

Mágneses anyagok

Dr. Szabó Péter János
szpj@eik.bme.hu

Elektronikai anyagtudomány
BMEVIETAA01
2022/2023/2

MÁGNESES TÉR $\Leftrightarrow$ ANYAG KÖLCÖNTHATÁS LEÍRÁSA

$$\overline{B} = \mu \overline{H}$$

$$\overline{B} = \mu_0 \mu_r \overline{H} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M})$$

$$\overline{M} = \kappa \overline{H} = \frac{1}{V} \sum \overline{P}_i = \frac{1}{V} \overline{P}$$

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

H: az anyagra ható külső mágneses
térerősség

B: az anyagnak a külső tér hatására adott
válasza, a mágneses indukció

M: az anyagban a külső tér hatására
ébredő mágnesezettség

P: az anyagban lévő elemi mágneses
momentum

μ : mágneses permeabilitás

κ : mágneses szuszceptibilitás
(érzékenység)

MÁGNESEZETTSÉG

Spin: az elektron perdületét jellemző kvantummechanikai mennyiség. Elektronokra az értéke $+1/2$ vagy $-1/2$ lehet.

Elemi mágneses momentum: az elektronok mozgásából (elsősorban a perdületükből) származó elemi mágneses tér, „elemi rúd-mágnes”, melynek van északi és déli pólusa is.

Mágnesezettség: az anyagban lévő elemi mágneses momentumok vektori eredője.

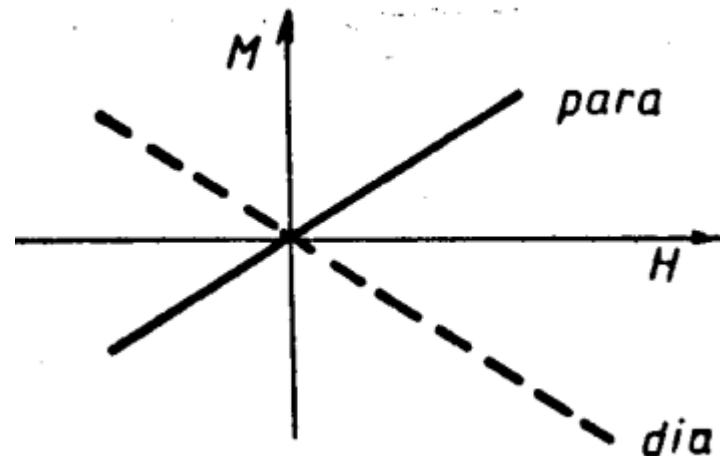
MÁGNESES ANYAGOK CSOPORTOSÍTÁSA

1. Gyengén mágneses anyagok

Diamágnes: nincs benne spontán mágneses momentum, de külső mágneses tér hatására létrejön a térrel ellentétes irányban. $\kappa < 0$ ($\approx 10^{-5}$). (Pl. Si, Cu, Zn, Ag, Cd, Au...)

Paramágnes: vannak benne elemi mágneses momentumok, de rendezetlenül mozognak. Külső mágneses tér hatására a tér irányába állnak be. $\kappa > 0$ ($10^{-3} - 10^{-5}$)
(Mg, Al, Ti, W...)

Mágnesezési „görbék”
lineárisak:



MÁGNESES ANYAGOK CSOPORTOSÍTÁSA

2. Rendezett mágneses szerkezetű anyagok

Spontán létrejönnek benne elemi mágneses momentumok, amelyek adott térrészletben, az ún. „domén”-ben maguktól egy irányba állnak. Az egyes domének mágnesezettségi iránya azonban statisztikusan rendezetlenül áll, így az anyag makroszkópicusan nem mágneses.

Külső mágneses tér hatására a domének elemi mágneses momentumai egy irányba fordulnak, és úgy is maradnak a tér megszüntetése után is.

Maradó mágnesezettségű lesz az anyag, ezeket hívjuk klasszikus értelemben „mágnes”-nek.

MÁGNESES ANYAGOK CSOPORTOSÍTÁSA

Kicserélődési energia: két elektron között a Coulomb energián kívül fellépő, a spinállástól függő energiajárulék. Csak kvantummechanikailag értelmezhető. Felelős a momentumok párhuzamosra fordításáért a doménen belül.

Ferro ↑↑↑↑ (Fe, Co, Ni, Gd), ötvözetek, Heussler (Mn, Cr)

A momentumok azonos nagyságúak és állásúak.

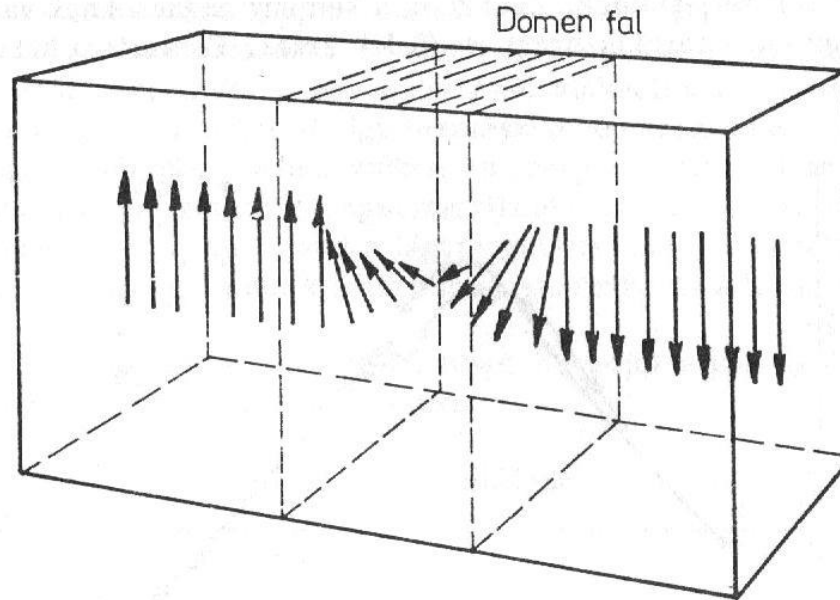
Antiferro ↑↓↑↓ (Cr, Mn)

A momentumok azonos nagyságúak, de páronként ellentétes irányúak

Ferri ↑↓↑↓ (Fe₃O₄, CrO₂, ErO ...)

