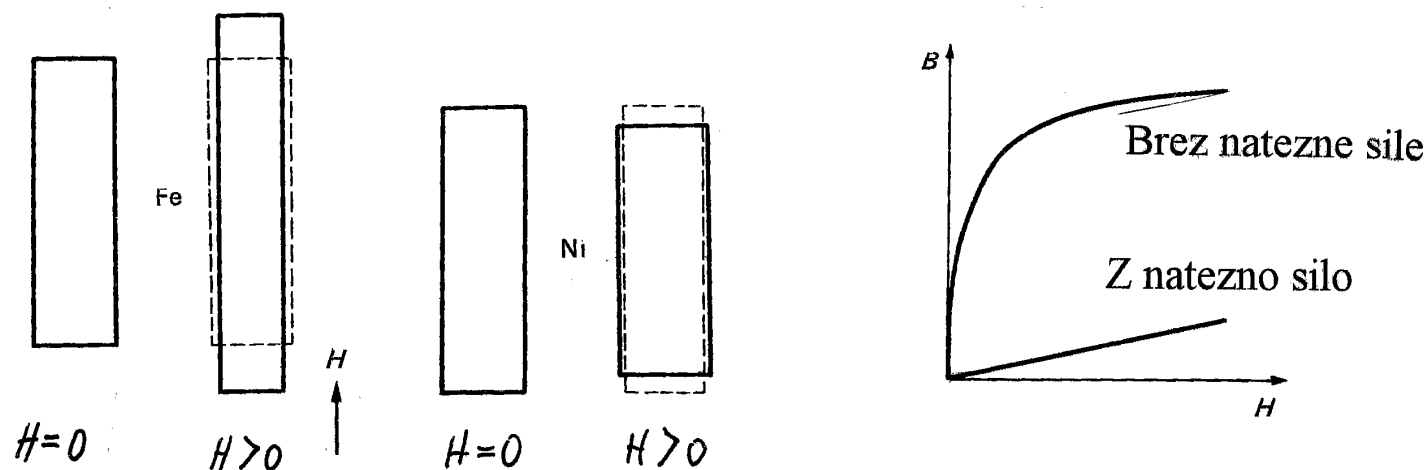
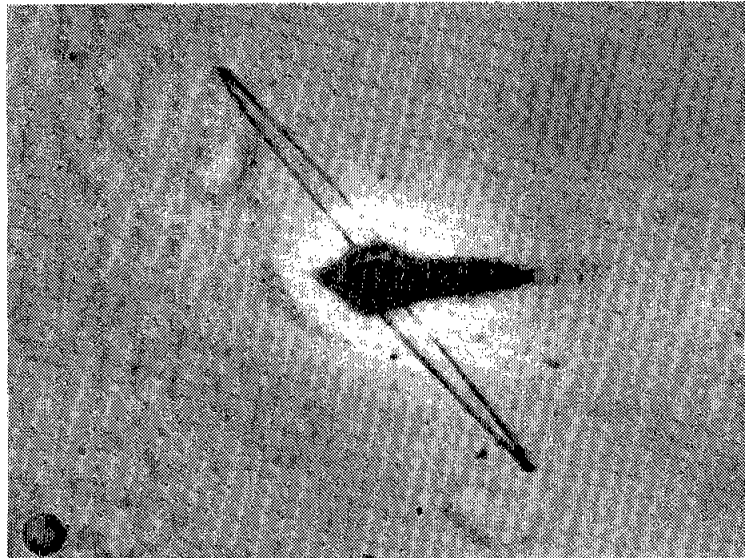


# Ostale lastnosti feromagnetnih materialov

## Magnetostrikcija



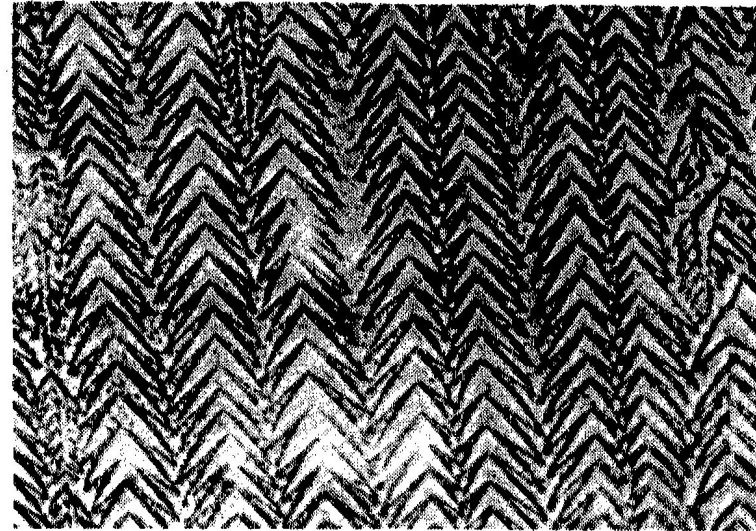
Slika 5.32a Magnetostrikcija pri železu in pri niklju



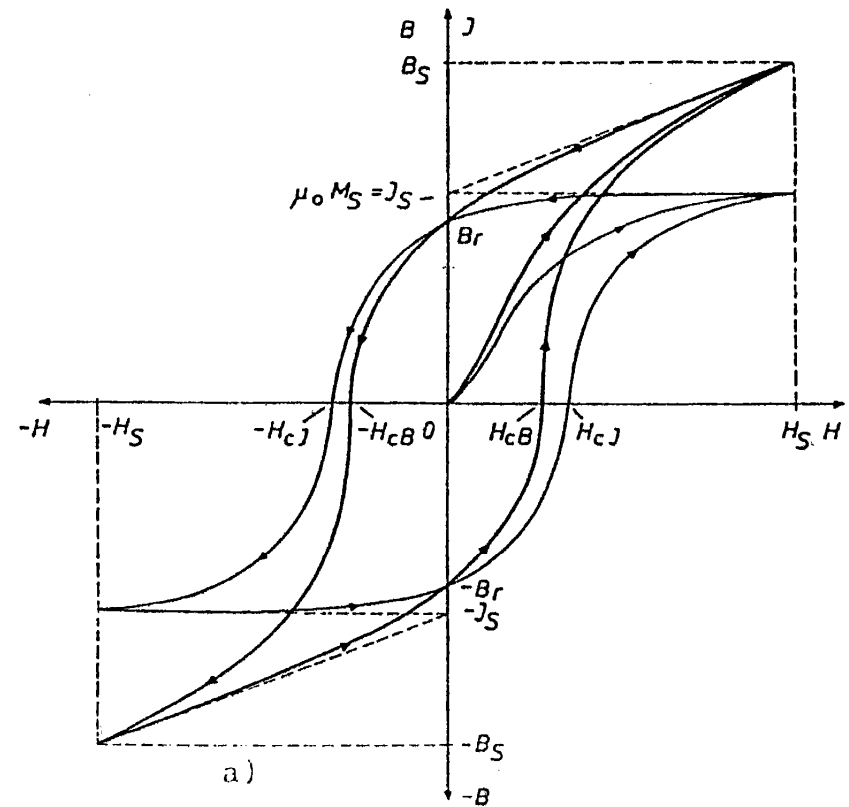
**Vpliv ovir pri magnetenju**



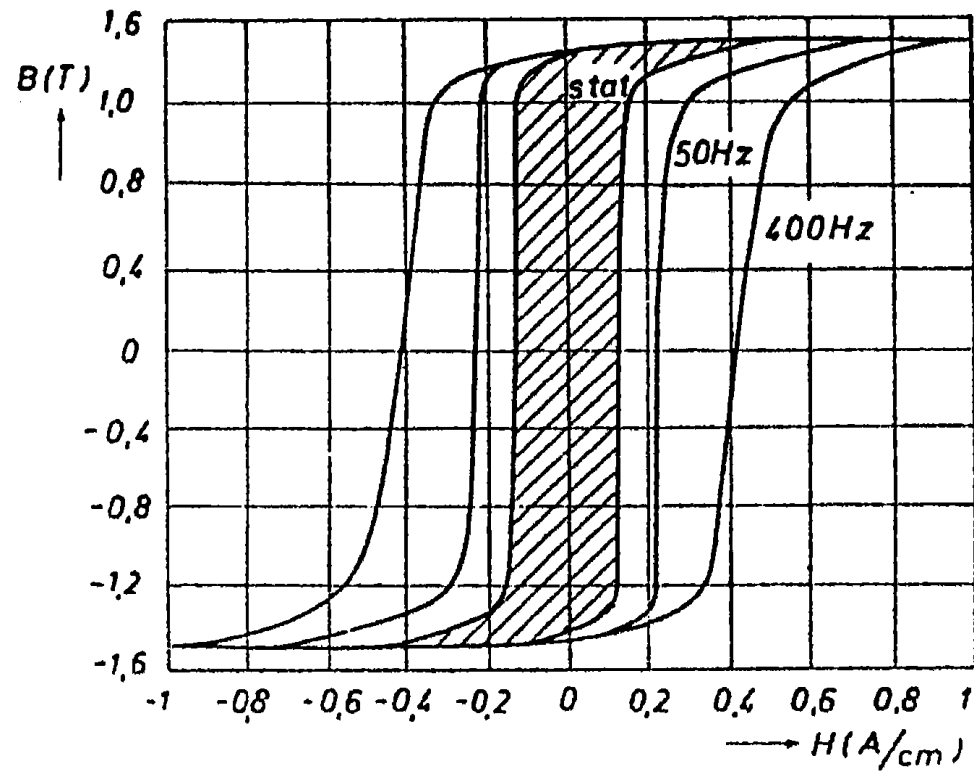
**Oblike pregrad in domen pri feromagnetnih materialih**



# Karakteristiki $J = f(H)$ in $B = f(H)$



# Statična in dinamična histerezna zanka



Statična in dinamična histerezna zanka

# Permeabilnost magnetnih materialov

## Absolutna permeabilnost

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

Ponazarja prirastek gostote magnetnega pretoka z jakostjo polja na magnetilni krivulji

