ČESKOSLOVENSKÁ SOCIALISTICKÁ REPUBLIKA

ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A OBJEVY

POPIS OBJEVU K DIPLOMU ČÍS. 18

Přihlášeno 18. 04. 74 (PO 22-74)
Práva přednosti od 22. 02. 72 (obhájení dizertace o názvu „Příspěvek ke studiu ferromagnetické hystereze ve více rozměrech", Univ. Sci. Med., Grenoble.
Zveřejněno ve vydané dizertační práci, L'Université Scientifique et Medicale de Grenoble, 1972; Sborník 3. prac. konf. čs. fyziků, Olomouc 1974; Sborník 4. prac. konf. čs. fyziků, Liberec 1975 (Academia Praha).
Uděleno 17. 12. 80
Vydáno 15. 12. 81

DT
539.2
621.318.2

Autor objevu: BLAŽEK ZDENĚK, in., CSc., PRAHA

Název objevu: **Anizotropní struktura odmagnetovaného stavu a její vliv na magnetickou polarizaci**

Předmět objevu: Zákonitost, spočívající ve stanovení závislosti hodnot počáteční susceptibility a Rayleighova koeficientu na úhlu mezi směrem odmagnetování střídavým magnetickým polem a směrem magnetování materiálu, přičemž součástí tohoto stanovení je rovněž určení vlivu maximální intenzity střídavého magnetického pole a určení souvislosti změn velikosti magnetické polarizace s anizotropní doménovou strukturou odmagnetovaného stavu vznikající působením střídavého magnetického pole, zjištěná u materiálů na bázi železa, které vykazují tři krystalografické směry snadného magnetování a ve kterých proces magnetování v Rayleighově oblasti probíhá posuvy Blochových stěn.

Objev charakterizuje závislost magnetické polarizace v Rayleighově oblasti na směru a amplitudě intenzity střídavého magnetického pole použitého k odmagnetování materiálu. Výsledky mají platnost pro polykrystalické feromagnetické materiály typu železa, které vykazují tři krystalografické směry snadného magnetování a ve kterých proces magnetování probíhá v Rayleighově oblasti posuvy Blochových stěn (příspěvek rotací vektorů magnetické polarizace je zanedbatelný).

Dosavadní práce o uvedené problematice zaznamenávají základní poznatek, že odlišné způsoby odmagnetování vedou k rozdílům v hodnotách počáteční susceptibility a v průběhu křivky prvotního magnetování. Výsledky se omezují na zjištění rozdílů mezi odmagnetováním ohřevem a odmagnetováním střídavým magnetickým polem a mezi odmagnetováním střídavým magnetickým polem rovnoběžným nebo kolmým vzhledem ke směru magnetování a měření. Byly předloženy hypotézy, že odmagnetování střídavým magnetickým polem vede k vytvoření určité magnetické anizotropie, nebyl však dosud vytvořen teoretický model, který by naměřené výsledky interpretoval a anizotropii přesněji charakterizoval. Navíc nebyly zatím získány ani dostatečně přesné experimentální hodnoty, které by pomohly určit zákonitosti jevu nebo mohly sloužit jako důkaz platnosti teorie, přestože práce různých autorů na toto téma vycházejí ve světě již přes třicet let. Přehled hlavních prací a výsledků o této problematice je podán například v knize E. Kneller: Ferromagnetismus, Springer Verlag (1962), kapitola 36.

Podstatou objevu je zjištění zákonitosti, která udává závislost počáteční susceptibility a Rayleighova koeficientu na úhlu mezi směrem odmagnetování střídavým magnetickým polem a směrem magnetování materiálu.

Je známo, že většina feromagnetických látek splňuje v oblasti magnetických polí, jejichž intenzita je podstatně menší než hodnota koercitivní síly, Rayleighovo pravidlo, které má pro křivku prvotního magnetování tvar

$$I = AH + BH^2 ,$$

kde I označuje magnetickou polarizaci, H intenzitu magnetického pole, A počáteční susceptibilitu a B Rayleighovu konstantu.

Křivka prvotního magnetování vychází z odmagnetovaného stavu, který vytvoříme například tím, že materiál vystavíme působení střídavého magnetického pole, jehož amplituda (intenzity) pozvolna klesá z počáteční maximální hodnoty k nule. Pro tento nejběžnější způsob odmagnetování budeme užívat zkrácený název střídavé odmagnetování.

