraka praktično 1. Ko vstavimo v magnetno polje vzorec s permeabilnostjo μ , je energija magnetnega polja na tistem mestu

$$W''_m = \int_0^V \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 dV \quad (12)$$

Energija se torej spremeni za

$$\Delta W_m = W_m'' - W_m' = \int_0^V \frac{1}{2}(\mu - 1)\mu_0 H^2 dV \quad (13)$$

Ta zapis velja, če prisotnost vzorca ne popači prvotnega magnetnega polja.

Gradient spremembe energije določa silo, s katero nehomogeno magnetno polje privlači vzorec. Ker je

$$dV = S dx$$

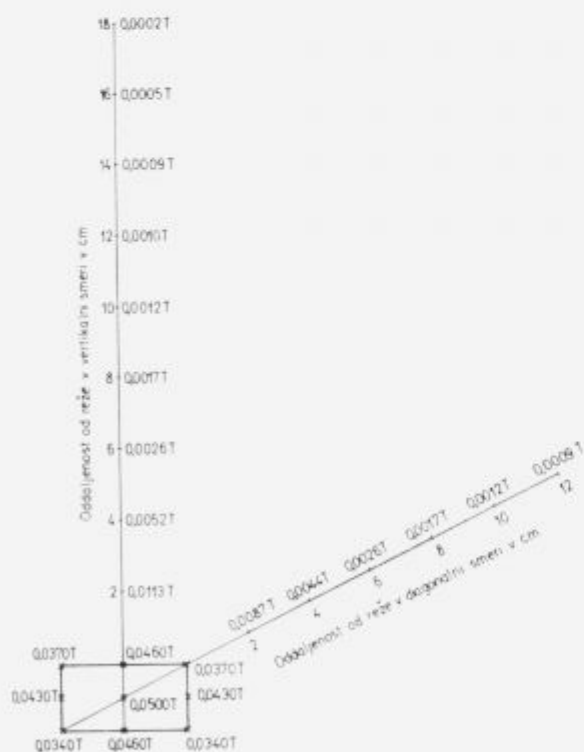
kjer je S konstanten prečni prerez vzorca, dx pa premik v smeri osi vzorca, dobimo

$$F = \text{grad } \Delta W_m = \frac{1}{2}(\mu - 1)\mu_0 H_0^2 S \quad (14)$$

H_0 je magnetna poljska jakost na mestu spodnje osnovne ploskve vzorca, to je v centru simetrije reže elektromagneta. Vzorec mora biti dovolj dolg, da je njegova zgornja osnovna ploskev že praktično izven magnetnega polja (slika 3). Iz (14) neposredno sledi

$$\mu = 1 + \frac{2F}{\mu_0 H_0^2 S} \quad (15)$$

Silo F stehamo.



Slika 3. Porazdelitev magnetne poljske gostote v ravnini, ki gre skozi center simetrije reže in je pravokotna na centralno magnetno silnico; tok skozi navitje elektromagneta je 2.9 A.

Figure 3. Variation of magnetic flux density in the plane passing through the gap centre of the symmetry and being normal to the central magnetic force line; current through the electromagnet coil is 2.9 A.

Magnetno poljsko jakost H_0 izmerimo s pomočjo umeritvene tuljavnice brez jedra, ki jo priključimo na balistični galvanometer. Pri balističnem galvanometru deluje na vrtljivi del, ki je v bistvu tuljava, navor z absolutno vrednostjo

$$M = |\mathbf{p}_m \times \mathbf{B}_m| = IS_1 N_1 B_m \quad (16)$$

I je električni tok, ki teče po navitju tuljave, N_1 je število ovojev tuljave galvanometra, en ovoj pa ima ploščino S_1 . Zaradi posebej oblikovanega magneta je med magnetnim momentom \mathbf{p}_m in magnetnim poljem z gostoto \mathbf{B}_m vedno pravi kot.

Pri kratkotrajnem toku deluje sunek navora

$$\int_0^{\tau} M dt = S_1 N_1 B_m \int_0^{\tau} I dt = J \omega_{max} = J \varphi_0 \Omega \quad (17)$$

J je vztrajnostni moment vrtljivega dela galvanometra, ω_{max} je kotna hitrost vrtljivega dela ob prenehanju delovanja navora, φ_0 je kotna amplituda, za katero zaniha vrtljivi del galvanometra, katerega lastna krožna frekvenca je Ω .

$$\int_0^{\tau} I dt = \frac{J \Omega}{S_1 N_1 B_m} \varphi_0 = D \varphi_0 \quad (18)$$