## Relativna permeabilnost

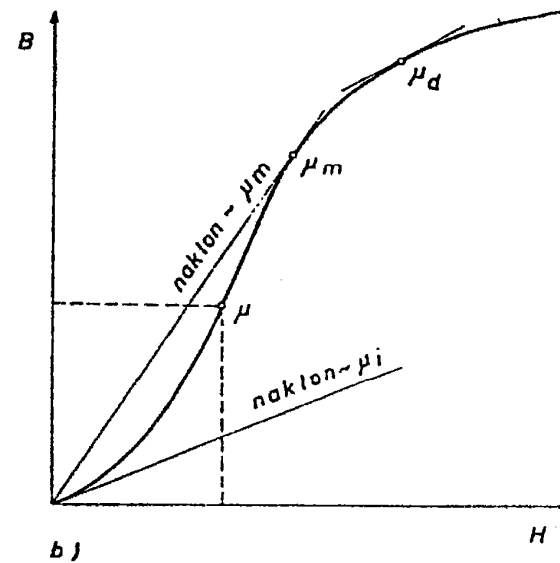
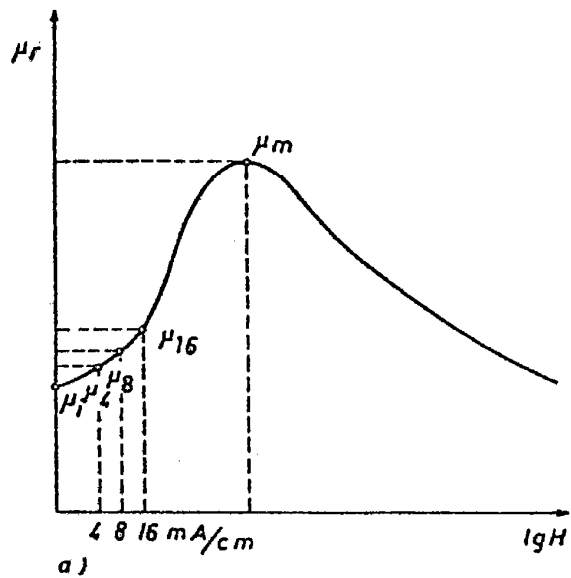
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

Primer: relativno permeabilnosti pri jakostih polja 2500, 5000, 10000 A/m itd zapišemo kot  $\mu_{25}$ ,  $\mu_{50}$ ,  $\mu_{100}$ , itd.

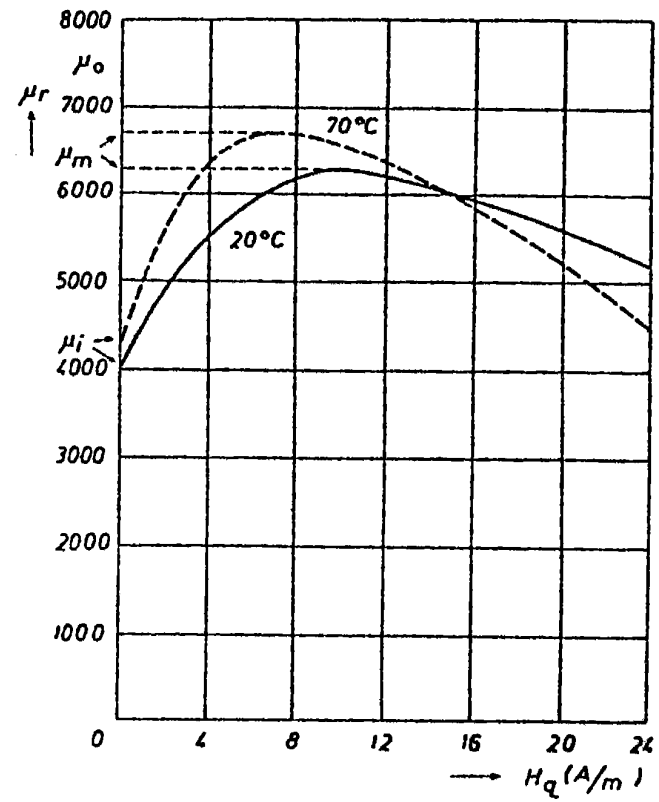
## Začetna permeabilnost

Dobimo jo z meritvami pri majhnih vrednostih magnetne poljske jakosti z ekstrapolacijo proti nič ( $H \rightarrow 0$ )

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$



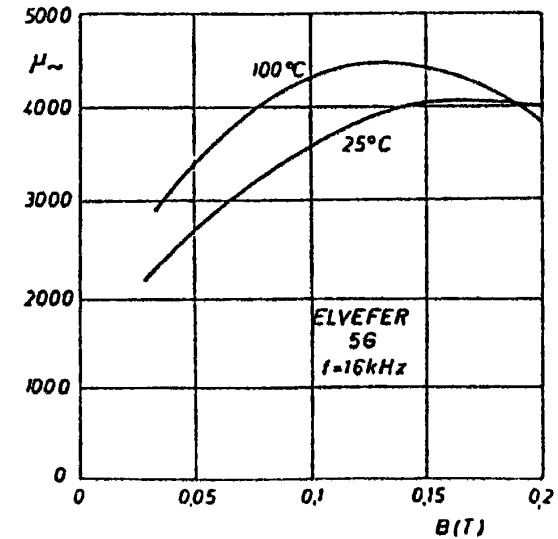
# Maksimalna permeabilnost $\mu_{\max}$ ( $\mu_m$ )



## Izmenična (amplitudna permeabilnost $\mu_{\sim}$ ( $\mu_{amp}$ , $\mu_a$ ))

$$\mu_{\sim} = \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \quad (\text{za absolutne vrednosti})$$

$$\mu_{r\sim} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \quad (\text{za relativne vrednosti})$$



Izmenično permeabilnost je možno podati tudi za efektivne vrednosti:

$$\mu_{\sim} = \frac{B}{H} \quad \text{ozirama} \quad \mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}$$

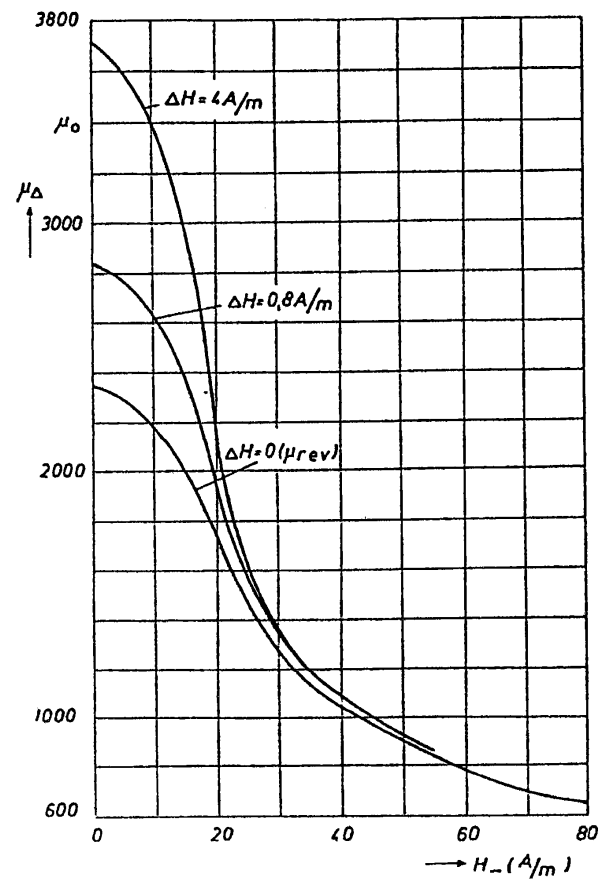


## Prirastna ali inkrementalna permeabilnost $\mu_{\Delta}$

Če tvorimo razmerje med  $\Delta B$  in produktom  $\mu_0$  s spremembo  $\Delta H$  pri konstantnem predmagnetanju in periodičnem spreminjanju magnetne poljske jakosti:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

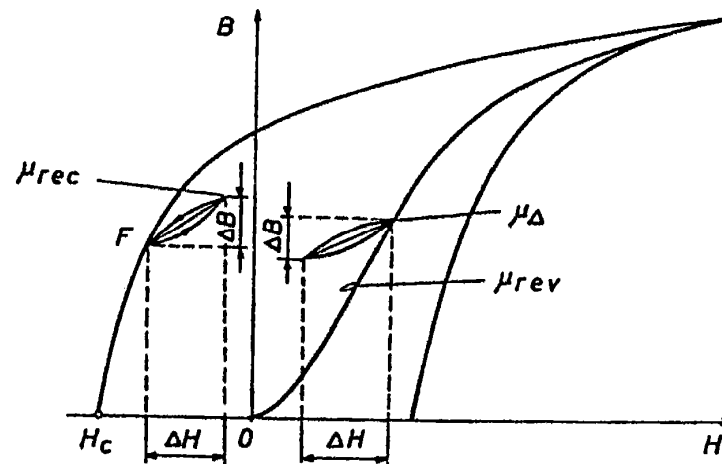
Meritev lahko izvedemo  
ž pri  $\Delta H = \text{konst.}$  ali  $\Delta B = \text{konst.}$



## Reverzibilna permeabilnost $\mu_{rev}$

Reverzibilna permeabilnost je primer mejne prirastne permeabilnosti, če gre  $\Delta H \rightarrow 0$

