

K problemu ločenja feromagnetnih materialov po sestavi in trdoti s pomočjo neporušenih metod ter magnetne strukturne analize

V članku so opisane sodobne metode ločenja materialov po sestavi in po termični obdelavi. Metode so prirejene za delno ali popolno avtomatizacijo predvsem za feromagnetne materiale. Metode, ki uporabljajo vrtinčaste tokove, so danes najbolj običajne in tudi razvoj novih naprav teži za izpopolnitvijo elektromagnetnih metod. Opisani so trije načini vrednotenja rezultatov, dobljenih z neporušnimi meritvami magnetnih parametrov predvsem relativne permeabilnosti. Ločilnost posameznih efektov, kot so permeabilnost, prevodnost, dimenzija in prave napake, je močno odvisna od frekvence, s katero preizkus vršimo. Pri ločenju posameznih jekel med seboj igra največjo vlogo relativna permeabilnost. Tega efekta pa ni mogoče ločiti od efekta dimenzije, zato je pretiran elektronski komfort nepotreben ter smo se omejili na izgradnjo domačega tipa magnetoskopa, v katerem smo skušali združiti visoko občutljivost in nizko nabavno ceno pod predpostavko, da je material, ki ga preiskujemo, v določenih mejah enakomeren. Vse opisane naprave dokazujejo, da razvoj še daleč ni končan, od prakse pa pričakujemo, da bo potrdila in izpopolnila posamezne metode do industrijsko uporabnih enot, ki bodo lahko v celoti služile avtomatizaciji kontrole predvsem termični obdelavi in, ki jih bo mogoče uporabljati na domačem trgu.

Zamešanje materialov je vsakodnevni problem tako pri producentu — v železarni — kot pri potrošniku ali na skladišču.

Celo pri skrajnem redu i disciplini more priti do zamenjav, saj je možnosti nešteto tako pri proizvodnji kot pri uporabi. Zamenjave povzročajo morda največ glavobola, ker jih dostikrat ne najdemo pravočasno, temveč običajno šele v končni fazi obdelave ali celo šele v uporabi.

Zamenjan material skušamo ločiti na najrazličnejše načine. Zaželen je pa tak način, ki je poceni, hiter in **neporušen**, pri tem pa zanesljiv. Univerzalnega načina ni. Najbolj sigurne rezultate nam da vsekakor **kemijska analiza**. Ta pa je predvsem porušna metoda in običajno dolgotrajna ter draga, zato se je poslužimo le kot vzorčne metode. Njč

podobna je **stiloskopska metoda**, ki je sicer neporušna, saj s prenosnimi stiloskopi lahko napravimo analizo kar na kosu. Vendar je ta metoda le kvantitativna ali polkvantitativna in je ne moremo še sprejeti kot industrijsko zrelo metodo.

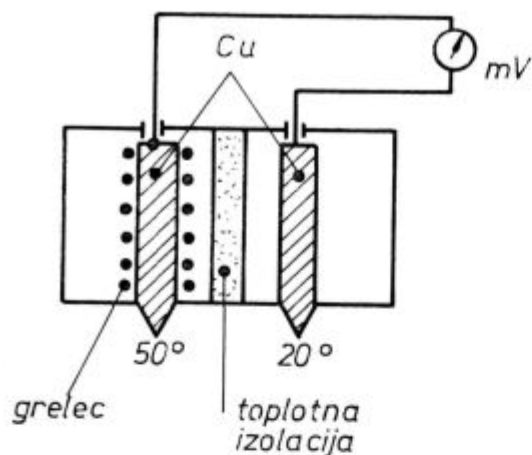
Hitre kemijske in elektrokemijske metode so tudi **tipikalne probe**. Na kovino kanemo kapljico kisline, ki kovino na površini raztopi, nato z reagenti iščemo prisotnost nekaterih elementov, npr. Ni. Po barvnem kontrastu moremo tudi približno sklepati na količino elementa, katerega smo iskali. Metoda je zelo skromnih mej in je razmeroma počasna, služi le kot pripomoček k drugim metodam.

Zelo stara metoda, ki pa je padla v pozabo, je **metoda termo dvojic**.