A momentumok nem azonos nagyságúak, és páronként ellenkező irányban állnak.

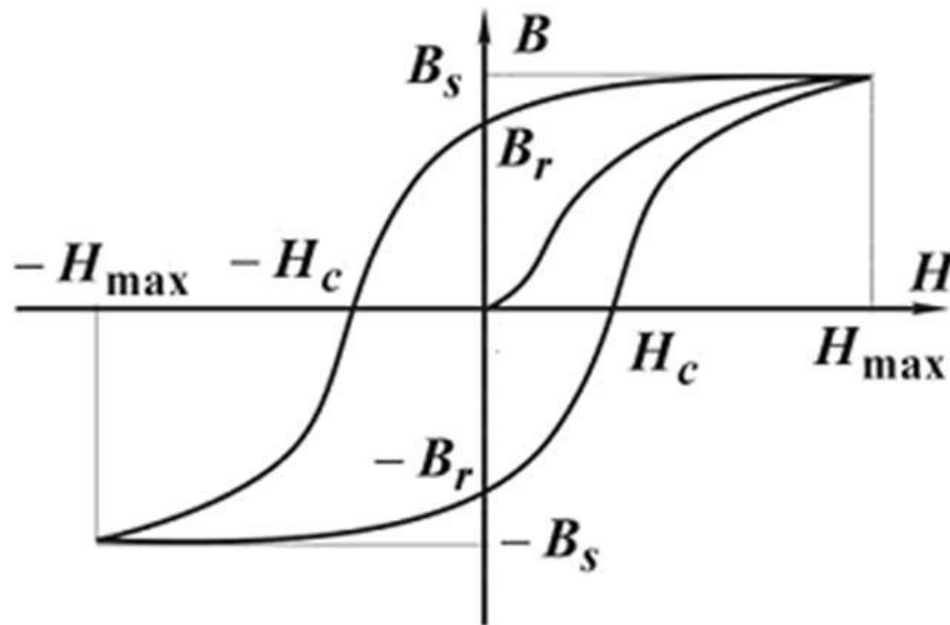
DOMÉN - DOMÉNFA



A doméneket elválasztó határ egy véges térfogat, a doménfal, amelyen belül a momentumok átfordulnak.

Kicserélődési kölcsönhatás => párhuzamos momentum beállítás

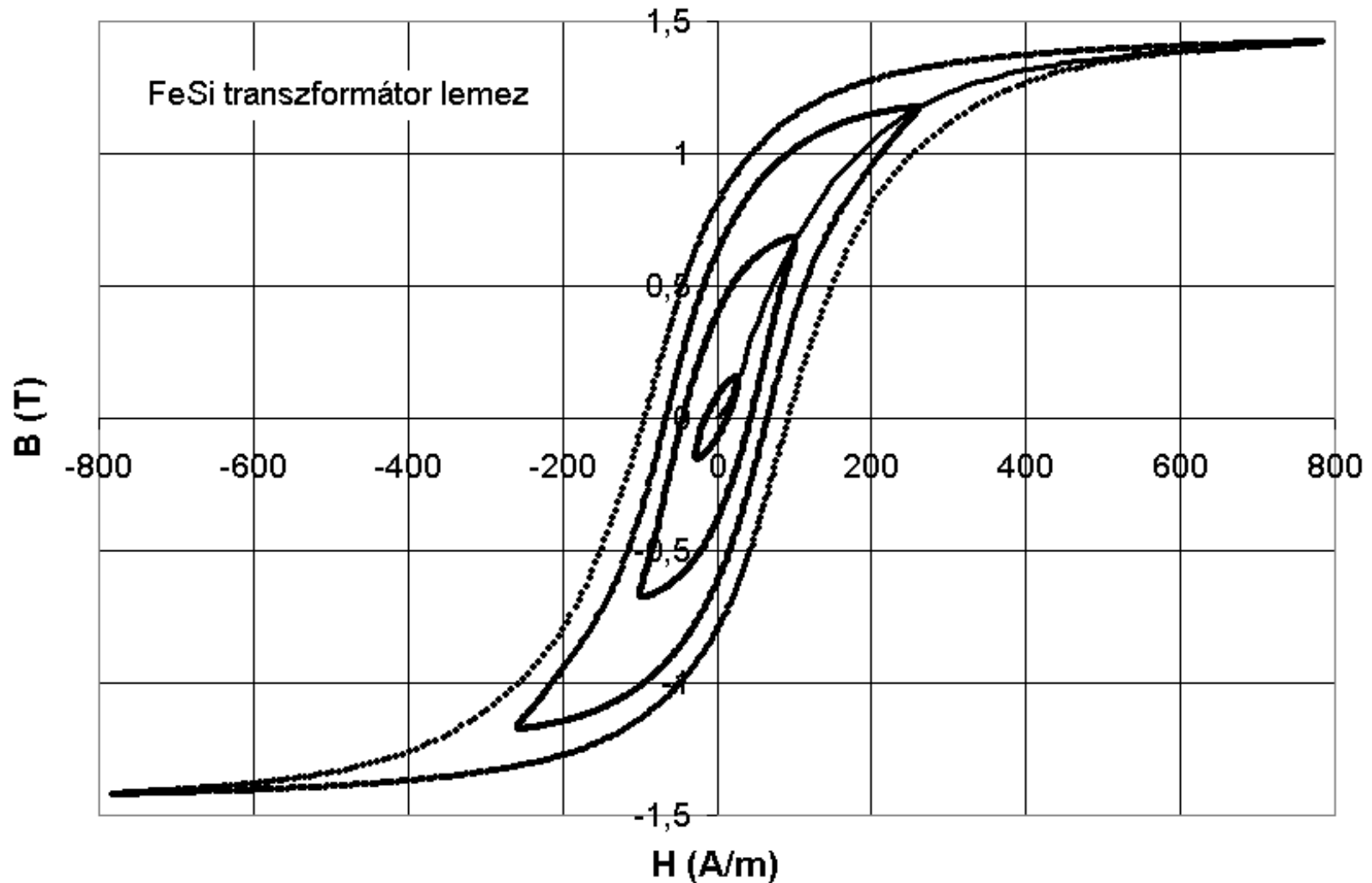
HISZTERÉZIS GÖRBÉBŐL SZÁRMAZTATOTT JELLEMZŐK