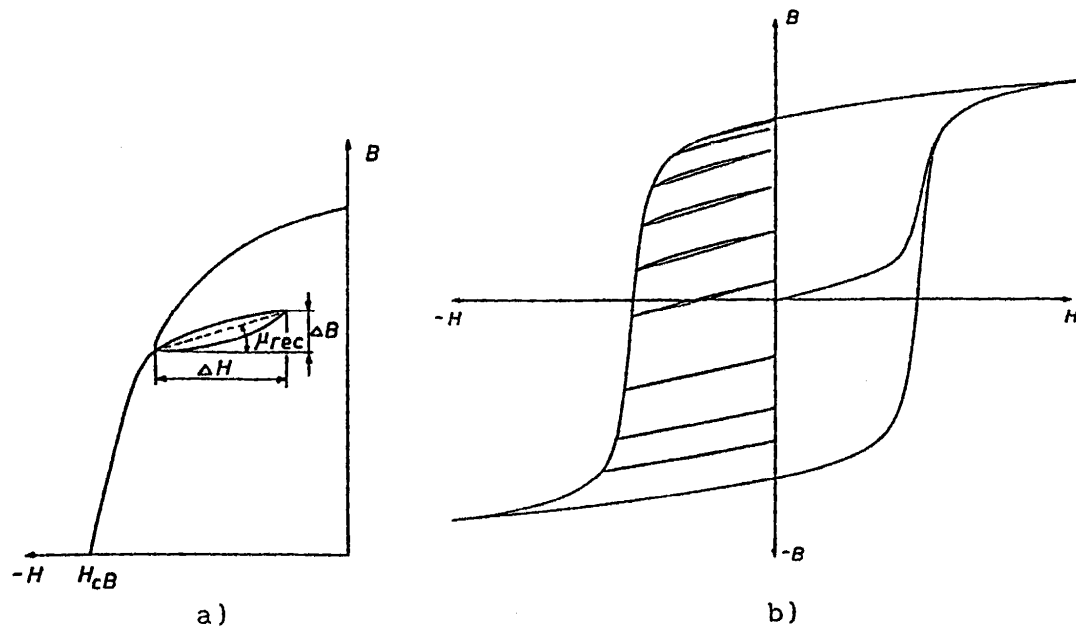
$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dB}{dH}$$



Prirastna, reverzibilna in permanentna permeabilnost

## Permanentna permeabilnost $\mu_{rec}$

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$$



Permanentna permeabilnost:

a) razlaga,

b) izmerjena permanentna permeabilnost pri Alnico materialu

## Efektivna permeabilnost $\mu_e$

Efektivna permeabilnost ni konstanta materiala, ampak konstanta jedra, ker je zelo odvisna od njegove oblike in od dimenzij

$$\mu_e \cong \frac{l_j}{l_z}$$

## Navidezna permeabilnost $\mu_{app}$

$$\mu_{app} = \frac{L_j}{L_0}$$

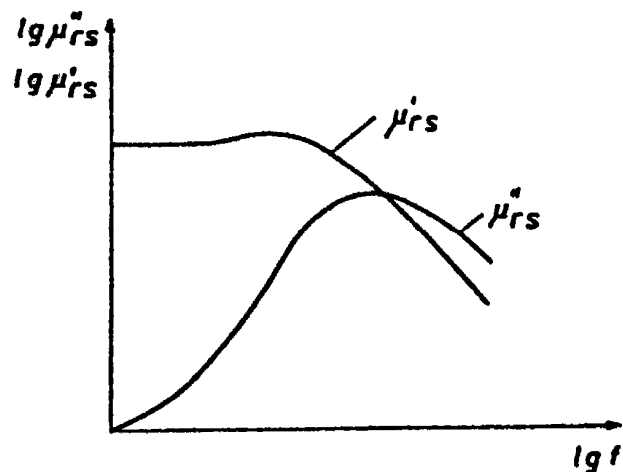
pomeni razmerje med induktivnostjo tuljave z jedrom  $L_j$  in brez jedra  $L_0$ :

## Kompleksna permeabilnost

Impedanco tuljave v serijski vezavi lahko zapišemo:

$$\underline{Z} = R_{js} + j\omega L_s = j\omega \underline{\mu}_{rs} \cdot L_0$$

$$\underline{\mu}_{rs} = \frac{L_s}{L_0} - j \frac{R_{js}}{\omega L_0} = \mu_{Ls} - j\mu_{rs}$$



Kompleksna permeabilnost feritnega jedra

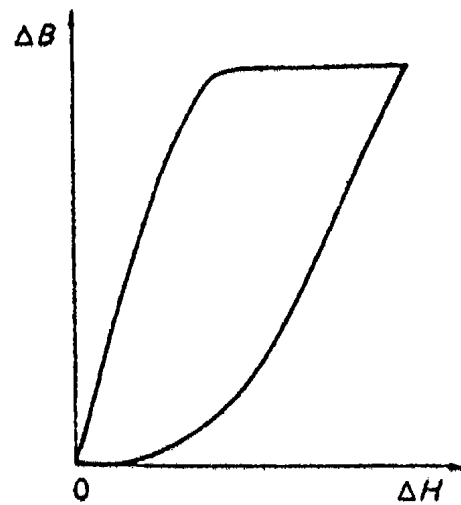
$$\underline{\mu}_{rs} = \mu'_{rs} - j \cdot \mu''_{rs}$$

$\mu_{Ls} = \mu'_{rs}$  je realna induktivna relativna permeabilnost, ki je dejansko enaka do sedaj obravnavani relativni permeabilnosti

$\mu_{Rs} = \mu''_{rs}$  je uporovna permeabilnost, ki vsebuje izgube.

Impulzna permeabilnost  $\mu_p$

$$\mu_p = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$$



Histerezna zanka pri impulznem magnetenju

# Magnetne izgube

Pri magnetenju jeder v šibkih poljih opazujemo izgube s pomočjo upornosti.

Razliko med skupno upornostjo in enosmerno upornostjo imenujemo izmenična upornost jedra in je:

$$R_j = R_c - R_{-}$$

$$R_j = R_v + R_h + R_n$$

$$R_v = v \cdot L \cdot f^2$$

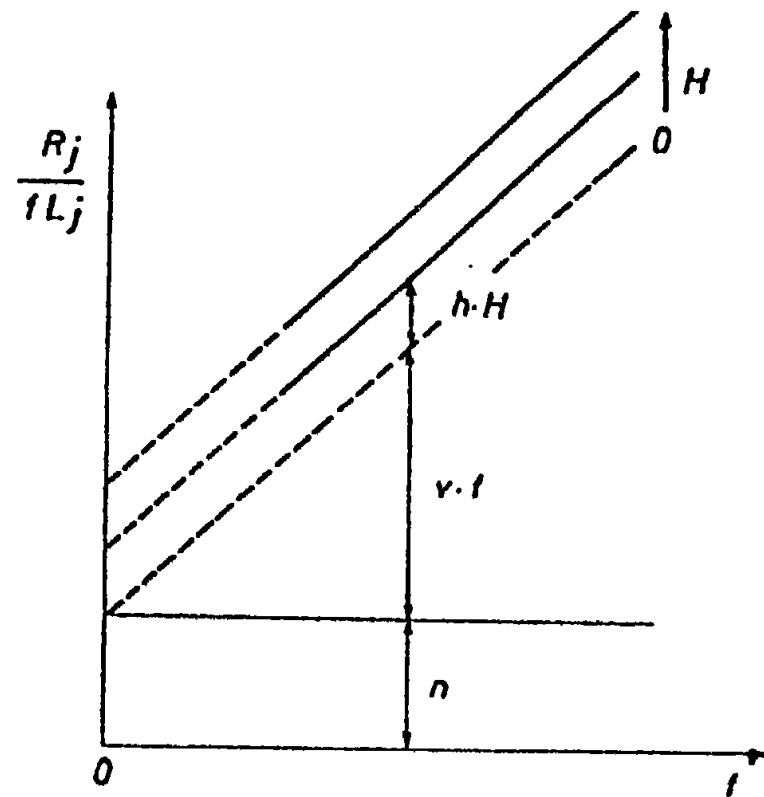
$$R_h = h \cdot L \cdot f \cdot H$$

$$R_n = n \cdot L \cdot f$$

Enačbo 5.63 lahko zdaj napišemo v naslednji obliki:

$$R_j = v \cdot L \cdot f^2 + h \cdot L \cdot f \cdot H + n \cdot f \cdot L$$

$$\frac{R_j}{f \cdot L} = v \cdot f + h \cdot H + n$$





# Izgubni faktor in kvaliteta

Izgubni faktor:

$$\operatorname{tg} \delta_j = \frac{R_j}{\omega L} = \frac{1}{2\pi} (h \cdot H + v \cdot f + n)$$

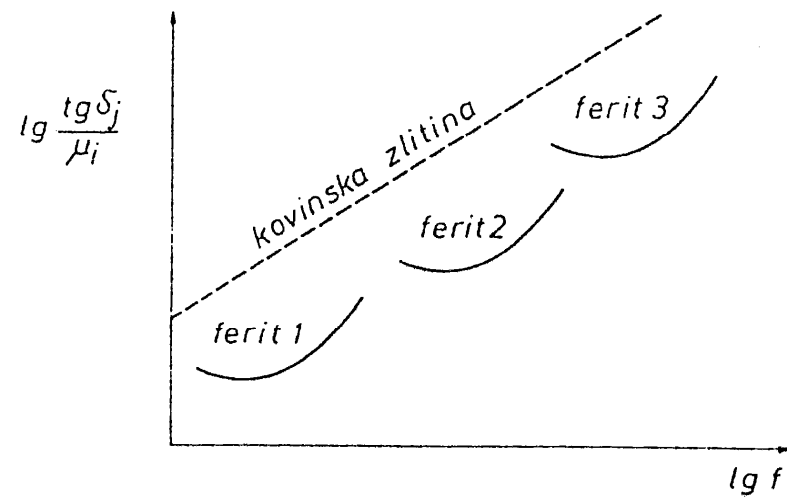
Z recipročno vrednostjo  $\operatorname{tg} \delta_j$  dobimo podatek o kvaliteti (dobroti) magnetnega jedra:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_j} = \frac{\omega L}{R_j}$$