Závislosti počáteční susceptibility a Rayleighova koeficientu na úhlu γ mezi směrem intenzity odmagnetujícího střídavého magnetického pole H_d a směrem intenzity stejnosměrného magnetického pole H použitého

k magnetování materiálu, jsou vyneseny na obr. 1 a 2. Závislosti jsou uvedeny v poměrných hodnotách, přičemž A^{II}, B^{II} označují počáteční susceptibilitu a Rayleighův koeficient po střídavém odmagnetování ve směru rovnoběžném se směrem magnetování, $A^{\perp}$, $B^{\perp}$ po odmagnetování ve směru kolmém a A^{γ}, B^{γ} pod odmagnetování ve směru, který svírá se směrem magnetování úhel γ.

K odvození teoretických závislostí byl zpracován teoretický model, ve kterém celková změna magnetické polarizace je počítána jako součet mikroskopických příspěvků všech posuvů Blochových stěn s přihlédnutím k prostorové orientaci domén vůči směru magnetického pole (intenzity) H. Z hlediska orientace domén je možno odmagnetovaný stav rozdělit na izotropní a anizotropní. V izotropním odmagnetovaném stavu je rozdělení orientací vektorů spontánní magnetické polarizace v doménách z makroskopického hlediska rovnoměrné do všech směrů. Odmagnetovaný stav, který je izotropní v rovině, je možno s dobrou aproximací experimentálně vytvořit například na vzorku tvaru plochého disku, který během střídavého odmagnetování rotuje kolem své osy. V anizotropním odmagnetovaném stavu, který vzniká po směrovém střídavém odmagnetování, se vektory spontánních magnetických polarizací v doménách orientují přednostně podle krystalografických směrů snadného magnetování, které jsou blízké ke směru H_d.

V ideálním krystalu Fe jsou tři krystalografické směry snadného magnetování energeticky ekvivalentní, avšak v reálném krystalu rozdílné lokální podmínky, zejména poruchy a interakce způsobují, že ekvivalence může být porušena a některý ze směrů je energeticky nejvýhodnější. Uvažujeme izotropní polykrystalický materiál jako soubor krystalických zrn, která jsou v prostoru orientována nahodile do všech směrů. V reálném polykrystalickém materiálu jsou oblasti, kde zejména z důvodu energetické neekvivalence směrů snadného magnetování v krystalických zrnech zaujímají spontánní magnetické polarizace v odmagnetovaném stavu vždy stejné směry, bez ohledu na směr odmagnetování. Souhrn těchto oblastí označujeme dále jako část neorientovatelnou. Ve druhé, orientovatelné části, zaujímají vektory magnetických polarizací při střídavém odmagnetování během procesu nukleace a rozšiřování domén přednostně směry snadného magnetování, které jsou blízké směru H_d.

Osy snadného magnetování v krystalických zrnech rozlišujeme indexy 1, 2, 3 v pořadí tak, aby pro úhly β_i, které svírají se směrem H_d, platilo $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$. S využitím těchto indexů rozdělujeme Blochovy stěny 180° a 90° do kategorií podle orientace domén, které v odmagnetovaném stavu oddělují. Například 1—1 znamená stěny 180° mezi doménami orientovanými antiparalelně ve

směru os 1 a 1—2 označuje 90° stěny oddělující domény s magnetickými polarizacemi podle os 1 a 2.

V izotropním odmagnetovaném stavu jsou stěny rozděleny z makroskopického hlediska do všech kategorií podle orientace rovnoměrně. Po střídavém odmagnetování je tato rovnováha porušena. Zvyšujeme-li počáteční maximální amplitudu intenzity H_d, vzrůstá podíl výhodně orientovaných domén, až při použití vysokých maximálních amplitud, které jsou vyšší než určitá kritická hodnota, zpravidla několikanásobně převyšující hodnotu koercitivní síly, dochází až k nasycení efektu charakterizovaného tím, že v orientovatelných částech zůstávají jen nejvýhodněji orientované stěny.

