

Vladimír Hajko

Štúdium procesu premagnetúvania tyčových vzoriek

*Matematicko-fyzikálny časopis*, Vol. 7 (1957), No. 1, 16--24

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/127021>

## Terms of use:

© Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, 1957

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

## ŠTÚDIUM PROCESU PREMAGNETÚVANIA TYČOVÝCH VZORIEK

VLADIMÍR HAJKO, JURAJ DANIEL-SZABÓ

Katedra fyziky Vysokej školy technickej v Košiciach

VENOVANÉ  
K 50. NARODENINÁM AKADEMIKA DJONÝZA ILKOVIČA

### Úvod

Pri vyšetovaní magnetických vlastností feromagnetických materiálov sa často stretávame s magnetickými meraniami na tyčových vzorkách. Po zmagnetovaní tyčovej vzorky v homogénnom spojitom sa zväčšujúcom magnetickom poli so smerom spadajúcim do smeru dĺžky tyče sa pri premagnetúvaní vzorky pozdĺž klesajúcej vetvy hysteréznej slučky obvykle predpokladá, že pri určitej zápornej hodnote vonkajšieho magnetického poľa, ktorá sa stotožňuje s koerzitívnou silou, vzorka sa vyznačuje nulovou hodnotou magnetizácie pozdĺž celej svojej dĺžky. Autori [1] v súvislosti s osvetlovaním zvláštneho charakteru hysterézie stredového (balistického) demagnetizačného faktora poukázali na neoprávnenosť uvedeného predpokladu. Účelom tejto práce je podrobne osvetliť charakter procesu premagnetúvania tyčových vzoriek experimentálnym vyšetrením rozloženia magnetickej indukcie, magnetizácie a intenzity magnetického poľa pozdĺž tyče v jednotlivých stavoch, odpovedajúcich rôznym miestam klesajúcej vetvy hysteréznej slučky.

S procesom premagnetúvania tyčových vzoriek do značnej miery súvisí zjav hysterézie demagnetizačného faktora. Hysteréziu stredového demagnetizačného faktora objavili a jej priebeh opísali najprv Janus, Drožžina a Šabalina [2], neskôr Lustrova a Lipatova [3], ako aj Matěna [4]. Účelom tejto práce okrem uvedeného je vyšetriť priebeh hysterézie nielen stredového demagnetizačného faktora, ale aj demagnetizačných faktorov prislúchajúcich jednotlivým miestam pozdĺž tyče, najmä na konci tyče.

Tabuľka 1

$H_e$ v Oe	$B_0$ v G	$B/B_0$					
		0,0 l*	0,2 l	0,4 l	0,6 l	0,8 l	0,95 l
117,6	14 475	1,00	0,97	0,90	0,75	0,52	0,24
88,2	13 430	1,00	0,97	0,88	0,71	0,49	0,21
58,8	9 847	1,00	0,96	0,87	0,70	0,47	0,21
29,4	5 029	1,00	0,97	0,88	0,72	0,49	0,21
9,8	1 906	1,00	0,98	0,89	0,71	0,47	0,20
0,0	353,3	1,00	0,96	0,86	0,70	0,44	0,17
0,98	197,6	1,00	0,94	0,84	0,67	0,43	0,17
1,47	119,9	1,00	0,96	0,84	0,63	0,41	0,16
1,77	76,0	1,00	0,95	0,80	0,60	0,35	0,10
1,96	46,4	1,00	0,88	0,72	0,53	0,29	0,06
2,06	21,4	1,00	0,90	0,73	0,48	0,14	-0,01
2,16	7,5	1,00	0,92	0,67	0,22	-0,21	-0,65
2,27	10,0	-1,00	-1,12	-1,19	-1,32	-1,20	-0,61
2,94	118,2	-1,00	-0,96	-0,88	-0,73	-0,50	-0,19
4,90	423,7	-1,00	-0,96	-0,87	-0,72	-0,48	-0,19
9,80	1 215	-1,00	-0,99	-0,90	-0,73	-0,50	-0,23
29,4	4 353	-1,00	-0,97	-0,87	-0,71	-0,48	-0,21
59,0	8 833	-1,00	-0,97	-0,88	-0,71	-0,49	-0,22
88,2	12 546	-1,00	-0,97	-0,89	-0,72	-0,49	-0,22
117,6	14 486	-1,00	-0,98	-0,90	-0,75	-0,52	-0,25

\* Dĺžka tyče = 2 l.