Eno elektrodo, npr. bakreno, držimo na določeni temperaturi, kot druga elektroda pa služi preiskovalni vzorec. Ako pritismo vročo elektrodo na vzorec, ki je metalno čist in prevoden, moremo izmeriti neko termo napetost, ki je karakteristična za vsak material. Takoj pa je treba pripomniti, da je efekt površinski, da je termo napetost odvisna tudi od kristalne strukture, torej od termične obdelave, segregacij, hladnih deformacij in podobnih vplivov. Termo napetosti so zelo majhne in jih moremo meriti le z občutljivimi galvanometri ali pa moramo termo napetost ojačati z občutljivimi diferencialnimi ojačevalniki. Vsekakor so termo napetosti zelo šibke in se gibljejo okoli 0,1 do 10 mV. Največji problem je držati vedno enako temperaturno razliko med hladnim in vročim spojem. Včasih si pomagamo tako, da istočasno ogrevamo dve elektrodi in držimo konstantno razliko temperature med obema, npr. 30° C, ter obe istočasno prislonimo na vzorec (slika 1).

V železarni Ravne so bili izvedeni preizkusi z bakreno elektrodo, ogreto na 50° C, temperatura vzorcev različnih jekel pa je znašala 20°. Vzorci so bile palice Ø 15 mm, meritve so bile izvedene večkrat v dveh točkah. Rezultat v tabeli 1 pod A pomeni, da je bila elektroda prislonjena na 1/3 preseka, rezultat pod B pa, da je bila elektroda prislonjena v sredi preseka. Vidimo razlike v odčitkih, ki očitno izvirajo od segregirane zone v sredini.

Čeprav so bile meritve izvedene le informativno, nam dovolijo zanimive zaključke.



Slika 1

Termosonda sestoji iz dveh bakrenih elektrod, ena je ogrevana višje kot druga. Pri kontaktu s kovino nastane dvojna termodvojica, termo napetost pa je karakteristična za posamezne kovine

Močna nihanja med rezultati A in B dajo misliti na močne segregacije, ne izključuje pa se v nekaterih primerih napaka pri merjenju, ki pa je manj verjetna, ker so bile meritve dostikrat ponavljane. Vidimo, da so proti elektrodi Cu dala negativni odklon vsa jekla razen Č. 5161, Č. 3230, Č. 4571, Č. 4230.

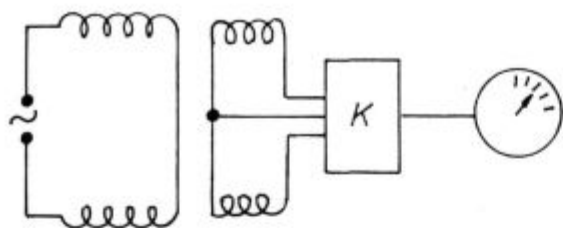
Kaže, da silicij bistveno vpliva na termo napetost, saj je v Č. 3230 (1,2 % Si), Č. 4230 (1,3 % Si), medtem ko sta Č. 4751 in Č. 4230 jekli z visoko vsebnostjo Ni. Karakteristične so tudi vrste brzo-reznega jekla Č. 7680 in Č. 6882, ki daje zelo velik negativni odklon. Poizkus je pokazal, da je metoda verjetno v določenih mejah uporabna, treba bi jo bilo še nadalje študirati in najti vplive na termo napetost. Posebno mnogo obeta pri jeklih s Si in visoko legiranih jeklih.

Najbolj priljubljena metoda je **iskrna proba**, ki je poceni, hitra in dokaj zanesljiva, saj je z dobrim iskrilcem mogoče računati na 90 % sigurnost. Žal je dobrih iskrilcev malo, pa tudi avtomatizirati te metode ni mogoče, vsaj popolnoma ne. Razen tega pa so nekatera jekla, ki jih tudi najbolj izurjen iskrilec ne more ločiti, čeprav je sestava dokaj različna. V takih primerih nam lahko mnogo pomagajo **magnetne metode**. Takih naprav je v Jugoslaviji na desetine, najrazličnejših znamk, od enostavnih do kompliciranih, od dobrih do slabih, eni se imenujejo magnetni komparatorji, drugi steel-sorterji, pa spet struktograf, magnatest itd. Pri vseh je princip približno isti, pa niti eden od njih ni prav uporaben, ako ne vemo, kaj pravzaprav merimo. Kar neverjetno je, kaj vse nam tak aparat lahko pove, tudi najenostavnejši. Žal običajno pride v roke rutinskim operaterjem, ki ne vedo drugega kot navodilo za delo z njim, to pa je daleč premalo, še več, lahko jih privede v popolno zmedo in večkrat pridejo do zaključka, da je naprava