Za předpokladu uvedeného nasycení je možno se značnou přesností vypočítat vliv anizotropie odmagnetovaného stavu na velikosti počáteční susceptibility a Rayleighova koeficientu. Vycházíme z metody Néelova výpočtu vztahu mezi makroskopickými koeficienty A, B a mikroskopickými Rayleighovými koeficienty a, b, platnými pro magnetickou polarizaci, která vzniká pohybem průměrné Blochovy stěny. Do tohoto výpočtu zavádíme matematické vyjádření anizotropního rozdělení a rozlišení příspěvků 180° a 90° stěn. Anizotropní rozdělení charakterizujeme pravděpodobnostními funkcemi $P_i(\beta_i)$, které udávají pravděpodobné pořadí os snadného magnetování podle blízkosti jejich orientace ke směru H_d v závislosti na velikosti úhlů β_i. Tyto pravděpodobnosti převádíme do reprezentace vektorů

$$\vec{p}_{m,n} = \vec{j}_m - \vec{j}_n, \text{ kde } \vec{j}_m, \vec{j}_n$$

jsou spontánní polarizace sousedících domén a obdržíme tak charakteristiku anizotropie odmagnetovaného stavu z hlediska orientace Blochových stěn.

V případě anizotropního odmagnetovaného stavu dále rozlišujeme příspěvky posuvů stěn 180° a 90°, neboť jim odpovídají rozdílné $P(\beta)$ a je třeba jim připsat i rozdílné mikroskopické konstanty a, b. Makroskopická magnetická polarizace po střídavém odmagnetování, jehož směr svírá úhel γ se směrem magnetování, je vyjádřena vztahem

$$J^{\gamma}_{1H} = Ha_1 Q^{\gamma}_{1r} + H^2 b_1 Q^{\gamma}_{1ir}$$

$$J^{\gamma}_{2H} = Ha_2 Q^{\gamma}_{2r} + H^2 b_2 Q^{\gamma}_{2ir}$$

Výrazy s indexem 1 platí pro stěny 180°, s indexem 2 pro stěny 90°. Koeficienty Q^{γ} vyjadřují vliv anizotropie odmagnetovaného stavu. Například

$$Q^{\gamma}_{1ir} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^3\theta \, F_{1ir}(\theta, \gamma)\, d\theta$$

Indexy r, ir označují reversibilní a irreversibilní část magnetické polarizace. $F(\theta, \gamma)$ obsahují integrály normovaných pravděpodobnostních funkcí $P_n(\varphi, \theta, \gamma)$, které vystupují při výpočtu makroskopické magnetické polarizace integrací přes různé orientace makroskopických příspěvků. Například

$$F_{1ir} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P_{n1}(\varphi, \theta, \gamma) \sin^4\varphi \, d\varphi$$

Makroskopickou magnetickou polarizaci polykrystalického materiálu splňující Rayleighovo pravidlo dostáváme jako lineární kombinaci tří Rayleighových pravidel s odlišnými koeficienty. Dvě pro stěny 180° a 90° charakterizují orientovatelnou část a jedno neorientovatelnou část, kde není pro daný účel nutné typ stěn rozlišovat.

Porovnání teorie s experimentem je možné provést i bez znalosti vzájemného podílu počtu 180° a 90° stěn nebo podílů orientovatelné a neorientovatelné části. Experimentálně poměrně jednoduché je určení relativních změn velikostí počáteční susceptibility A a Rayleighova koeficientu B v závislosti na úhlu γ. Pro změny počáteční susceptibility z teoretického modelu vyplývá

$$\frac{A^{\gamma} - A^{\perp}}{A'' - A^{\perp}} = \frac{Q^{\gamma}_{1r} - Q^{\perp}_{1r}}{Q''_{1r} - Q^{\perp}_{1r}} = \frac{Q^{\gamma}_{2r} - Q^{\perp}_{2r}}{Q''_{2r} - Q^{\perp}_{2r}}$$

Relativní závislost je stejná pro stěny 180° i 90°. V případě relativních změn Rayleighovy konstanty

$$\frac{B^{\gamma} - B^{\perp}}{B'' - B^{\perp}}$$

je však průběh závislosti

$$\frac{Q^{\gamma}_{1ir} - Q^{\perp}_{1ir}}{Q''_{1ir} - Q^{\perp}_{1ir}}$$

pro stěny 180° poněkud odlišný od průběhu závislosti

$$\frac{Q^{\gamma}_{2ir} - Q^{\perp}_{2ir}}{Q''_{2ir} - Q^{\perp}_{2ir}}$$

pro stěny 90°.