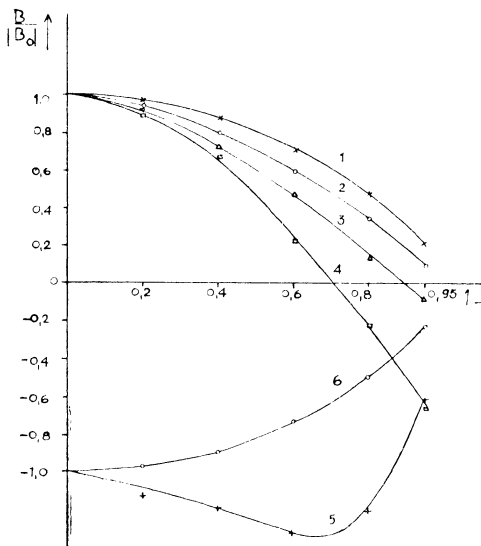
### Metóda merania

Merania sa robili na ocelevej valcovej tyči o koercitívnej sile  $H_e = 2.40$  Oe. o dĺžke 20 cm a priemere 1 cm balistickou metódou, a to strhávaním úzkej cievky z jednotlivých miest pozdĺž tyče pri rôznych magnetických stavoch tyče, odpovedajúcich príslušným bodom klesajúcej vetvy hysteréznej slučky. Takýmto spôsobom sa získalo rozloženie magnetickej indukcie pozdĺž tyče v jednotlivých vyšetrovaných stavoch. Aby bolo možno z nameraných hodnôt indukcie nájsť rozloženie magnetizácie a intenzity magnetického poľa pozdĺž tyče v jednotlivých vyšetrovaných stavoch, použili sme na určenie pravej hysteréznej slučky materiálu tyče rotačný elipsoid z tohože materiálu, pričom podiel veľkej polosi k malej polosi elipsoidu bol  $p = a/b = 20$ . Hodnota demagnetizačného faktora prislúchajúca tomuto elipsoidu je  $N = 0.0848$ . Z tab. 1 vyjadrujúcej rozloženie magnetickej indukcie pozdĺž tyče plynie, že toto rozloženie je nehomogénne. Odpovedá teda maximálnej hodnote vonkajšieho magnetického poľa  $H_e$  v jednotlivých miestach pozdĺž tyče rôzna hodnota magnetickej indukcie, a to smerom ku koncu tyče vždy menšia. Z toho je zrejmé, že premagnetúvanie v jednotlivých miestach tyče prebieha po hysteréznych slučkách s rôznou hodnotou maximálnej indukcie, odpovedajúcej vrcholu slučky. Určili sme preto meraniami na elipsoide pravé hysterézne slučky odpovedajúce rôznym hodnotám maximálnej indukcie ako

vrcholu slučky a interpoláciou sme určili pravé hysterézne slučky, po ktorých prebiehal proces premagnetúvania v nami vyšetovaných miestach pozdĺž tyče. Pomocou týchto slučiek bolo možno z rozloženia magnetickej indukcie v jednotlivých stavoch ľahko určiť týmto stavom odpovedajúce rozloženia intenzity magnetickeho poľa a magnetizácie pozdĺž tyče. Zo vzťahu  $H = H_e - NJ$  bolo možno určiť aj hodnoty demagnetizačných faktorov v jednotlivých miestach tyče.