Ker se začetna permeabilnost  $\mu_i$  spreminja tudi z zračno režo, dobimo s kvocientom:

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_j}{\mu_i} = \operatorname{tg} \delta_{jr} \quad \text{relativni izgubni faktor}$$

↘ konstanta materiala, ki je neodvisna od oblike

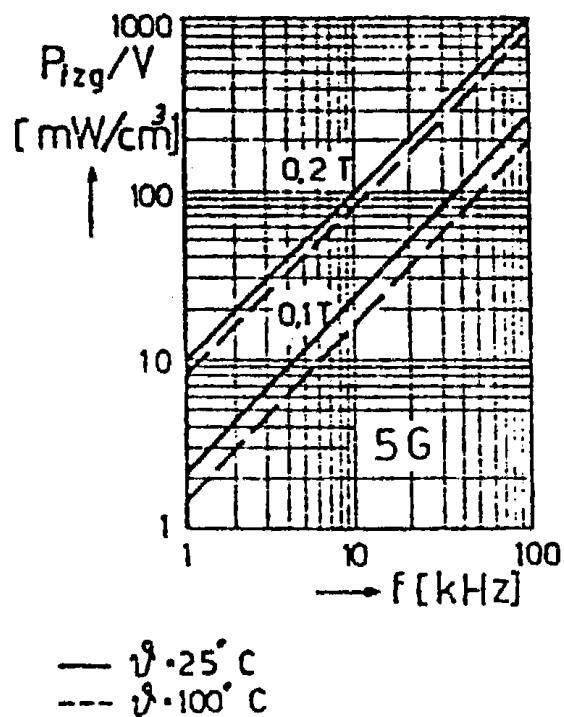


Odvisnost izgubnega faktorja od frekvence

# Specifične izgube premagnetenja

$$P_{izg} = P_v + P_h$$

Primer:



Specifične izgube Elvefer feritov tipa 5G

V energetskih napravah pogosto uporabljamo magnetne pločevine. Na osnovi izkušenj izračunavamo za pločevinasta železna jedra specifične magnetne izgube s pomočjo približnih enačb:

- izgube zaradi vrtilčnih tokov:

$$P_v \cong 0,26 \cdot \frac{d^2 \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot \lambda}{\rho} \quad \left[ \frac{W}{kg} \right]$$

- histerezne izgube:

$$P_h \cong 0,004 \frac{f \cdot H_c \cdot \hat{B}}{\rho} \quad \left[ \frac{W}{kg} \right]$$

kjer pomenijo:

$d$  - debelina pločevine v cm,

$f$  - frekvenca v Hz,

$H_c$  - koercitivna jakost magnetnega polja,

$\hat{B}$  - temenska gostota magnetnega pretoka v T,

$\lambda$  - specifična prevodnost v S/m,

$\rho$  - gostota v g/cm<sup>3</sup>.

## Ukrepi za zmanjšanje izgub:

- ⇒ Zmanjšati specifično električno prevodnost (povečati električno upornost). Pri kovinskih materialih dosežemo to z legiranjem (Fe npr. legiramo s Si) ali z uporabo nekovinskih, keramičnih magnetnih materialov; feriti imajo npr.  $10^6$  do  $10^{12}$  - krat večjo specifično upornost kot feromagnetne pločevine in imajo zanemarljive vrtilne izgube;
- ⇒ Uporabiti prahasto tehnologijo. Material zdrobimo v droben prah, ki ga nato med seboj vežemo z izolacijskim materialom. S tem učinkovito zmanjšamo vrtilne tokove v prostoru in ne samo v dveh dimenzijah kot pri lameliranju;
- ⇒ Lamele pločevine čim bolj stanjšati (tehnološke in ekonomske omejitve). V energetskih napravah so debeline pločevin običajno okrog 0,5 mm.
- ⇒ Lamele med seboj izolirati;
- ⇒ Uporabiti materiale s čim ožjo histerezo zanko;
- ⇒ Vplivati na kristalno strukturo materiala.

# Izgube v vrtilnem magnetnem polju

- V vrtilnem polju se histerezne izgube obnašajo drugače kot v izmeničnih poljih.
- Pri nižjih gostotah magnetnega pretoka so histerezne izgube v vrtilnem magnetnem polju  $P_{vh}$  večje kot v izmeničnem, pri višjih gostotah pa manjše.
- Raziskave na magnetni pločevini Fe - Si s 3 % Si so pokazale, da je pri majhnih poljih razmerje  $P_{vh} : P_h \cong 2 : 1$ , pri gostotah nasičenja pa okrog 0,6 : 1.

# Magnetna anizotropija

Najbolj pogosto nas zanimata anizotropija magnetenja (opazujemo  $\mu$ ) in izgubna anizotropija (opazujemo specifične izgube premagnetenja) v odvisnosti od smeri.

**Izgubna anizotropija**

$$A_i(\%) = \frac{P_p - P_v}{P_p + P_v} \cdot 100$$

**ali**

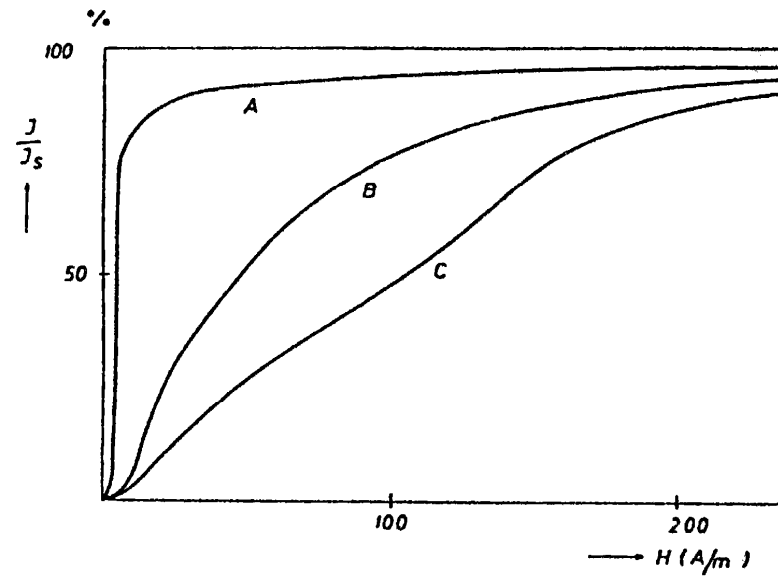
$$A_i(\%) = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \cdot 100$$

Magnetno tehnično anizotropijo pa dobimo iz enačbe:

$$A_i(\%) = \frac{\mu_v - \mu_p}{\mu_v + \mu_p} \cdot 100$$

$$A_i(\%) = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{\mu_{\max} + \mu_{\min}} \cdot 100$$





Magnetilne krivulje zlitin  $Fe_{12,5}Ni_{87}$  (permalloy) ohlajane od  $600\text{ }^{\circ}C$  navzdol.

- magnetno polje je bilo v prednostni smeri,
- ohlajanje brez magnetnega polja.
- magnetno polje je bilo pravokotno na prednostno smer.

# Spremenljivost magnetnih lastnosti

Spremembe so lahko

- (1) reverzibilne ali
- (2) ireverzibilne

Magnetni in električni temperaturni koeficienti materialov

Material	Reverzibilni koeficient [%/K]
feriti	0,2 (magnetni)
Sm - Co magneti	0,05 (magnetni)
Nd - Fe - B magneti	0,15 (magnetni)
Cu	0,39 (električni)
Al	0,41 (električni)

# Spremenljivost magnetnih lastnosti

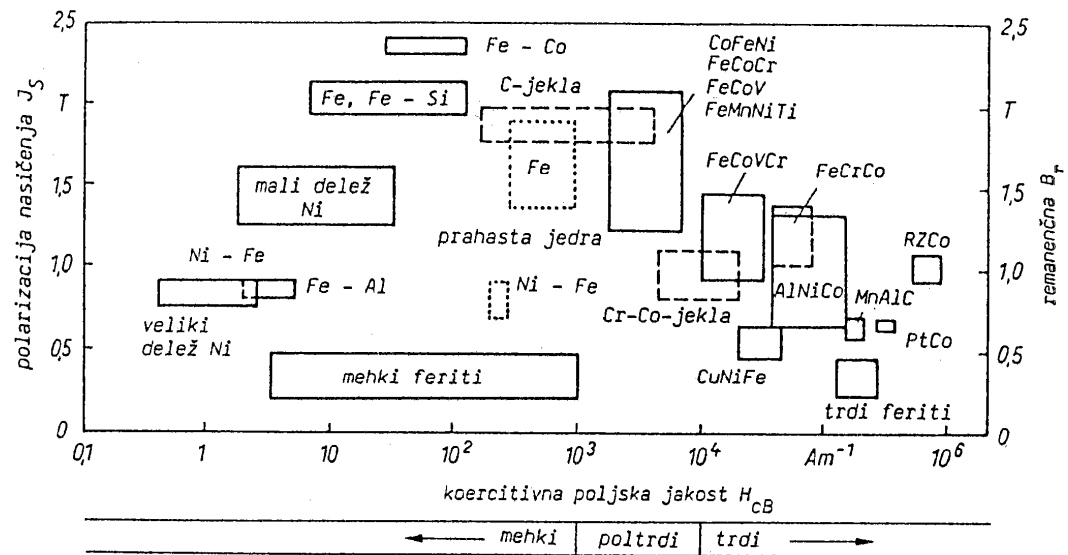
Pri ireverzibilnih spremembah pa ločimo:

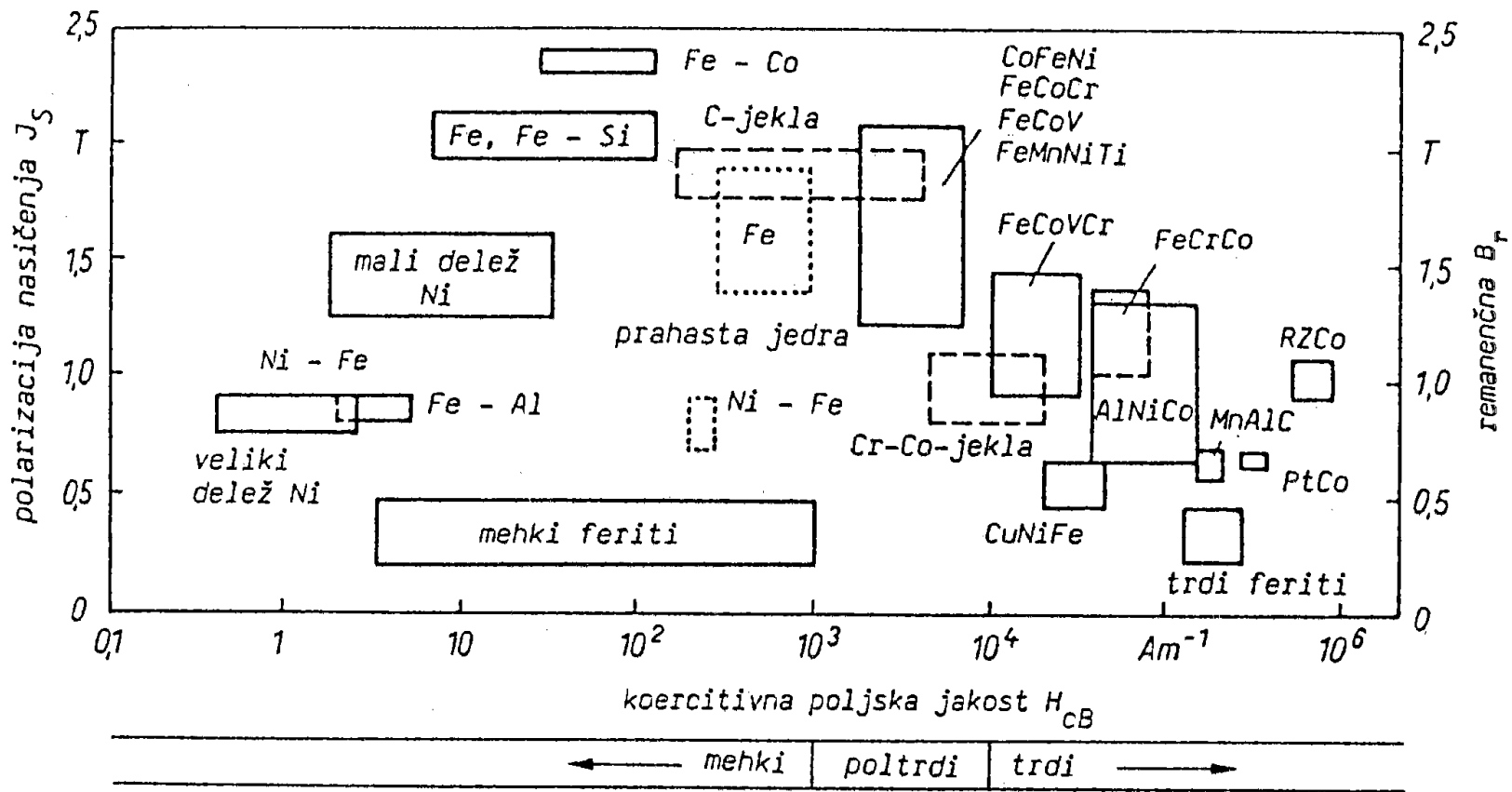
- (1) popravljive
- (2) nepopravljive
- (3) stabilizacijske

# Razdelitev magnetnih materialov

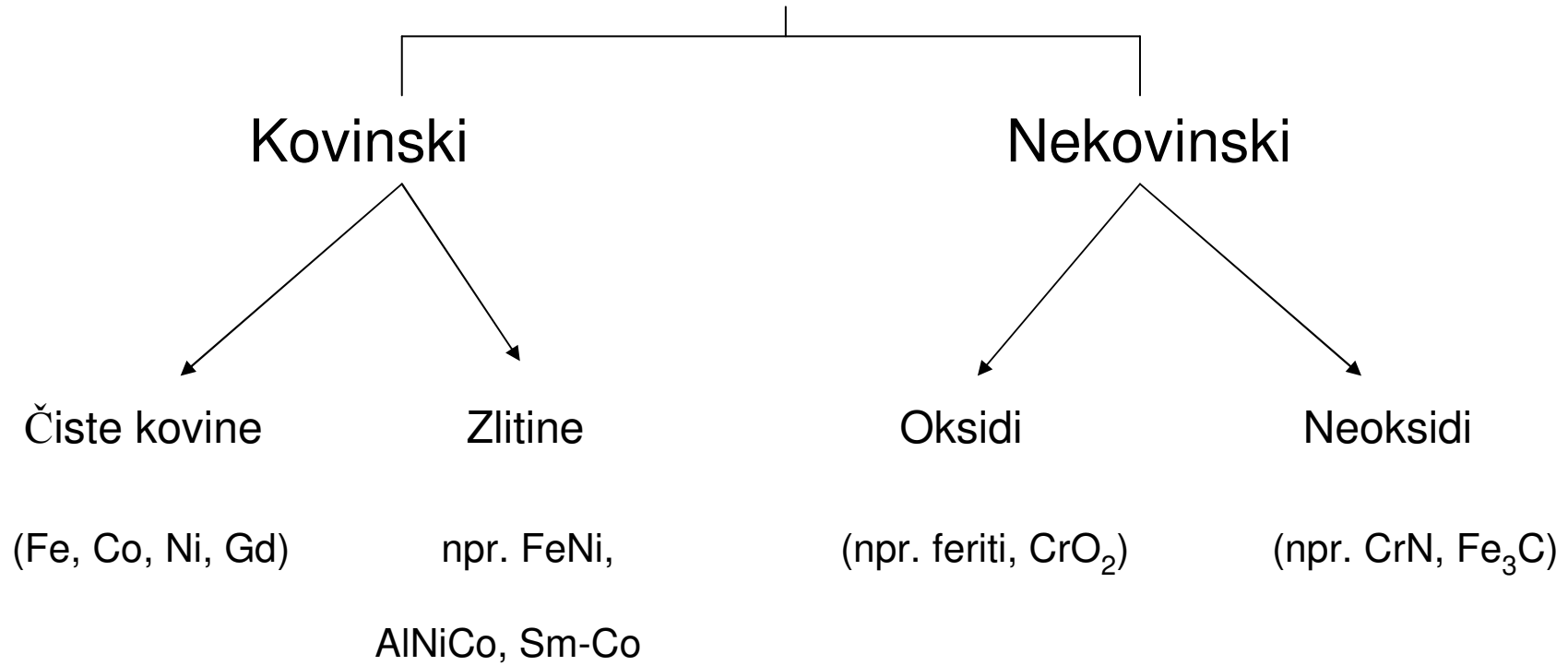
Magnetno mehki

Magnetno trdi





# Magnetni materiali



# Postopki za izdelavo magnetnih materialov

## Metalurška tehnologija

- Taljenje in zlivanje
- Gnetenje
- Termična obdelava

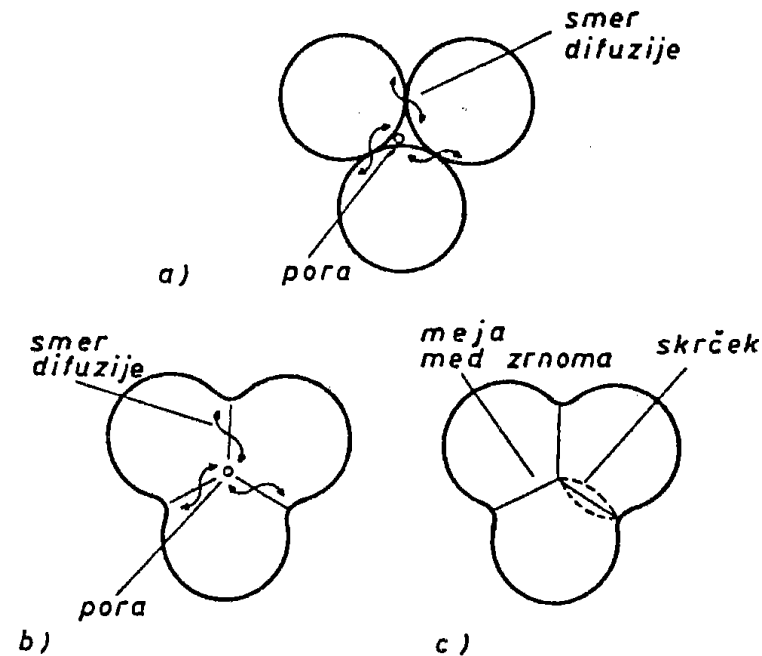
## Izdelava prahastih magnetnih materialov

- Izdelava prahu
- Izoliranje
- Predpriprava za stiskanje
- Stiskanje
- Strjevanje

# Izdelava sintranih trajnih magnetov

- Izdelava prahu
- Mešanje
- Posamezne komponente čistih kovin, ki so v obliki prahu, pomešamo med seboj v želenem razmerju.
- Stiskanje. Pritisk niha z ozirom na kakovost materiala med 500 MPa in 1000 MPa.
- Termična obdelava - sintranje





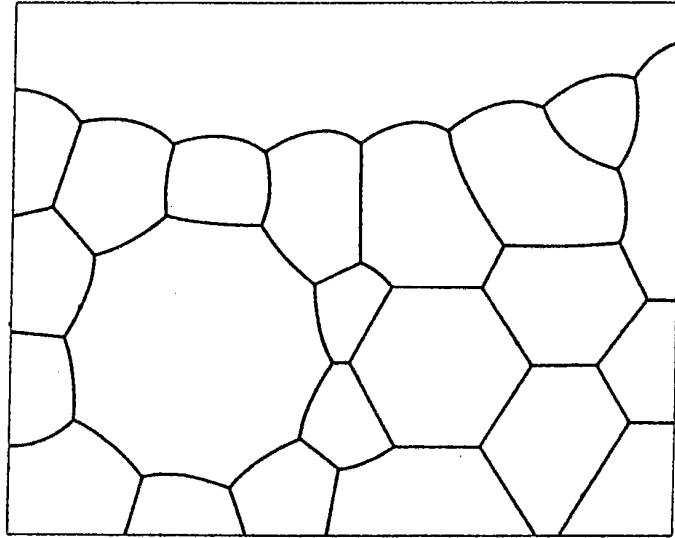
V začetnem stadiju sintranja v trdem stanju je logaritem skrčka premosorazmeren času in proces sintranja se tako izrazi z enačbo:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = K \cdot t^n$$

kjer je:

$$K = K_1 \cdot \frac{\delta \cdot \Omega_0 \cdot D}{k \cdot T \cdot r^3}$$

$\Delta L / L_0$  – linearni skrček,  
 $\delta$  – površinska napetost,  
 $\Omega_0$  – atomski volumen,  
 $D$  - difuzijska konstanta,  
 $k$  - Boltzmanova konstanta,  
 $T$  - temperatura,  
 $r$  - velikost zrn,  
 $n$  - 1/3 - 2/3 (odvisno od mehanizma sintranja).