Tabela 1

J e k l o	Cu elektroda		50° C		
	O d č i t e k				
	A		B		
Č 5161 Invar-42	+ 61	+ 61	+ 59	+ 59	
Č 1530 C-45	— 16	— 17	— 17	— 18	
Č 1220 C-15	— 15	— 17	— 16	— 18	
Č 4320 EC-80	— 26	— 27	— 27	— 29	
Č 7680 BRM-2	— 34	— 37	— 26	— 32	očitno napaka pri meritvi
Č 4751 Utop Mo-1	— 17	— 17	— 18	— 18	
Č 3230 VMS-135	+ 8	+ 8	+ 4	+ 4	možne segregacije
Č 1330 C-22	— 13	— 13	— 15	— 15	
Č 4146 OCR-4	— 11	— 12	— 18	— 12	možne segregacije
Č 6841 OW-2	— 12	— 11	— 14	— 14	
Č 6980 BRC	— 17	— 17	— 15	— 14	možne segregacije
Č 5421 ECN-200	— 15	— 13	— 14	— 15	
Č 4731 Prokron-2	— 28	— 26	— 32	— 29	možne segregacije
Č 4571 Prokron-11	+ 12	+ 11	+ 12	+ 11	
Č 4230 Per-1	+ 16	+ 14	+ 6	+ 6	močan vpliv Si in segregacije
Č 4830 VCV-150	— 13	— 13	— 17	— 15	
Č 6882 BRW-2	— 28	— 27	— 28	— 26	
Č 4150 OCR-12	— 18	— 18	— 28	— 29	
Č 3840 Merilo	— 6	— 6	— 14	— 14	možne segregacije
Č 4134 OCR-3	— 10	— 10	— 14	— 15	
Č 1941 OC-100	— 11	— 12	— 14	— 14	

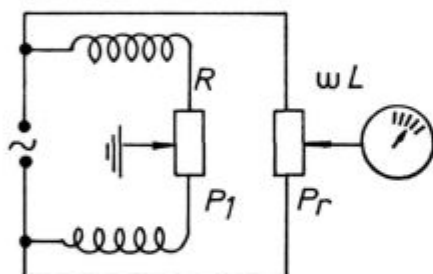
sploh neuporabna. Zato je skrajno potrebno, da si поблиže ogledamo funkcijo aparata. Najčeste primerjamo preiskovalni vzorec z znanim v mostični metodi (slika 2).



Slika 2 a

Shema impedančnega mostu z dvema paroma tuljav.
K — kompenzator ravnotežja

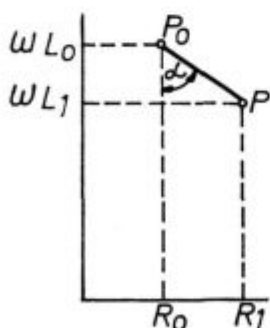
Na sliki 2 a vidimo, da nosita obe tuljavi po eno primarno in eno sekundarno navitje. Inducirana napetost U v sekundarnih navitjih je odvisna od impedance tuljav. Sekundarne tuljave so vezane v električnem protistiku in v primeru popolne enakosti impedanc je diferenčna napetost nič, ako pa se v enem od tuljavnih sistemov spremeni impedanca, se pojavi neka diferenčna napetost, ki je merilo za premik parametrov tuljav. Namesto tega stika lahko uporabimo tudi tuljave, vezane v mostu po sliki 2 b. S pomočjo potenciometra P_1 izbalansiramo amplitude, s P_r pa faze obeh napetosti. Nekatere naprave se poslužujejo samo ene tuljave. V tem primeru je treba kompenzirati drugo vejo



Slika 2 b

Shema impedančnega mostu z enim parom tuljav

mosta z električnimi elementi, ki omogočajo izbalansiranje po fazi in amplitudi. Na sliki 3 je prikazan premik impedančne točke p v Gaussovi ravnini, ako se spremeni vložek v eni od tuljav. Spremenita se obe komponenti R in ωL in skladno s tem tudi napetosti U -realna in U -imaginarna.



Slika 3

Pomik impedančne točke P_0 v P je prikazan s koordinatami realne R in imaginarne ωL komponente

Gostota magnetnega fluksa skozi feromagnetni vložek znaša:

(1)

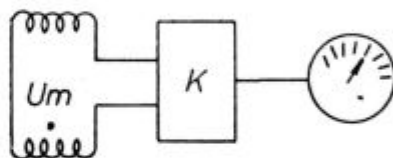
$$B = B_0 + J$$

B_0 . . . gostota magnetnega fluksa v prazni tuljavi

J . . . magnetiziranje probe

Ker sta vezani obe tuljavi v protistiku, B_0 kompenziramo in merimo samo razliko I , ki nas zanima.