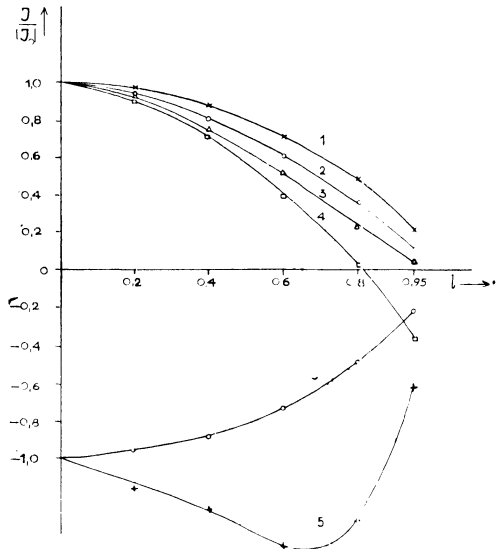
### Výsledky meraní a ich hodnotenie

Uvedenou metódou získané rozloženia magnetickej indukcie pozdĺž tyče, odpovedajúce jednotlivým magnetickým stavom tyče pri postupe po klesajúcej vetve hysteréznej slučky, sú uvedené v tab. 1 a sčasti znázornené na obr. 1. Na tomto obraze je graficky vyjadrená závislosť  $B/|B_0|$  od vzdialenosti od stredu tyče, pričom  $B_0$  znamená vo vyšetovanom magnetickom stave tyče hodnotu indukcie v strede tyče a  $B$  hodnotu indukcie v príslušnej vzdialenosti od stredu tyče. Z meraní vyplýva, že rozloženie magnetickej indukcie pozdĺž tyče je vo všetkých vyšetovaných stavoch nehomogénne a že pri



Obr. 1.

Krivka	$H_e$ v Oe	$B_0$ v G
1	88,2	13 430
2	1,77	76
3	2,06	21,4
4	2,16	7,5
5	2,27	10,0
6	88,2	12 546



Obr. 2.

Krivka	$H_e$ v Oe	$J_0$ v G
1	88,2	1066,0
2	1,77	6,2
3	2,06	1,9
4	2,16	0,8
5	2,27	0,6
6	88,2	996,0

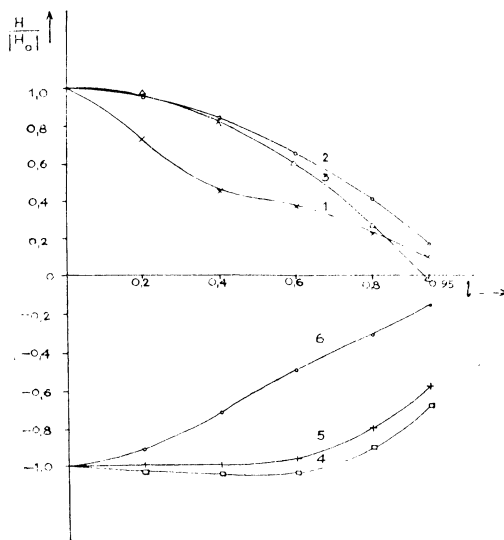
určitej hodnote záporného vonkajšieho poľa prechádza magnetická indukcia nulou do záporných hodnôt najprv na koncoch tyče a až pri ďalšom zvyšovaní hodnoty záporného poľa prechádza magnetická indukcia nulou do záporných hodnôt postupne v ostatných miestach smerom ku stredu tyče, ako to autori už prv zistili na tyči z iného magnetického materiálu [1].

V tab. 2 je vyjadrené a na obr. 2 sčasti znázornené rozloženie magnetizácie pozdĺž tyče, a to v magnetických stavoch, ktorým odpovedajú rozloženia magnetickej indukcie uvedené v tab. 1. Aj na obr. 2 je znázornená závislosť  $J/|J_0|$ , kde  $J$  a  $J_0$  majú podobný význam ako  $B$  a  $B_0$  na obr. 1. Z tab. 2 a z kriviek na obr. 2 je zrejmé, že rozloženie magnetizácie pozdĺž tyče má v jednotlivých vyšetrovaných stavoch podobný charakter ako rozloženie magnetickej indukcie.

Rozloženie intenzity magnetického poľa  $H$  pozdĺž tyče v jednotlivých magnetických stavoch je vyjadrené v tab. 3 a sčasti znázornené na obr. 3. Charakter rozloženia intenzity magnetického poľa pozdĺž tyče, ako vidieť, je do istej miery podobný charakteru rozloženia indukcie a magnetizácie. Aj intenzita magnetického poľa prechádza nulou do záporných hodnôt v jednotlivých miestach tyče postupne počínajúc koncami tyče pri rôznych hodnotách

klesajúceho vonkajšieho magnetického poľa. No kým prechod indukcie a magnetizácie nulou do záporných hodnôt v jednotlivých miestach tyče prebieha pri záporných hodnotách vonkajšieho poľa, prechod intenzity magnetického poľa nulou do záporných hodnôt v príslušných miestach tyče prebieha už pri kladných hodnotách vonkajšieho magnetického poľa.