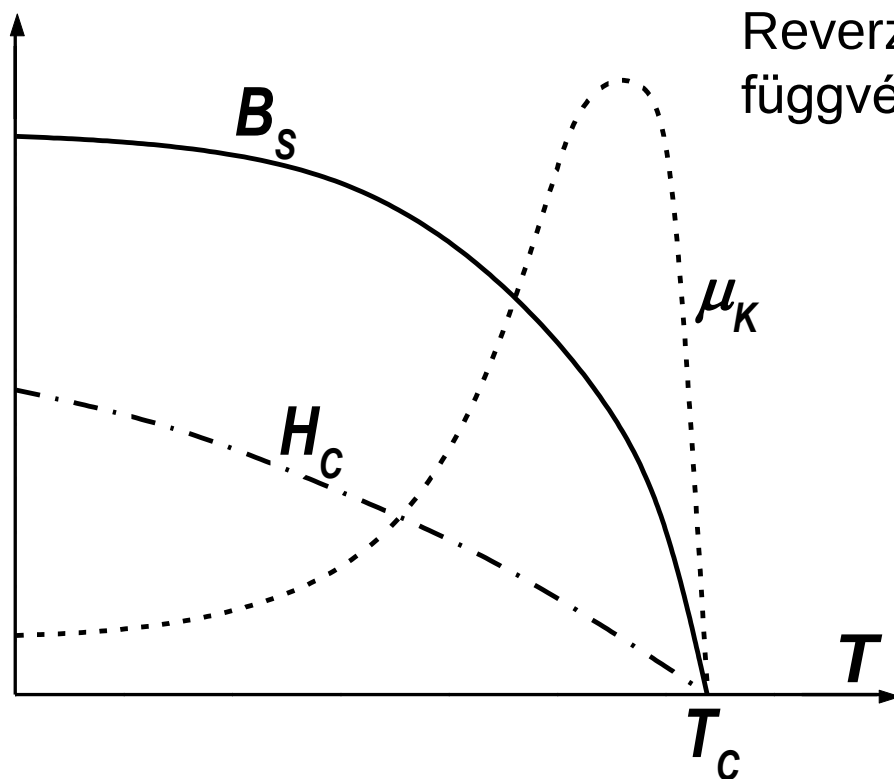
Első mágnesezési (szűz) görbe
 $B(H)$ hiszterézis görbék
Telítési indukció (B_s)
Remanens indukció (B_R)
Koercitív erő (H_c)
Permeabilitás (μ_r)
Jósági szám $(BH)_{max}$
Négyszögletességi tényező B_R/B_S

KLASSZIKUS MÁGNESES JELLEMZŐK

A dinamikus középgörbe származtatása a histerézis hurkok sorozatából



HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉS (FERROMÁGNES)

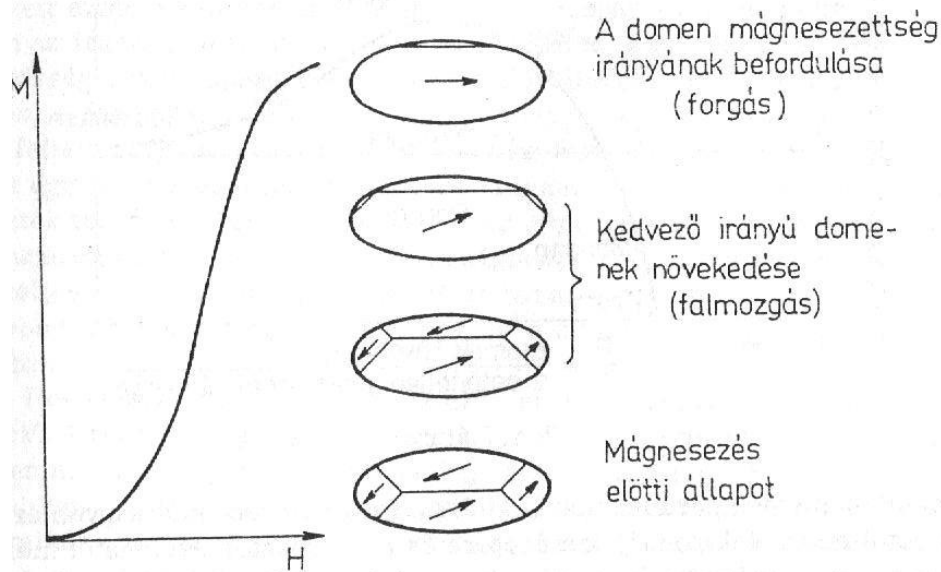


Curie hőmérsékletek

Fe	1043 K
Co	1388 K
Ni	627 K

Curie-hőmérséklet: az a hőmérséklet, ahol a ferromágneses anyag paramágnesessé változik.