Prerez materiala po  
končanem sintranju

# Keramiška tehnologija

Izhodiščne komponente so v splošnem nemagnetne.

Kot osnovni materiali uporabljamo:

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  (železov ferit),  
 $\text{MnO}$  (manganov oksid) ali  
 $\text{MnCO}_3$  (manganov karbonat),  
 $\text{ZnO}$  (cinkov oksid),  
 $\text{MgO}$  (magnezijev oksid) ali  
 $\text{NiO}$  (nikljev oksid) v prahu.

Izdelava teče v naslednjih korakih:

Mešanje  
Peletiranje

## Izdelava teče v naslednjih korakih:

- Mešanje
- Peletiranje
- Termična predobdelava
- Drobljenje in mletje
- Oblikovanje in stiskanje
- Sintranje

Vrsta ferita	Frekvenca	Permeabilnost	Uporaba
Mn-Zn	do 100 kHz	3000 - 6000	Miniaturne dušilke, impulzni transformatorji
Mn-Zn	10 - 1000 kHz	1000 - 2500	Filtri, magnetofonske glave
Ni - Zn	100 - 2000 kHz	400 - 1200	Odklonske dušilke pri TV, jedra za uglaševalna vezja
Ni - Zn	500 - 5000 kHz	200	Antenske palice, VF dušilke
Ni - Zn	1 - 15 MHz	100	Antenske palice, lončasta jedra za nihajne kroge
Ni - Zn	5 - 25 MHz	50	Lončasta jedra za nihajne kroge, VF dušilke, paličasta jedra
Ni	preko 25 MHz	15	VF dušilke
Mg - Mn	impulzi	50	Magnetni preklopniki, magnetni ojačevalniki
Mg - Mn	mikrovalovi	-	Vezja za fazni premik

# IEC klasifikacija mehkomagnetnih materialov

A - Železa		
B - Mehka jekla z majhno vsebino ogljika (nelegirana jekla)		
C - Silicijeva jekla	<p>C<sub>1</sub> Masivni material</p> <p>C<sub>2</sub> - Pločevina</p>	<p>C<sub>21</sub> Izotropna jekla</p> <p>C<sub>22</sub> Anizotropna jekla</p> <p>C<sub>23</sub> Tanko Si - jeklo</p>
D - Ostala jekla	<p>D<sub>1</sub> - Masivni material</p> <p>D<sub>2</sub> - Pločevina</p>	
E - Zlitine Ni - Fe	<p>E<sub>1</sub> 72 - 83 Ni, E<sub>2</sub> 54 - 68 Ni</p> <p>E<sub>3</sub> 45 - 50 Ni</p> <p>E<sub>4</sub> 35 - 40 Ni, E<sub>5</sub> cca. 30 Ni</p>	Izotropne, anizotropne
F - Zlitine Fe - Co	<p>F<sub>1</sub> 47 - 50 Co</p> <p>F<sub>2</sub> 35 Co, F<sub>3</sub> 23 - 27 Co</p>	Izotropne, anizotropne
G - Zlitine	<p>G<sub>1</sub> Zlitine Fe - Al</p> <p>G<sub>2</sub> Zlitine Al - Si - Fe</p>	
H - Mehkomag. keramika	H <sub>1</sub> Mehkomagnetni feriti	

# Mehkomagnetni materiali v napravah močnostne elektrotehnike

## Železa in nelegirana jekla

V laboratorijih je doseglo čisto železo z vsebnostjo 0,002 % C in 0,002 % O:

$$\mu_{maks.} = 220000,$$

$$\mu_{maks.} = 500000. \text{ (brez kisika)}$$

Pri tehniško čistih železih se gibljejo  
Magnetne veličine med:

$$\mu_{maks.} = 3000 \text{ do } 50000,$$

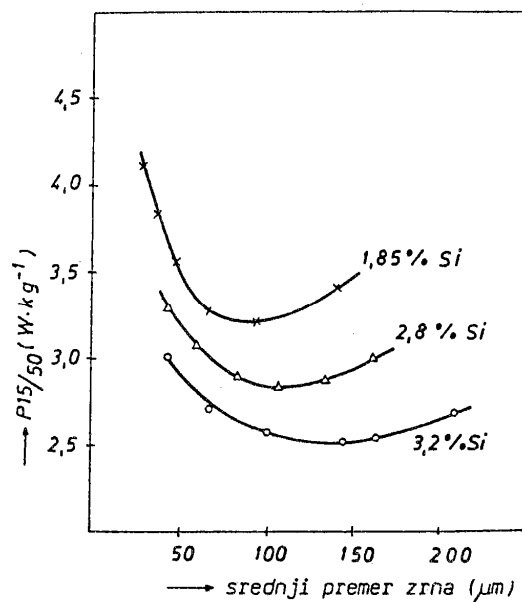
$$B_s = 2,15 \text{ T},$$

$$B_r = 0,8 - 1 \text{ T},$$

$$H_{cB, (statična)} = 6 \text{ do } 100 \text{ A/m},$$

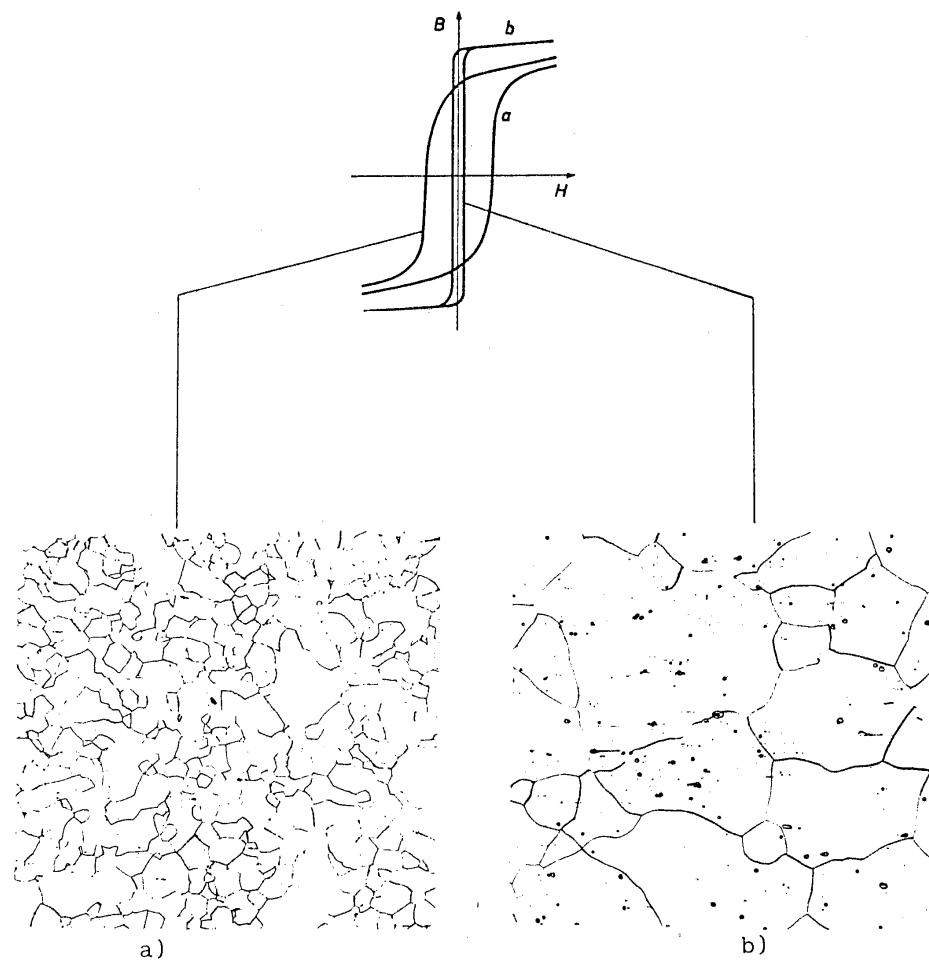
$$\rho = 0,1 \text{ do } 0,13 \times 10^{-6} \Omega m.$$

## Vpliv na rast zrn: P, Si



Sprememba histereznih izgub v odvisnosti od srednjega premera zrna železa  
( $B = 1,5 T$ ,  $f = 50 Hz$ )





Primerjava histerezne zanke in zrnatosti »polgotove« pločevine pred žarjenjem (a) in po njem (b).  
Metalografski posnetek je 100 x povečava.