Zo všetkých troch tabuliek a obrázkov vidieť, že v oblasti prechodu príslušnej veličiny (indukcie, magnetizácie, poľa) z kladných hodnôt do záporných je relatívne rozloženie príslušnej veličiny pozdĺž tyče značne odlišné od relatívneho rozloženia tejto veličiny v magnetických stavoch tyče vzdialených od uvedenej oblasti prechodu, t. j. v stavoch, ktorým odpovedajú väčšie hodnoty príslušnej veličiny v jednotlivých miestach tyče.



Obr. 3.

Krivka	$H_r$ v Oe	$H_0$ v Oe
1	88,2	33,6
2	58,8	8,90
3	29,4	3,35
4	0,0	1,95
5	2,06	2,39
6	88,2	31,2

Tabuľka 2

$H_c$ v Oe	$J_0$ v G	$J/J_0$					
		0,0 $l^*$	0,2 $l$	0,4 $l$	0,6 $l$	0,8 $l$	0,95 $l$
117,6	1146,2	1,00	0,97	0,90	0,75	0,52	0,24
88,2	1065,9	1,00	0,97	0,88	0,71	0,49	0,21
58,8	782,9	1,00	0,96	0,87	0,70	0,47	0,21
29,4	399,9	1,00	0,97	0,88	0,72	0,49	0,21
9,8	151,7	1,00	0,98	0,88	0,71	0,45	0,20
0,0	28,2	1,00	0,96	0,86	0,69	0,44	0,17
-0,98	15,9	1,00	0,94	0,84	0,67	0,43	0,17
-1,47	9,72	1,00	0,96	0,84	0,64	0,41	0,17
-1,77	6,24	1,00	0,95	0,81	0,61	0,36	0,11
-1,96	3,88	1,00	0,88	0,73	0,55	0,31	0,08
-2,06	1,89	1,00	-0,91	0,75	0,52	0,20	0,05
-2,16	0,78	1,00	0,94	0,71	0,40	0,03	-0,36
-2,27	-0,60	-1,00	-1,17	-1,27	-1,47	-1,35	-0,62
-2,94	-9,20	-1,00	-0,96	-0,88	-0,73	-0,49	-0,18
-4,90	-33,5	-1,00	-0,96	-0,87	-0,71	-0,48	-0,19
-9,80	-96,4	-1,00	-0,99	-0,90	-0,73	-0,50	-0,22
-29,4	-345,7	-1,00	-0,97	-0,87	-0,71	-0,48	-0,21
-59,0	-701,6	-1,00	-0,97	-0,88	-0,71	-0,49	-0,22
-88,2	-995,9	-1,00	-0,97	-0,89	-0,72	0,49	-0,22

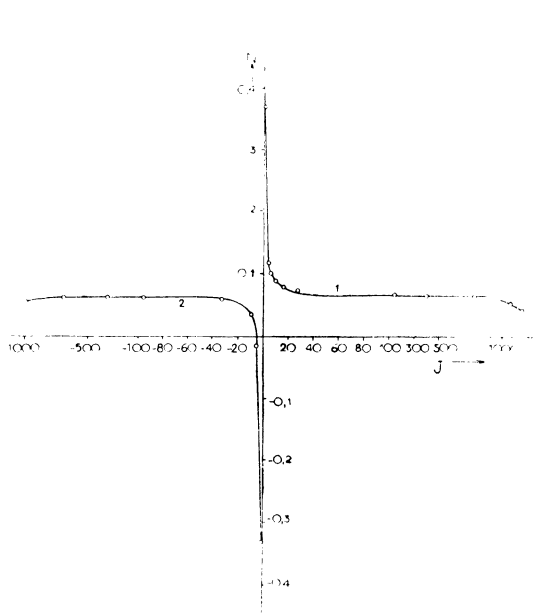
\* Dĺžka tyče =  $2l$ .