AZ ÁTMÁGNESEZŐDÉSI FOLYAMAT KINETIKÁJA



Falmozgás: a külső térerősséggel nagyjából megegyező irányú domének növekedése doménfal-mozgással

Forgás: a doménfal-mozgás már túl nagy energiát igényel, így inkább a momentumok fordulnak be a külső tér irányába.

Mágnes tulajdonságok változtatásának lehetőségei

A műszaki alkalmazások
lággy és keménymágneses anyagai

MÁGNESES ANYAGOK CSOPORTOSÍTÁSA MŰSZAKI SZEMPONTBÓL:

Lágy

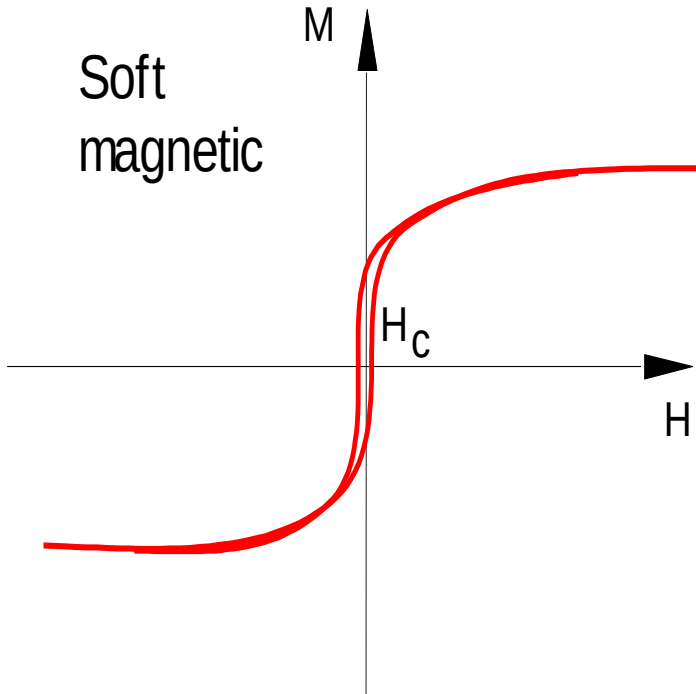
$$H_c < 1 \text{ A/cm}$$

Félkemény

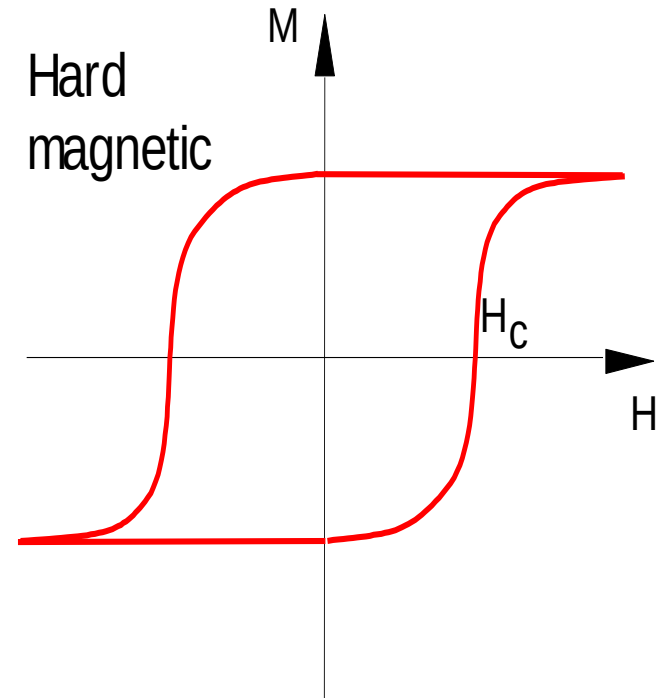
Kemény

$$H_c > 400 \text{ A/cm}$$

LÁGY- ÉS KEMÉNYMÁGNESES ANYAGOK



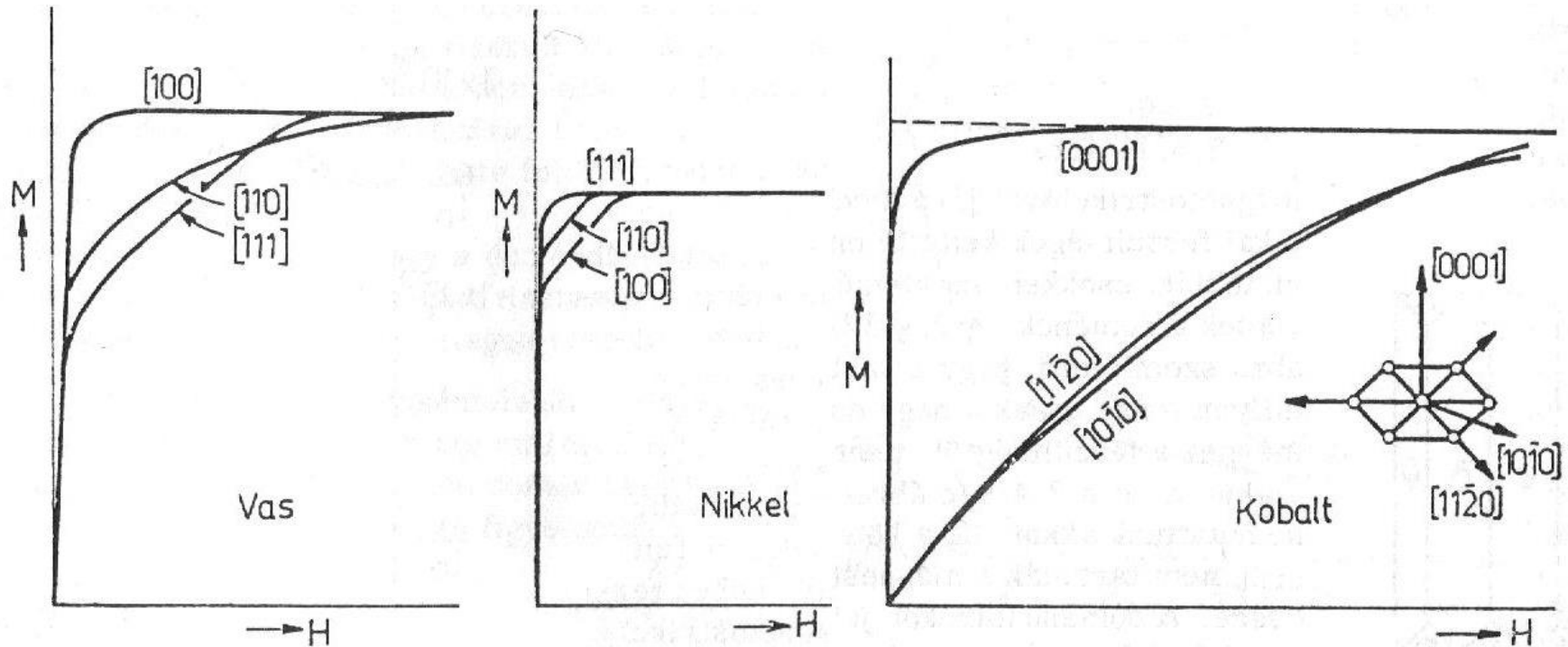
$$H_C = 0.01 - 1 \text{ A/cm}$$



$$H_C = 400 - 7000 \text{ A/cm}$$

MÁGNESES ANIZOTRÓPIA (ENERGIA)

Könnyű és nehéz mágnesezési irányok: az egyes kristálytani irányokban nem azonos energiával lehet az anyagot átmágnesezni.