Konstanto D je najlažje določiti tako, da skozi galvanometer pošljemo znani naboj e_C iz kondenzatorja z znano kapaciteto C , ki ga napolnimo z dano napetostjo U .

$$\int_0^{\tau} I dt = e_C = CU$$

$$D = \frac{\int_0^{\tau} I dt}{\varphi_0} = \frac{CU}{\varphi_0}$$

Inducirana napetost na umeritveni tuljavnici je

$$U_i = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \frac{d(BS_2)}{dt} = N_2 S_2 \frac{dB}{dt}$$

S separacijo spremenljivk in integracijo dobimo sunek napetosti

$$\int_0^{\tau} U_i dt = N_2 S_2 (B_k - B_z) = R_n \int_0^{\tau} I dt \quad (19)$$

Če vklopimo ali izklopimo tok skozi navitje elektromagneta, je

$$|B_k - B_z| = B_{e.m.}$$

Na ta način lahko izmerimo magnetno poljsko gostoto $B_{e.m.}$ v reži elektromagneta. N_2 je število ovojev umeritvene tuljavnice, pri kateri ima posamezna zanka ploščino S_2 . R_n je vsota uporov balističnega galvanometra in umeritvene tuljavnice. Med $B_{e.m.}$ in $H_{e.m.}$ velja zveza (1).

4 Paramagnetno jeklo 19Mn13Cr0,3N

Jeklo 19Mn13Cr0,3N je izboljšana modifikacija jekla X5CrMn 13 18 (W.Nr. 1.3949). Poskusno šaržo smo izdelali v 30-kilogramski indukcijski peči in je imela sledečo sestavo v mas. %:

C	S	Si	Cr	Ni	Al	Cu	Mn	Mo	P	N
0.03	0.008	0.40	13.58	1.02	0.013	0.06	18.7	0.50	0.008	0.30

Ingot, ki je imel presek kv. 100 mm, je bil v temperaturnem intervalu od 1100 do 900°C prekovan v palico Φ 30 mm. Površina je bila brez razpok, prav tako tudi na jedkalni plošči ni bilo opaziti nobenih napak. Za jedkanje je potrebno uporabiti zlatotopko, kar kaže na precejšnjo korozijsko odpornost. Mehanska obdelava tega jekla je nekoliko lažja kot pri Hadfieldsovih jeklih z 12% Mn.

Rentgenska strukturna analiza je pokazala, da ima jeklo 19Mn13Cr0,3N že v surovem stanju čisto austenitno strukturo. Trdota je od 245 HB na sredini palice do 295 HB na površini. Velikost zrna je od 7 do 8 po ASTM E112.

Po gašenju s temperature 1000°C (1 uro) trdota pade na 210 HB in postane enakomerna po preseku. Zrno zraste na 5 do 7. Gostota je 7.80 g/cm³. Mehanske lastnosti so sledeče: $R_{p0,2} = 410 \frac{N}{mm^2}$, $R_m = 720 \frac{N}{mm^2}$, $A_5 = 52\%$, $Z = 70\%$, žil. delo DVM = 160 J.

Permeabilnost smo izmerili pri dveh magnetnih poljskih jakostih:

$$\text{pri } H = 22500 A/m \text{ je } \mu = 1.0024$$

$$\text{pri } H = 40000 A/m \text{ je } \mu = 1.0025$$

Ujemanje je vsekakor v okviru natančnosti metode (8%) in kaže na to, da se jeklo 19Mn13Cr0,3N res obnaša kot paramagnetni material.

5 Uporaba paramagnetnih jekel

Paramagnetni materiali imajo v magnetnih napravah podobno vlogo kot izolacijski materiali pri tokovodnikih. Zavirajo magnetni pretok Φ_m

$$\Phi_m = \frac{\Theta_m}{R_m} \quad (20)$$

kjer je Θ_m magnetna napetost

$$\Theta_m = NI$$

R_m pa magnetni upor

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$$

l je dolžina vodnika magnetnih silnic, S pa njegov presek.

Vidimo, da ima permeabilnost za magnetni pretok podobno vlogo kot električna prevodnost za električni tok.

Če mora imeti material, ki služi kot velik magnetni upor, hkrati še veliko mehansko trdnost, so paramagnetna jekla prava rešitev za konstrukterja magnetne naprave.

6 Literatura

- ¹ B.M. Javorskii, A.A. Detlaf: Spravočnik po fizike, Nauka, Moskva 1965
- ² ASTM A342-64: Standardne preizkusne metode za določanje permeabilnosti slabo magnetnih materialov