Porovnání teoretických hodnot vypočítaných podle uvedených vztahů s experimen-

tálními výsledky ukazuje obr. 1 a 2. Experimentální závislosti byly získány přesným měřením na vzorku ve tvaru plochého disku z konstrukční oceli (složení C = 0,3 %, Ni = 4,3 %, Cr = 1,5 %, Mo = 0,5 %, zbytek Fe) s koercitivní silou 1,17 kA/m. Střídavé odmagnetování s maximální amplitudou dosahující až sedminásobek koercitivní síly a s frekvencí 50 Hz bylo provedeno v různých směrech v rovině disku a magnetická polarizace byla měřena citlivým elektronickým fluxmetrem. Naměřené závislosti hodnot A, B ne velikosti maximální amplitudy H_d pro různé úhly jsou vyneseny na obr. 3 a 4. A^r, B^r označují hodnoty pro výchozí odmagnetovaný stav, získaný střídavým odmagnetováním, při kterém disk rotuje kolem osy rotace. Při maximální počáteční amplitudě dosahující přibližně trojnásobek koercitivní síly dochází k nasycení anizotropie, neboť při dalším zvyšování této amplitudy se již hodnoty A, B prakticky nemění.

Z průběhu křivek na obr. 1 a 2 je zřejmá velmi dobrá shoda naměřených závislostí s výpočtem. V případě počáteční susceptibility relativní rozdíl mezi teorií a experimentem nepřesahuje nikde 7 %. V případě Rayleighova koeficientu leží experimentální křivka mezi oběma teoretickými mezemi vypočítanými pro domény 180° a 90°.

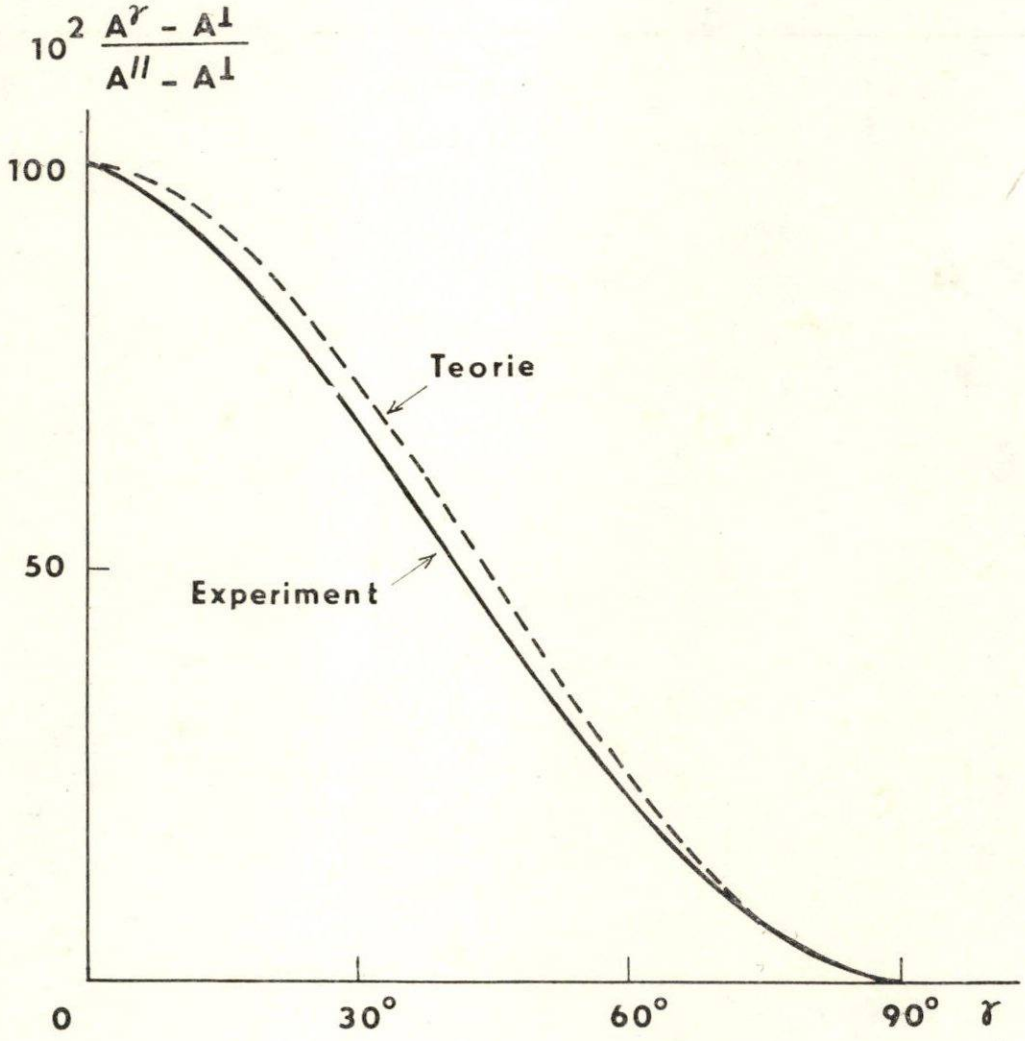
Poznatky objevu jsou kromě přínosu pro základní výzkum procesů magnetování, hysterezních jevů a doménové struktury využitelné i v technické praxi.