LÁGYMÁGNESEK JELLEGZETES FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEI

Elektromechanikus eszközök:

Emelő, mozgató mágnesek, relék, mágneskapcsolók

Elektromágneses indukció alapján működő eszközök:

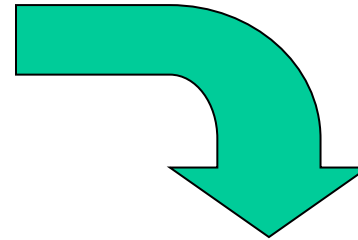
Transzformátorok, fojtók, generátorok, motorok, leválasztó elemek

Mágnestér árnyékolások

Fluxusvezető elemek

FELHASZNÁLÓI IGÉNYEK A LÁGYMÁGNESES ANYAGOKNÁL

B_M	Nagy
μ	Nagy
H_C	Kicsi
Fajlagos ellenállás	Nagy
Curie-hőmérséklet	Nagy
Alakíthatóság	Nagy
Hiszterézis terület	Kicsi



Tiszta fémek és
homogén szilárd
oldatok.

Ötvözetek jobbak.

Mechanikai keménység $\Leftrightarrow$ Mágneses keménység

TISZTA Fe

$B_S (20\text{ }^\circ\text{C}) = 2,15\text{ T}$

$\mu_{\max} = 5.000 - 300.000\text{ A/cm}$

99,95 % Fe , 0,005% C ARMCO

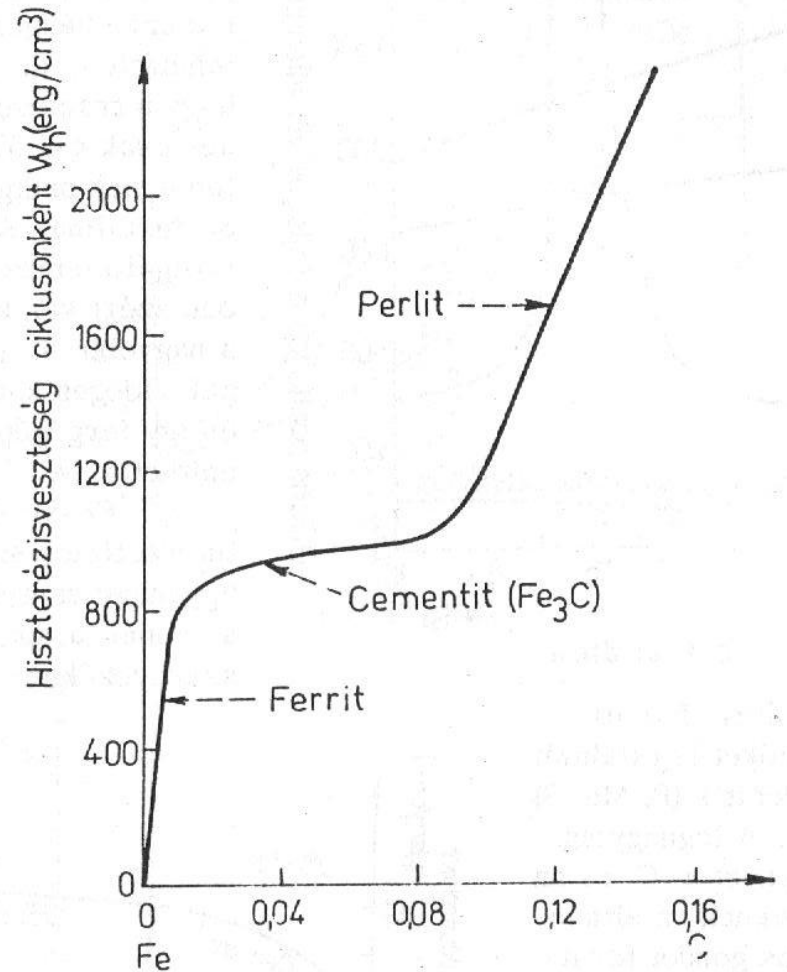
Ötvözetlen elektrotechnikai lemez
(Fedin, Fermax...)