# Silicijeva jekla

Vpliv silicija na lastnosti železa lahko grobo označimo takole:

**vsak odstotek Si v Fe poveča specifično upornost za približno dvakrat, zmanjša pa gostoto magnetnega pretoka nasičenja za približno 0,05 T.**

Ker so transformatorji grajeni vedno tako, da je pločevina izrabljena le v smeri valjanja, veljajo le lastnosti, ki jih imajo ti materiali v tej smeri:

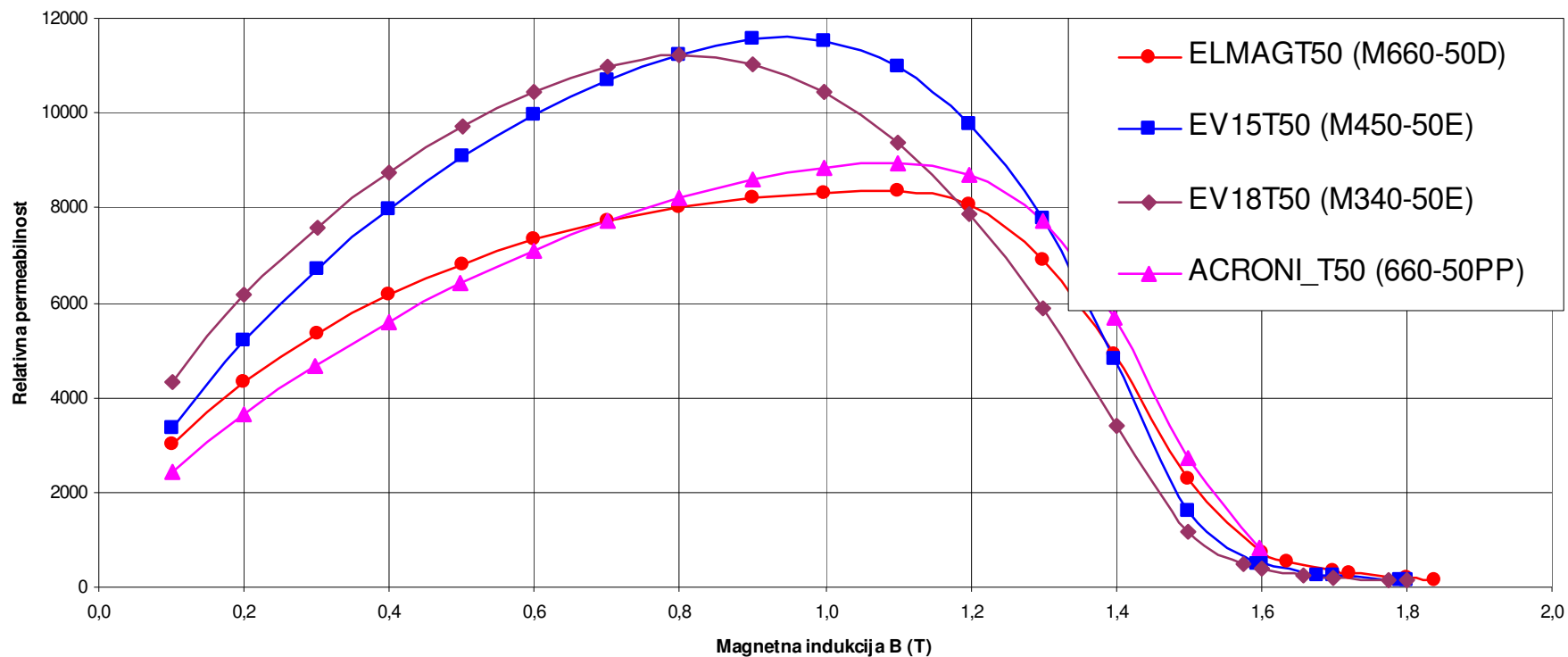
$$P_{15/50} \leq 1 \text{ W/kg},$$

$$\mu_4 \leq 2000 \text{ in } \mu_{maks} \leq 35000,$$

$$H_{cB} \geq 10 \text{ A/m in } B_s \leq 2,03 \text{ T},$$

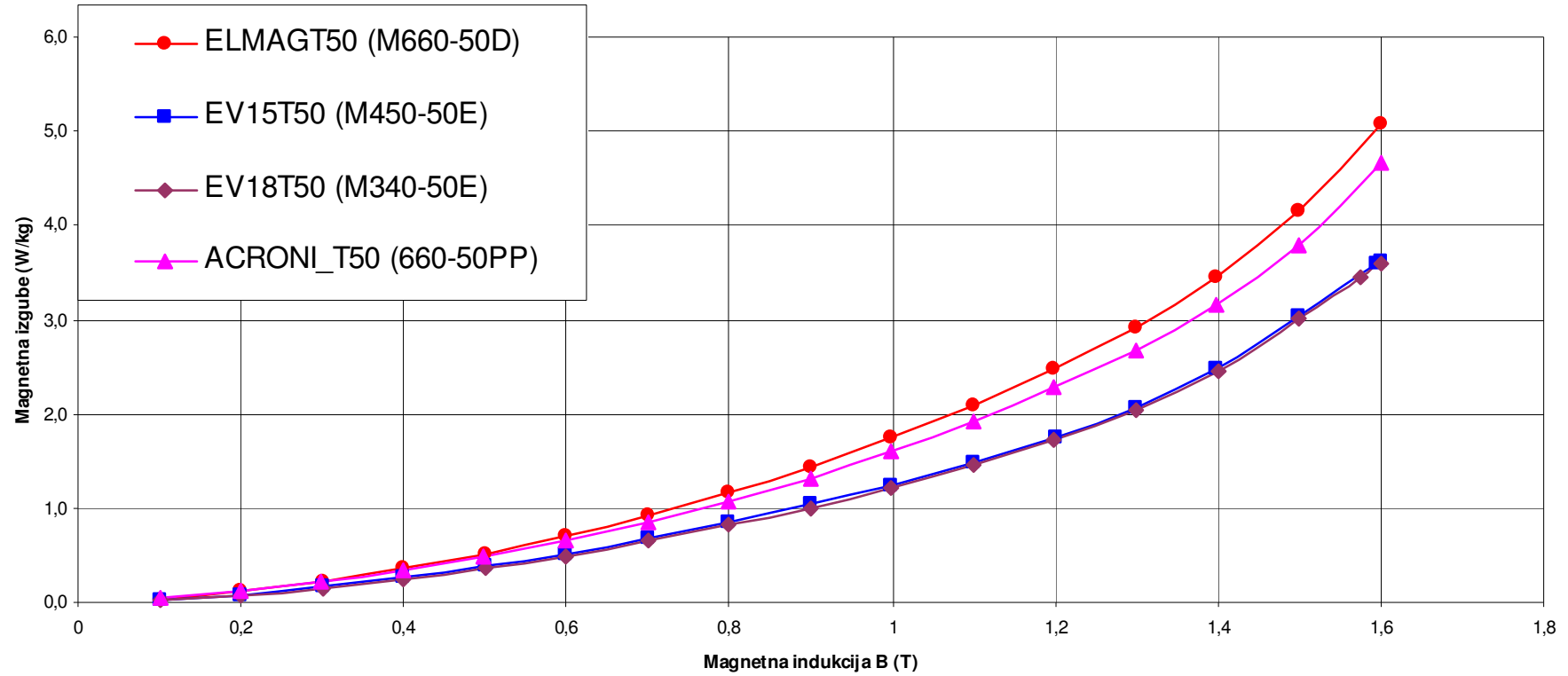
*magnetilna krivulja je skoraj stopničasta, saj doseže npr pri  $H = 1000 \text{ A/m}$  že  $B \approx 1,9 \text{ T}$ .*

### Relativna permeabilnost



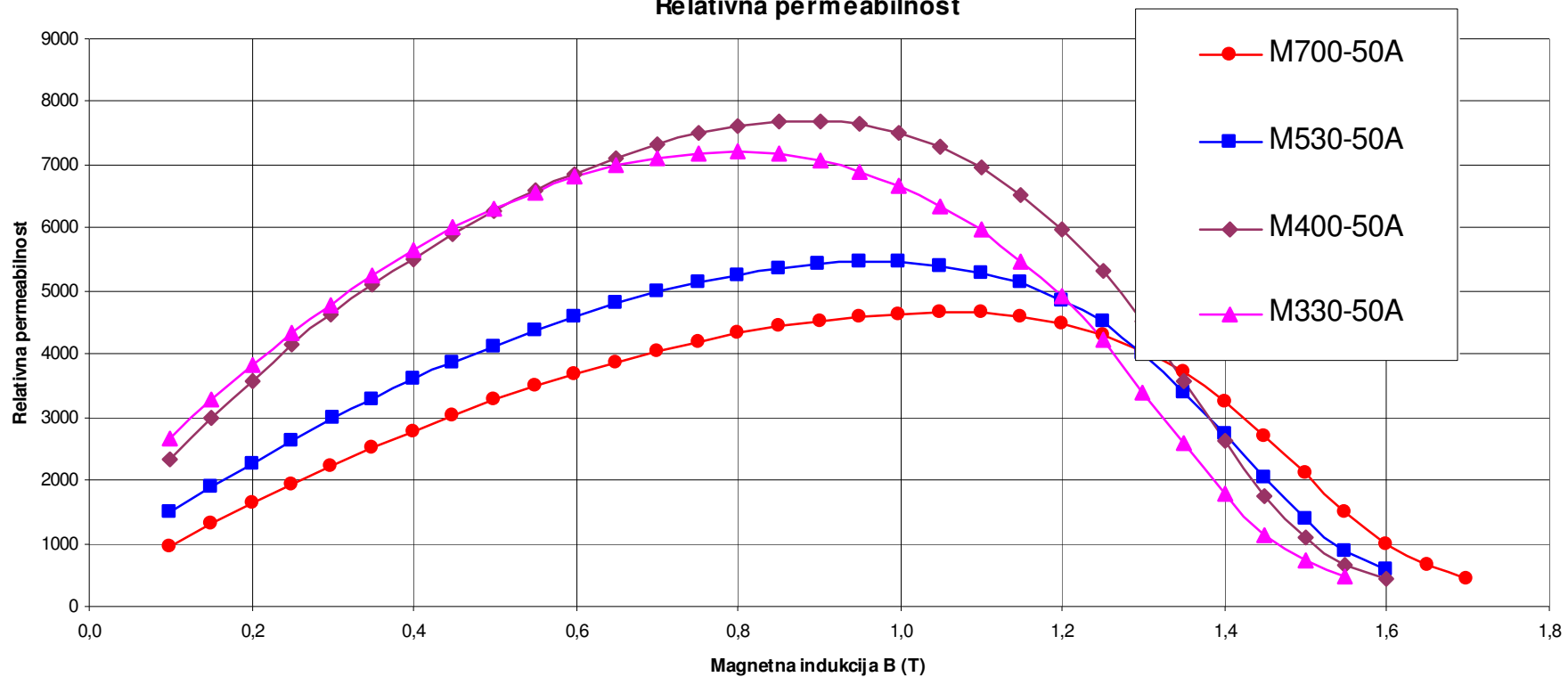
### Polgotova neorientirana magnetna pločevina