Tabuľka 3

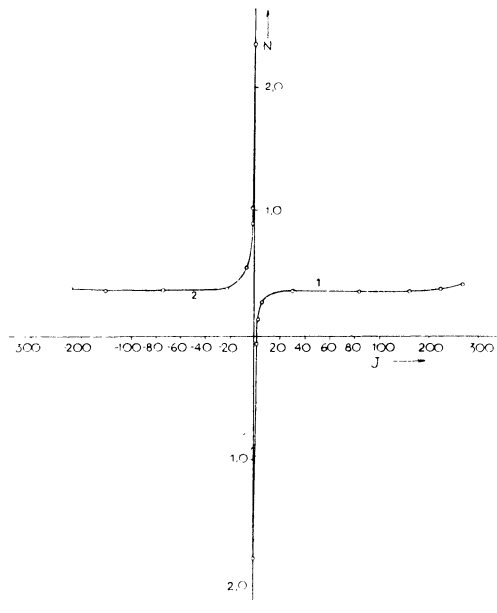
$H_c$ v Oe	$H_0$ v Oe	$H/H_0$					
		0,0 $l^*$	0,2 $l$	0,4 $l$	0,6 $l$	0,8 $l$	0,95 $l$
117,6	71,4	1,00	0,83	0,53	0,28	0,16	0,08
88,2	33,6	1,00	0,71	0,43	0,35	0,21	0,10
58,8	8,90	1,00	0,95	0,84	0,65	0,41	0,17
29,4	3,35	1,00	1,00	0,82	0,61	0,28	-0,02
9,8	-0,15	-1,00	-1,20	-2,53	-4,73	-6,27	-6,00
0,0	-1,95	-1,00	1,02	-1,04	-1,03	-0,90	-0,67
-0,98	-2,17	-1,00	-1,01	-1,01	-0,99	-0,84	-0,62
-1,47	-2,27	-1,00	-1,00	-1,00	-0,97	-0,82	-0,60
-1,77	-2,32	-1,00	1,00	-1,00	-0,97	-0,82	-0,60
-1,96	-2,36	-1,00	1,00	-0,99	-0,96	-0,80	-0,59
-2,06	-2,39	-1,00	-1,00	-0,99	-0,96	-0,80	-0,58
-2,16	-2,41	-1,00	-1,00	-0,99	-0,95	-0,80	-0,58
-2,27	-2,43	-1,00	-1,00	-0,99	-0,95	-0,79	-0,58
-2,94	-2,56	-1,00	-0,99	-0,98	-0,94	-0,77	-0,56
-4,90	-2,93	-1,00	-0,99	-0,96	-0,91	-0,73	-0,51
-9,80	-3,89	-1,00	-0,99	-0,95	-0,86	-0,67	-0,45
-29,4	-8,4	-1,00	-0,95	-0,86	-0,70	-0,49	-0,29
-59,0	-16,2	-1,00	-0,95	-0,82	-0,62	-0,41	-0,22
-88,2	-31,1	-1,00	0,91	-0,71	-0,48	-0,31	0,15

\* Dĺžka tyče =  $2l$ .

Na obr. 4 je znázornená závislosť  $N = N(J)$  v strede tyče pri postupe po klesajúcej vetve hysteréznej slučky.<sup>1</sup> Z obrazu je zrejмый charakter hysterézie stredového demagnetizačného faktora, ktorý je typický tým, že pri  $J = 0$  je  $N = +\infty$ , t. j. pri prechode magnetizácie nulou doznáva hodnota stredového demagnetizačného faktora skok z  $+\infty$  do  $-\infty$ . Ako výpočty ukázali, podobným priebehom hysterézie vyznačujú sa aj demagnetizačné faktory v miestach mimo stred, od stredy však nie príliš vzdialených. Naproti tomu je charakter hysterézie demagnetizačného faktora na konci tyče a v miestach



Obr. 4.