Interstíciós C, N, O $\Rightarrow$ rácstorzulás



Dekarbonizálás (szénatomok
eltávolítása)

Tulajdonságai erősen szórnak
Nem kézbentartható



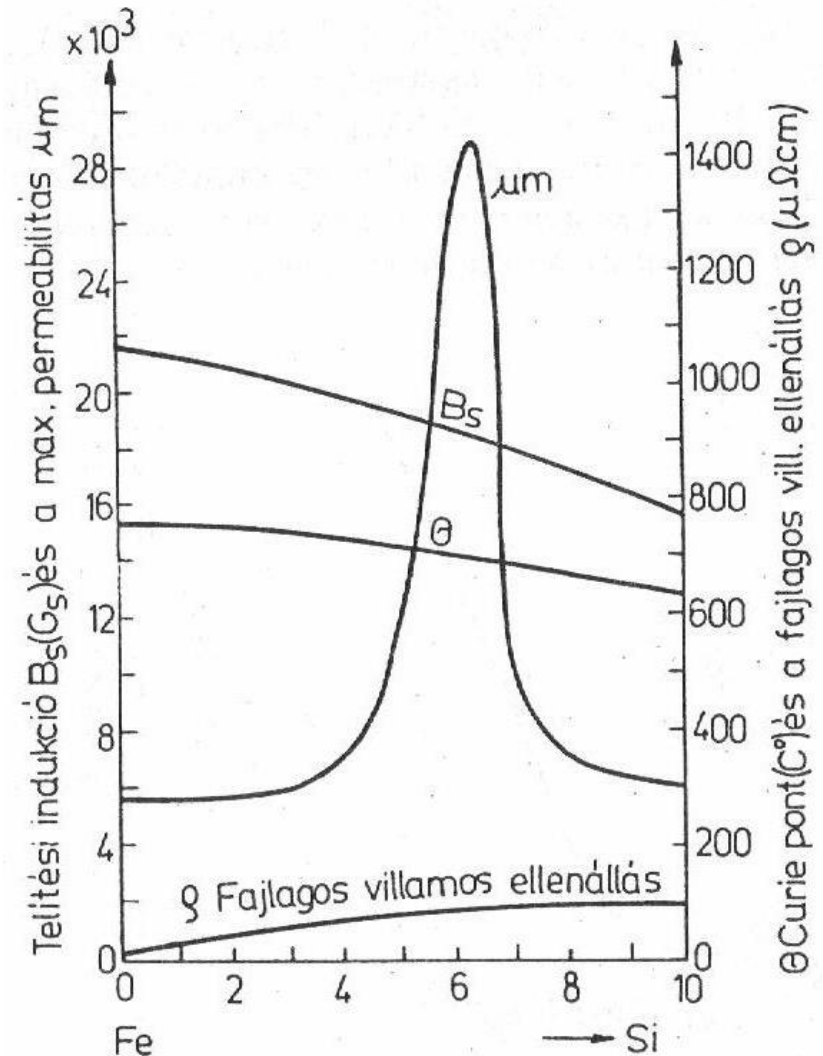
Fe - Si ÖTVÖZETEK (LEMEZ)

Erősáramú alkalmazás (nagy H , kis f)
Transzformátor, dinamó-lemez
(0,2 - 0,5 mm)
Si hatása: csökkenti az anizotrópiát

Optimum: 6-7 % Si **rideg, kemény**
Transzformátor: 4-4,5 % Si
Dinamó: 3,2-3,6 % Si