Nové poznatky o odmagnetování umožňují zpřesnit magnetická měření, která vycházejí z odmagnetovaného stavu, a zvýšit jejich reprodukovatelnost. Jsou proto již uplatňovány při novelizaci některých norem z oboru metod stanovení magnetických charakteristik, kde se přesněji určují podmínky pro odmagnetování.

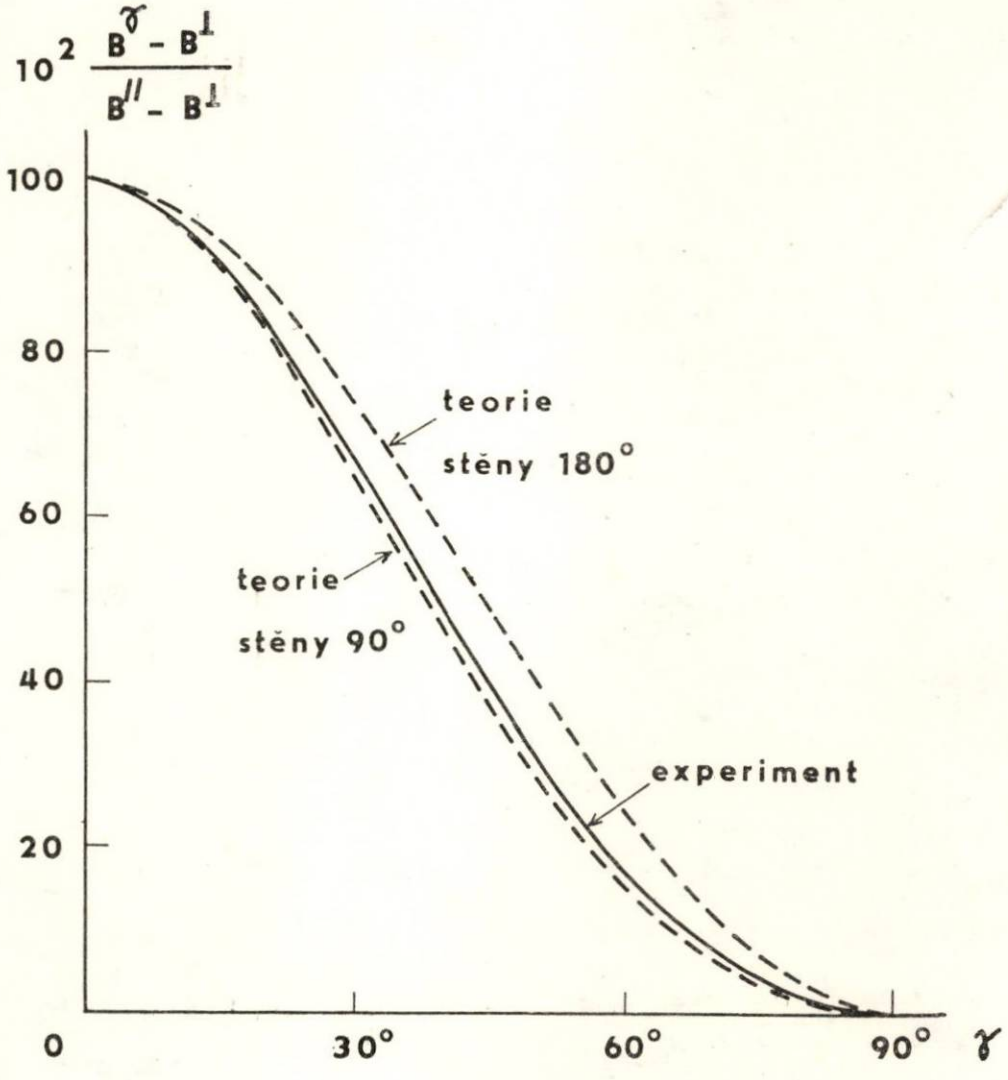
Protože anizotropní struktura odmagnetovaného stavu závisí výrazně na přítomnosti vnitřních pnutí, je možno využít poznatky objevu o zákonitostech anizotropie a magnetizace ve slabých magnetických polích pro studium vnitřní napjatosti materiálu. Za tím účelem je v současné době zpracována původní nedestruktivní metoda zjišťování vnitřních pnutí v materiálech na bázi železa nebo niklu, která umožňuje zaznamenávat přítomnost pnutí i uvnitř rozměrných předmětů.