Obr. 5.

nie príliš vzdialených od konca tyče práve opačný ako charakter hysterézie stredového demagnetizačného faktora. Na obr. 5 je znázornená závislosť  $N = N(J)$  pre miesto vo vzdialenosti  $0,95l$  od stredy tyče, kde  $l$  značí polovičnú dĺžku tyče, a to pri postupe po klesajúcej vetve hysteréznej slučky. Vidieť, že pri poklese  $J$  z kladných hodnôt k nule hodnota demagnetizačného faktora v uvedenom mieste postupne klesá a pri  $J \rightarrow 0$  je  $N \rightarrow -\infty$  (vetva 1). Pri prechode magnetizácie nulou doznáva hodnota demagnetizačného faktora v tomto mieste skok z  $-\infty$  na  $+\infty$  a pri raste záporných hodnôt magnetizácie nadobúda demagnetizačný faktor postupne pôvodnú hodnotu, z ktorej sa pri počiatočnej kladnej hodnote magnetizácie vychádzalo (vetva 2).

<sup>1</sup> Kvôli prehľadnosti sa na obr. 4 a 5 použila na osi  $J$  iná mierka pre magnetizácie do 100 abs. j. ako pre väčšie hodnoty magnetizácie.

## Záver

Vyšetrenie rozloženia magnetickej indukcie, magnetizácie a intenzity magnetického poľa pozdĺž tyče v jednotlivých magnetických stavoch, odpovedajúcich rôznym bodom klesajúcej vetvy hysteréznej slučky, umožňuje uzatvárať, že sa proces premagnetúvania tyčových vzoriek v homogénnom postupe klesajúcom a do záporných hodnôt prechádzajúcom vonkajšom magnetickom poli makroskopicky prejavuje takto: Pri určitej hodnote postupne rastúceho záporného poľa objavujú sa na koncoch tyče makroskopické oblasti, ktoré sa vyznačujú opačným smerom magnetizácie ako zvyšujúca stredná časť tyče. Tieto makroskopické oblasti s opačnou magnetizáciou pri zvyšovaní hodnoty záporného vonkajšieho poľa postupne narastajú na úkor oblasti s magnetizáciou pôvodného smeru v strede tyče, až pri určitej hodnote záporného vonkajšieho poľa oblasť s magnetizáciou pôvodného smeru v strede tyče celkom vymizne a tyč pozdĺž celej svojej dĺžky sa vyznačuje magnetizáciou rovnakého smeru, opačného voči smeru pôvodnému.

V tomto osobitnom charaktere procesu premagnetúvania tyčových vzoriek zaiste spočíva aj podstata existencie a zvláštného charakteru hysterézie demagnetizačného faktora. Ukázalo sa, že charakter hysterézie demagnetizačného faktora v jednotlivých miestach tyče nie je rovnaký. V strede tyče a v miestach od stredu nie príliš vzdialených pri poklese magnetizácie na nulu rastie demagnetizačný faktor do nekonečna a po prechode magnetizácie nulou doznáva skok z  $+\infty$  na  $-\infty$ . Naproti tomu na konci tyče a v miestach od konca tyče nie príliš vzdialených demagnetizačný faktor pri poklese magnetizácie na nulu klesá a ide k  $-\infty$ , po prechode magnetizácie nulou do záporných hodnôt doznáva skok z  $-\infty$  na  $+\infty$ . Osobitnú pozornosť si bude vyžadovať vyšetrenie vlastností demagnetizačného faktora v miestach tyče, kde dochádza k zmene charakteru hysterézie demagnetizačného faktora z typu znázorneného na obr. 4 na typ znázornený na obr. 5.<sup>2</sup>

## LITERATÚRA

1. Hajko Vl., Daniel-Szabó J., Čs. čas. fys. 6, 1956, 352. 2. Janus R. J., Drožžina V. J., Šabalina E. F., Sbornik posviaščennyj semidesiatiletu akademika A. I. Ioffe, Moskva 1950, 411. 3. Eustrova A. P., Lipatova V. A., ŽTF, 1954, 1513. 4. Matěna Vl., Čs. čas. fys. 5, 1955, 401.

Došlo 10. 9. 1956.