Interstíciós ötvözők: **C, O, P, Mn, S**
Maradó feszültség

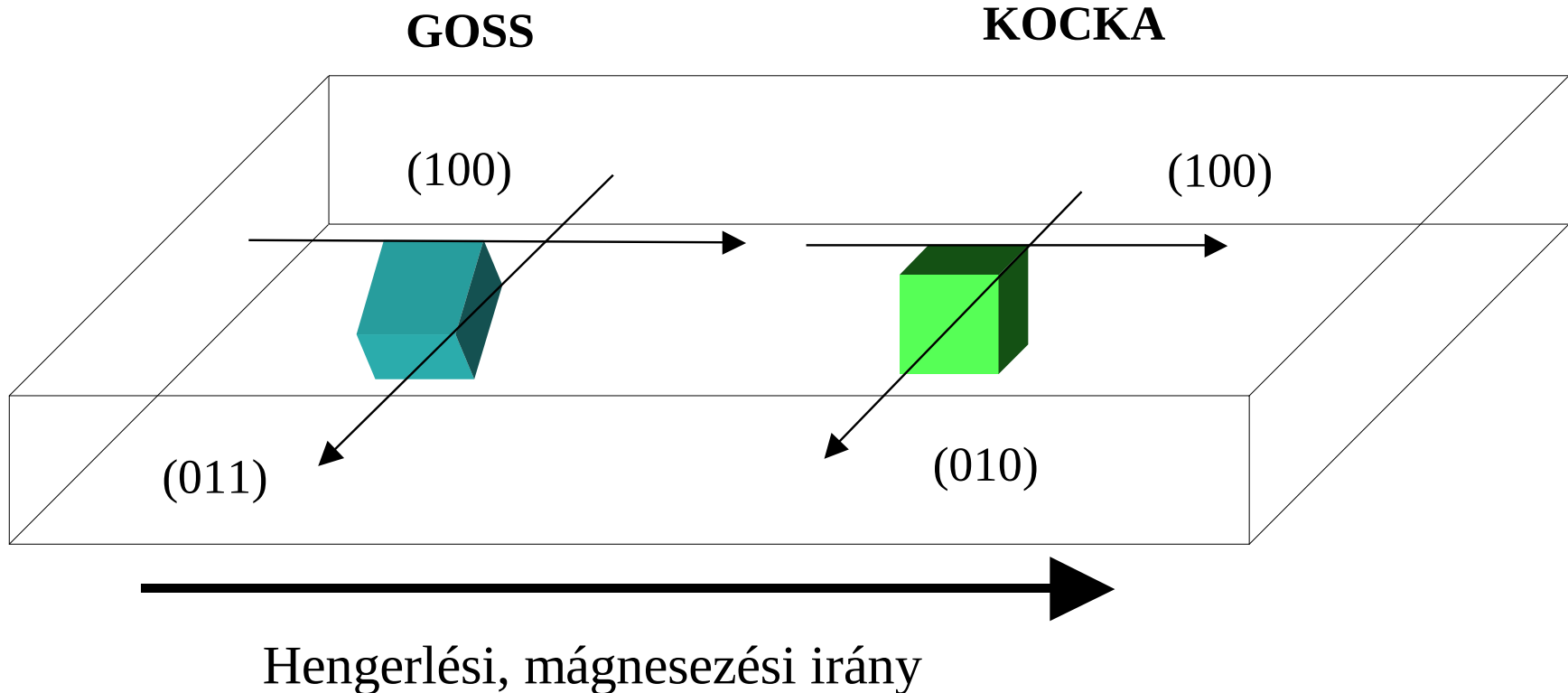
Hőkezelés: nedves hidrogénben
 $C < 0,04 \%$



TEXTÚRÁLT Fe - Si LEMEZEK

Külső H párhuzamos valamelyik könnyű mágnesezési iránnyal
Hengerlés $\Rightarrow$ szemcseorientáció megváltozik $\Rightarrow$ anizotróp, textúrás szerkezet

Mágnesezési irány meghatározott !!!



Fe - Ni ÖTVÖZETEK (PERMALLOY)

50% Ni - 50% Fe

80% Ni - 20% Fe

Kis telítési indukció (Fe-2,2 T, Ni-0,6 T)

Nagy permeabilitás (20.000 - 70.000)

Kis veszteség

Alakítás rendkívül sokat ront a tulajdonságokon.

Lágyítás (900-1000 °C, 1h), gyors hűtés, feszültségmentesítés
(600 °C), gyors hűtés

T_C -nél mágnes térben hűtés $\Rightarrow$ permeabilitás * 10

LÁGY FERRITEK, GRÁNÁTOK

Kerámia mágnes (Köbös spinell, Ferrimágneses rend)

- ⇒ Porkohászati technológia (az alkotókat por formájában nagy hőmérsékleten összesajtolják)
- ⇒ Rideg, törékeny, nem alakítható (köszörülés)
- ⇒ Szigetelő (rossz félvezető) ⇒ nagy frekvenciás alkalmazások

MOFe_2O_3

FERRIT

(M kétféleértékű fém: Mn, Zn, Ni)

Fe momentumok kompenzálják egymást ⇒ B_s kicsi

$3\text{M}_2\text{O}_35\text{Fe}_2\text{O}_3$ GRÁNÁT

(M kétféleértékű ritkaföldfém: Sm, Eu, Gd)

Ittrium ötvözés → YIG

AMORF – NANOKRISTÁLYOS ÖTVÖZETEK

Finemet



40-50 vol% nanokristályos fázis

Vékony szalagok (0,02-0,05 mm)

Eutektikus összetétel

Átmeneti fém (Ni, Co, Fe, Mn)

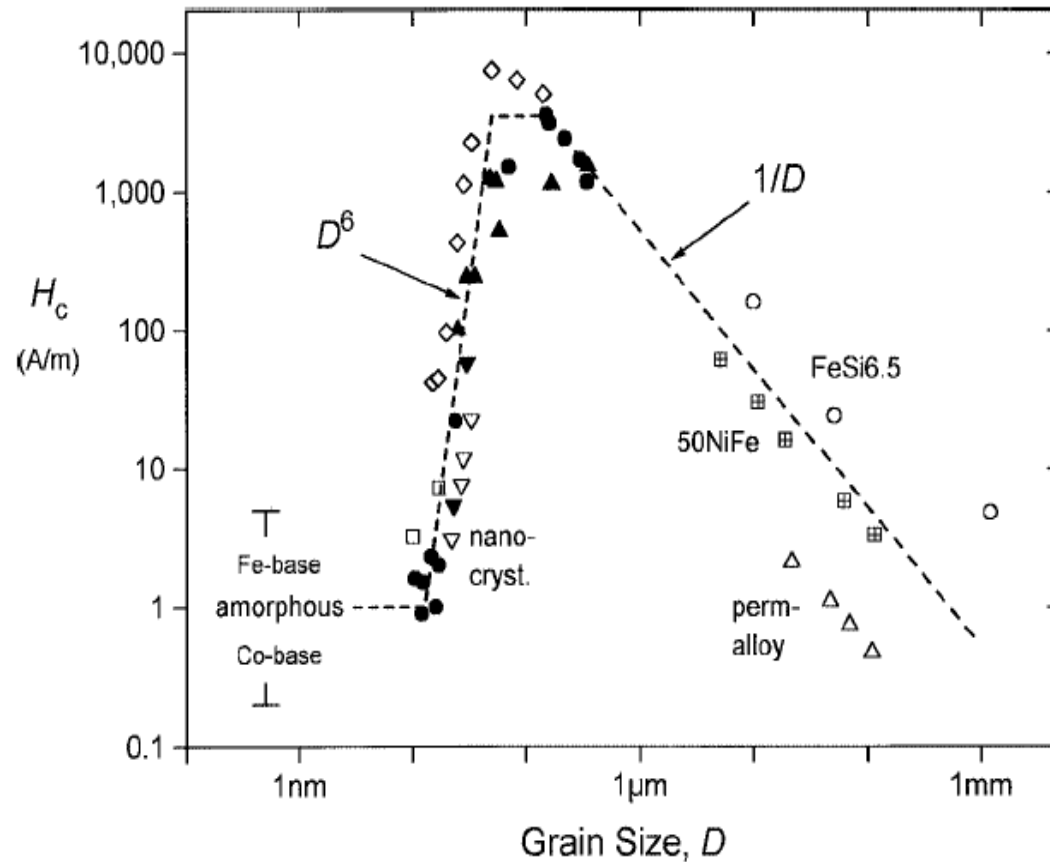
Nem fémes ötv.: (Si, P, N, C, B)