Další využití je možné při výzkumu geomagnetismu a zbytkového magnetismu hornin, dále pro zjišťování různých druhů poruch v monokrystalech i polykrystalických materiálech a při vývoji speciálních metod odmagnetování výrobků složitých tvarů, kde dosavadní způsoby odmagnetování jsou méně účinné nebo nevyhovující. Perspektivně lze využít poznatky objevu v elektrotechnice pro vývoj materiálů s magnetickou anizotropií a pro zlepšení využití feromagnetických materiálů pracujících v oblasti počáteční permeability a slabých magnetických polí.

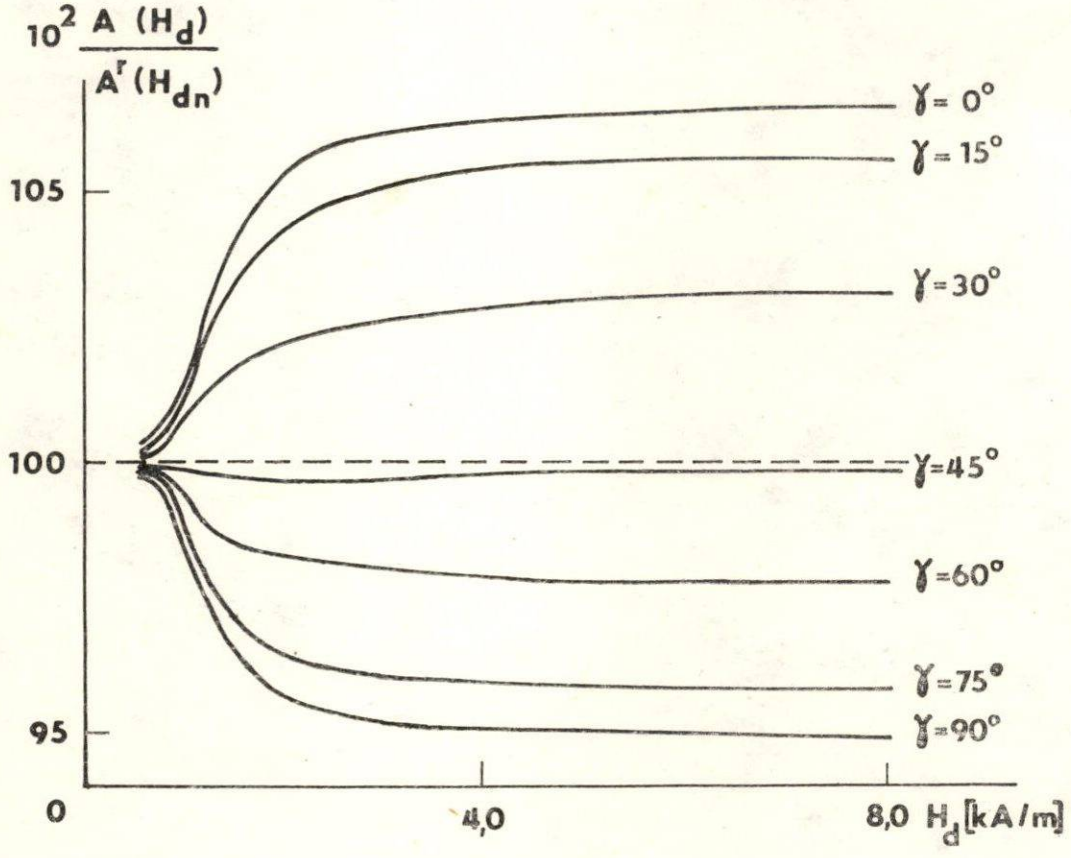
Severografia, n. p., závod 7, most


$10^2 \frac{A^\gamma - A^\perp}{A^{//} - A^\perp}$
100
50
0
30°
60°
90°
γ
Teorie
Experiment