<sup>2</sup> Záverom ďakujeme dr. L. Valentovi za plodnú diskusiu k uvedenej problematike, dr. J. Brožovi a dr. J. Šternberkovi za zapožičanie valcovej a elipsoidálnej vzorky, na ktorých sa robili merania, a A. Wintnerovi za pomoc pri meraniach.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

ВЛАДИМИР ГАЙКО, ЮРИЙ ДАНИЕЛ-САБО

## Выводы

В работе освещается характер процесса перемагничивания стержневых образцов экспериментальным исследованием разложения магнитной индукции, намагниченности и напряженности магнитного поля по длине стержня в магнитных состояниях, отвечающих отдельным местам по длине нисходящей ветви петли гистерезиса. Из результатов измерений, выраженных на таблицах 1, 2, 3, и частично изображенных на рис. 1, 2, 3, можно заключить, что процесс перемагничивания стержневых образцов в однородном, постепенно убывающем и до отрицательных величин переходящем внешнем магнитном поле, макроскопически проявляется следующим образом: при определенной величине, постепенно нарастающего отрицательного поля, появляются на концах стержня макроскопические области, проявляющиеся в обратном направлении намагниченности, чем остающаяся средняя часть стержня. Эти макроскопические области, с обратной намагниченностью, постепенно при повышении величины отрицательного внешнего поля увеличиваются за счет области с намагниченностью начального направления в середине стержня и при определенной величине отрицательного внешнего поля, область с намагниченностью начального направления в середине стержня, вполне исчезает, а стержень по всей длине проявляется намагниченностью того же направления, противоположного к первоначальному направлению.

С процессом перемагничивания стержневых образцов, до известной степени связано явление гистерезиса размагничивающего фактора. В работе указывается, что ход гистерезиса размагничивающего фактора, в местах близких к концу стержня (рис. 5), имеет обратный характер чем ход гистерезиса размагничивающего фактора в середине стержня (рис. 4).

# ÜBER DEN UMMAGNETISIERUNGSPROZESS DER FERROMAGNETISCHEN STÄBE

VLADIMÍR HAJKO, JURAJ DANIEL-SZABÓ

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Charakter des Ummagnetisierungsprozesses der ferromagnetischen Stäbe durch experimentale Untersuchung der Zerlegung der magnetischen Induktion, Magnetisierung und Intensität des magnetischen Feldes längs des Stabes in den magnetischen Zuständen, die den einzelnen Stellen längs dem absteigenden Ast der Hysteresisschleife zugehören, erläutert. Nach den Ergebnissen der Messungen, die in Tab. 1, 2, 3 angezeichnet und teils auch im Bild 1, 2, 3 dargestellt sind, kann man schließen, daß der Ummagnetisierungsprozeß der ferromagnetischen Stäbe, im homogenen äußeren magnetischen Felde, das nach und nach sinkt und in die negativen Werte übergeht, sich makroskopisch folgendermaßen vollzieht:

Bei dem bestimmten Werte des nach und nach wachsenden negativen Feldes entstehen an den Enden des Stabes makroskopische Bereiche, in denen die Magnetisierung die

entgegengesetzte Richtung hat, als in dem übriggebliebenen mittleren Teile des Stabes. Diese makroskopischen Bereiche mit der entgegengesetzten Magnetisierung bei dem wachsenden äußeren negativen Felde vergrößern sich allmählich zum Nachteil des Bereiches im mittleren Teile des Stabes, in dem die Magnetisierung die ursprüngliche Richtung hat, bis bei einem bestimmten Werte des negativen äußeren Feldes der Bereich mit der Magnetisierung der ursprünglichen Richtung in dem mittleren Teile des Stabes völlig verschwindet und die Richtung der Magnetisierung längs des ganzen Stabes dieselbe Richtung, entgegengesetzt zur ursprünglichen hat.

Mit dem Prozeß der Ummagnetisierung der ferromagnetischen Stäbe hängt in gewissem Maße die Erscheinung der Hysterisis des Entmagnetisierungsfaktors zusammen. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß der Verlauf der Hysterisis des Entmagnetisierungsfaktors an den Stellen nahe dem Stabende eben den entgegengesetzten Charakter hat (Bild 5), als der Verlauf der Hysterisis des Entmagnetisierungsfaktors in der Mitte des Stabes (Bild 4).