Gyorshűtés (10^5 °C/s)

**Fe, Ni, Co alapú amorf
ötvözetek**

A SZEMCSEMÉRET HATÁSA A KOERCITÍV ERŐRE

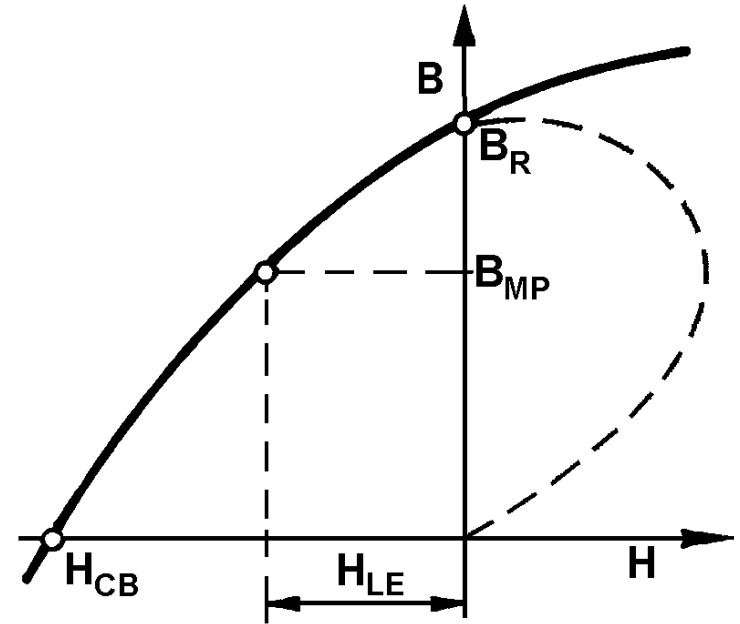
G. HERZER



Csökkenő szemcseméretnél a koercitív erő eleinte növekszik a szemcseméret reciproka szerint, majd újból csökken a szemcseméret hatodik hatványával.

FELHASZNÁLÓI IGÉNYEK A KEMÉNYMÁGNESES ANYAGOKNÁL

B_M	Nagy
B_R	Nagy
$(BH)_{\max}$	Nagy
Hiszterézis terület	Nagy
$H_C > 400 \text{ A/cm}$	Nagy
Permeabilitás	X



Keménymágnes jelleggörbe

KEMÉNYMÁGNESEK JELLEGZETES FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEI

Légrésben előírt indukció keltése / fenntartása.

Drága, sokszor alakíthatatlan.

Híradástechnika:

hangszórók, mikrofonok, mikrohullámú eszközök

Méréstechnika:

galvanométerek

Mechanikai mozgatás, rögzítés:

motorok, emelő stb. mágnesek

Mágneses információ tárolás:

magnó, videó, floppy, merevlemez

KEMÉNYMÁGNESEK NÉHÁNY TÍPUSA

Martenzites (W)	(olcsó, klasszikus)
Alnico, Ticonal	(szokásos, tömegtermék)
Cu-Ni-Co, Fe-Co-V	(közepes, alakítható)
Pt-Co, Pt-Fe	(kitűnő izotróp mágnes, drága)
R-Co	(kitűnő, magas ár, 0,1-1 g)
Nd-Fe-B	(kitűnő, de alacsony T_C)
Hexaferritek	(olcsó, porkohászat, egyszerű alkalmazások)

Ellenőrző kérdések

- Alapfogalmak definiálása:
 - mágneses tér, mágneses indukció
 - mágnesezettség
 - elemi mágneses momentum
 - gyengén mágneses anyagok
 - rendezett mágneses anyagok
 - ferro- ferri- és antiferromágneses rend
 - domén, doménfal
 - hiszterézisgörbe és jellemzői
 - Curie-hőmérséklet
 - lágymágnes
 - keménymágnes

Igaz-hamis kérdések

- Egy mágnes északi és déli pólusa nem választható szét (I).
- A mágnesezettség az elemi mágneses momentumok vektori eredője (I).
- Csak a fémeknek vannak mágneses tulajdonságai (H).
- A keménymágnesek koercitív ereje kis értékű (H).
- Transzformátor vasmagként lágymágnest célszerű alkalmazni (I).
- A hőmérséklet növelésekor a remanens indukció értéke csökken (I).