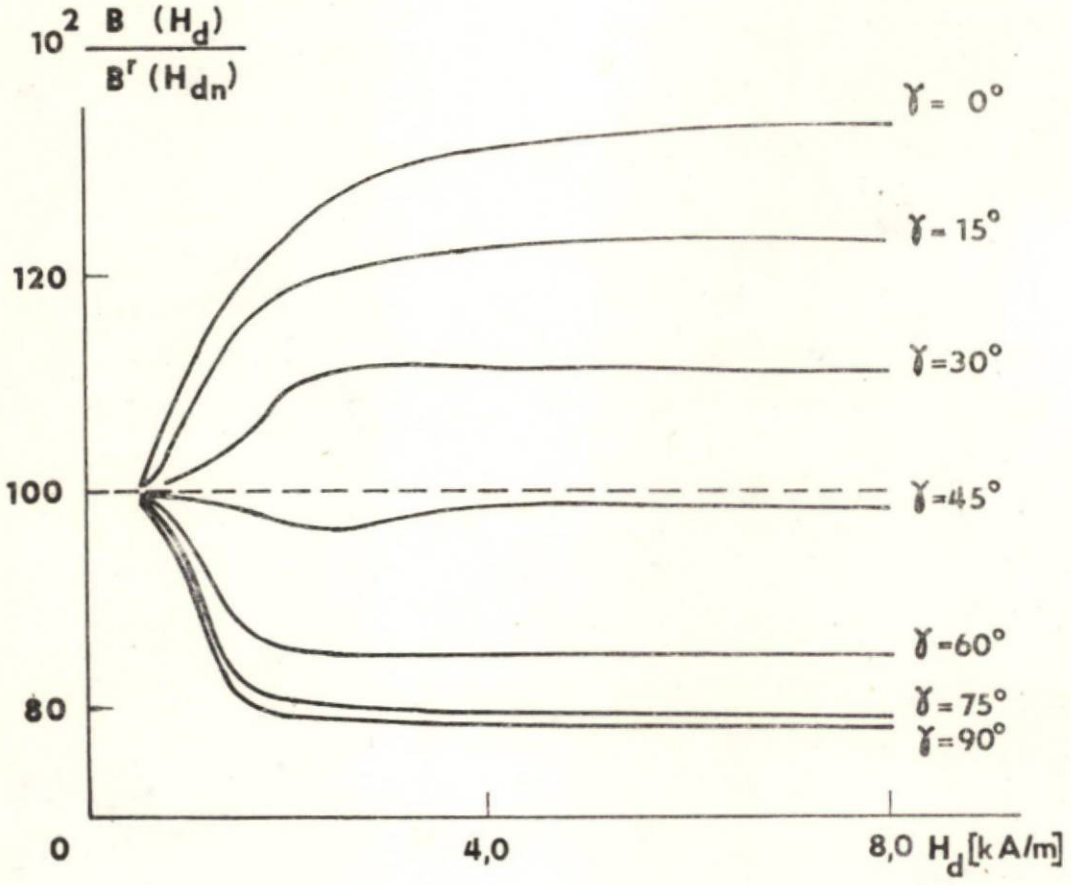
OBR. 1


$10^2 \frac{B^{\gamma} - B^{\perp}}{B^{//} - B^{\perp}}$
100
80
60
40
20
0
30°
60°
90°
γ
teorie
stěny 180°
teorie
stěny 90°
experiment

OBR. 2


$10^2 \frac{A(H_d)}{A^r(H_{dn})}$
105
100
95
0
4,0
8,0 H_d[kA/m]
γ= 0°
γ= 15°
γ=30°
γ=45°
γ=60°
γ=75°
γ=90°

Obr. 3


$10^2 \frac{B\ (H_d)}{B^r\ (H_{dn})}$
120
100
80
0
4,0
8,0 H_d[kA/m]
γ = 0°
γ = 15°
γ = 30°
γ = 45°
γ = 60°
γ = 75°
γ = 90°

Obr. 4