Krivulja izgub pri magnetenju

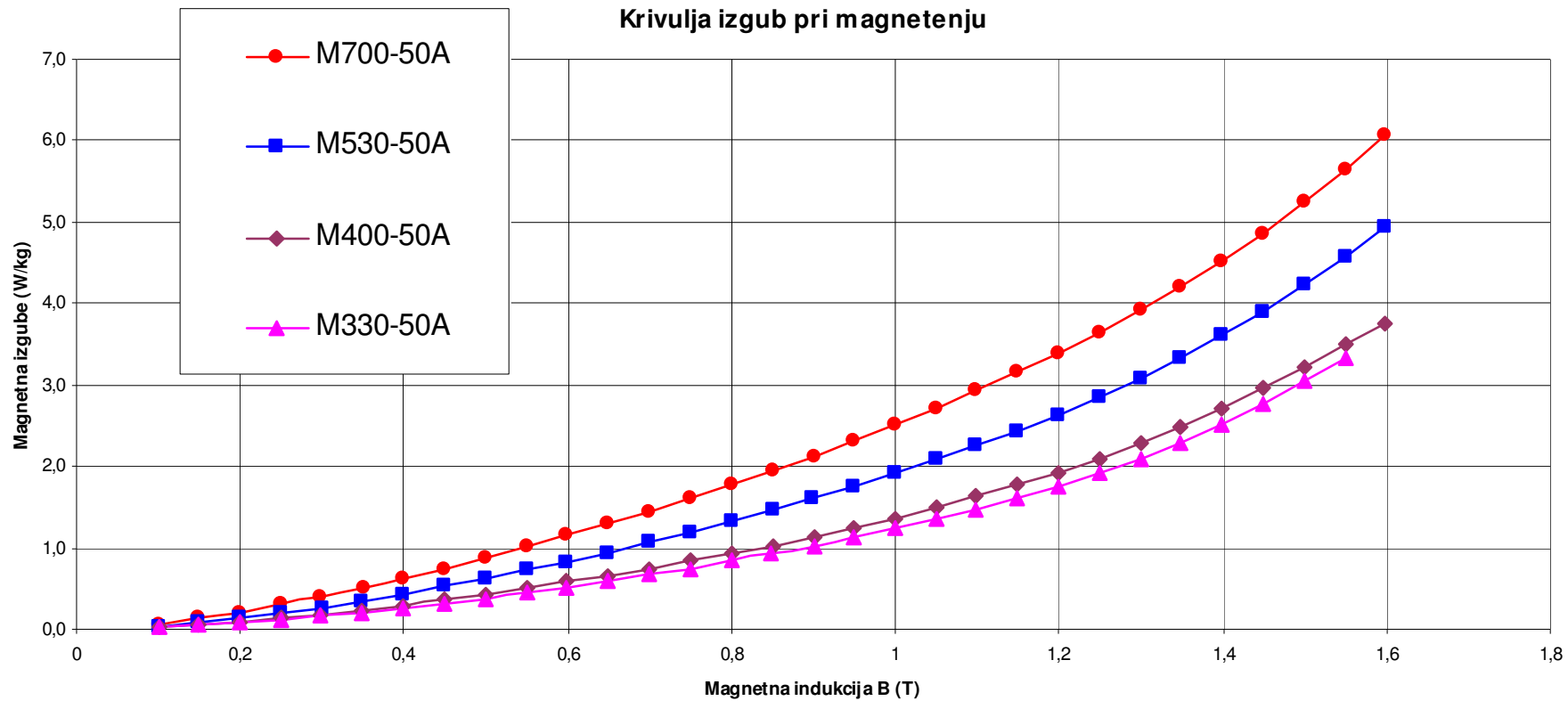


**Polgotova neorientirana magnetna pločevina**

Neorientirana končno žarjena elektropločevina  
Relativna permeabilnost



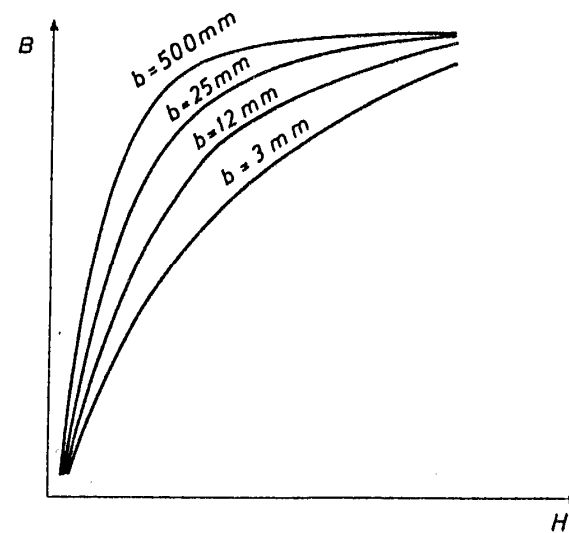
Neorientirana končno žarjena elektropločevina  
Krivulja izgub pri magnetenju



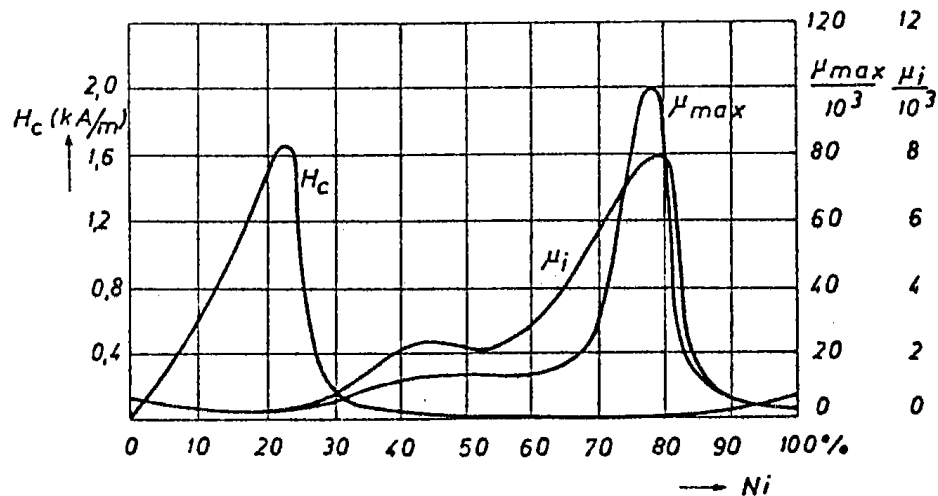
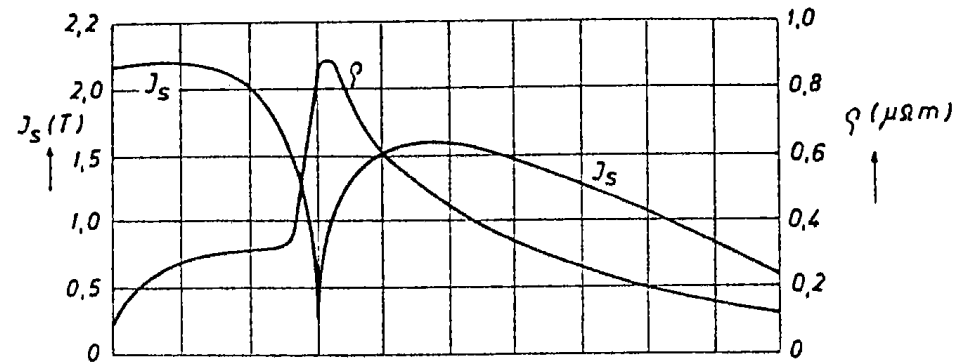
# Vpliv mehanske obdelave

## Mehanske lastnosti:

- robni efekt



# Zlitine FeNi



Zlitine FeNi (72-83%) imajo najvišje začetne permeabilnosti  $\mu_i$  in najmanjše  $H_c$ .

Primer: mumetall (Ni75Fe18Cu5Cr2) z  $\mu_4 = 50000$ ,  $H_c = 1,2 A/m$ ,  $\mu_{maks} = 100000$  in  $B_s = 0,78 T$ . Največjo začetno permeabilnost  $\mu_4 = 200000$  ima zlitina supermalloy.

Zlitine FeNi (54-68%) imajo kompromisne lastnosti.

Zlitinam FeNi (45-50%) se zelo spreminjajo lastnosti pod vplivom hladnega preoblikovanja in termičnih postopkov.

Zlitine FeNi (35-40%) so znane predvsem po relativno majhnih začetnih permeabilnosti in tudi po majhnih prirastkih permeabilnosti pri vzbujanju z zunanjim magnetnim poljem.

Zlitine FeNi 30% imajo Curiejeve temperature  $T_c$  zelo nizke, med 30°C in 120°C, njihova B-T karakteristika pa je linearna.