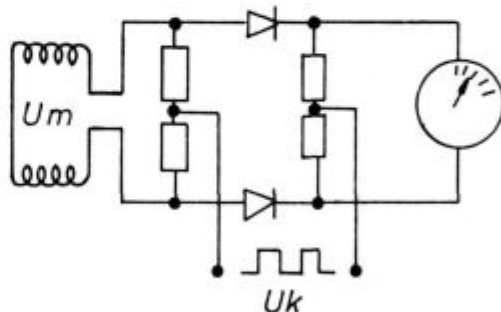
Načini prikazovanja rezultatov so dokaj različni. Najenostavnejši je kazalčni instrument — **cevni voltmeter**, ki izmeri diferenčno napetost ne glede na fazo samo po amplitudi. Taka naprava je najcenejša, vendar nam ne da vseh podatkov, katere metoda odkriva. Ako namreč diferenčna napetost spremeni fazno lego, kar je često primer, ali če nastopijo še višje harmonične, jih enostavni cevni voltmeter ne zazna. Te pa morejo biti večkrat edini parameter, ki omogoča ločenje dveh materialov, posebno pri višjih magnetnih poljih. Najenostavnejša izvedba je prikazana na sliki 4.



Slika 4

Najenostavnejši je cevni voltmeter brez faze detekcije samo z amplitudno kompenzacijo

Več podatkov nam da fazno občutljivi voltmeter, kot je prikazan na sliki 5.



Slika 5

Fazno občutljivi detektor omogoča eliminiranje nezaželenih efektov, U_k je pomožna napetost, ki odpira ventila (diode), to napetost lahko v fazi pomikamo

Merjena napetost U_m krmili kazalni instrument tako, kot mu dovoli korekcijska napetost U_k , ki odpira usmerniške diode.

Ako pomaknemo fazo med krmilno in merjeno napetostjo, lahko poljubno izbiramo posamezne efekte, npr. sprememba μ_r in sprememba σ (prevodnosti) si ležita v določenem kotu, pomaknjeni med seboj. S pomikanjem faze moremo popolnoma kompenzirati enega od efektov. Maksimalni

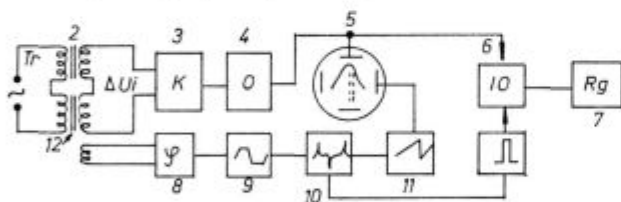
odklon pokaže instrument, če sta obe napetosti brez faznega pomika ali pomaknjeni za 180° . Če sta pomaknjeni druga proti drugi za 90° ali 270° , instrument ne da nobenega odklona. Npr. ne želimo, da instrument pokaže spremembe debeline preiskovanega vzorca v tuljavi, temveč samo spremembe prevodnosti (razpoke). V tem primeru pomaknemo krmilno napetost za 90° v fazo z merjeno napetostjo, ki nastaja iz čiste spremembe dimenzije. Aparat je sedaj »gluh« za dimenzijske spremembe, vse druge pa, ki pridejo izven faze pokaže. Avtomatizacija take naprave je mogoča le tako, da uporabimo hitri zrcalni galvanometer, ki je dobro dušen in na zaslon postavimo fotocelico na določeni oddaljenosti od »0«. Pri ločenju feromagnetnih jekel tak aparat nima posebnih prednosti pred enostavnim brez fazne občutljivosti, kvečjemu to, da lahko ločimo med bolj trdim ali bolj mehkim vzorcem, ker se v enem primeru kazalec odkloni v eno, drugič pa v drugo stran.

Se več podatkov nam da katodna cev kot indikator merjene napetosti, ker nam istočasno pokaže spremembe faze in amplitude merjene napetosti. Uporabiti jo moremo na tri načine. Merjeni signal je prikazan:

- a) časovno linearno,
- b) eliptično,
- c) točkasto v Gaussovi ravnini.

a) Časovno linearno prikazovanje

merjene napetosti uporablja vrsta naprav, med drugimi pri nas največ uporabljeni »magnatest Q« od Fa. dr. Förster, Reutlingen. Poglejmo, kako je taka naprava grajena (slika 6).

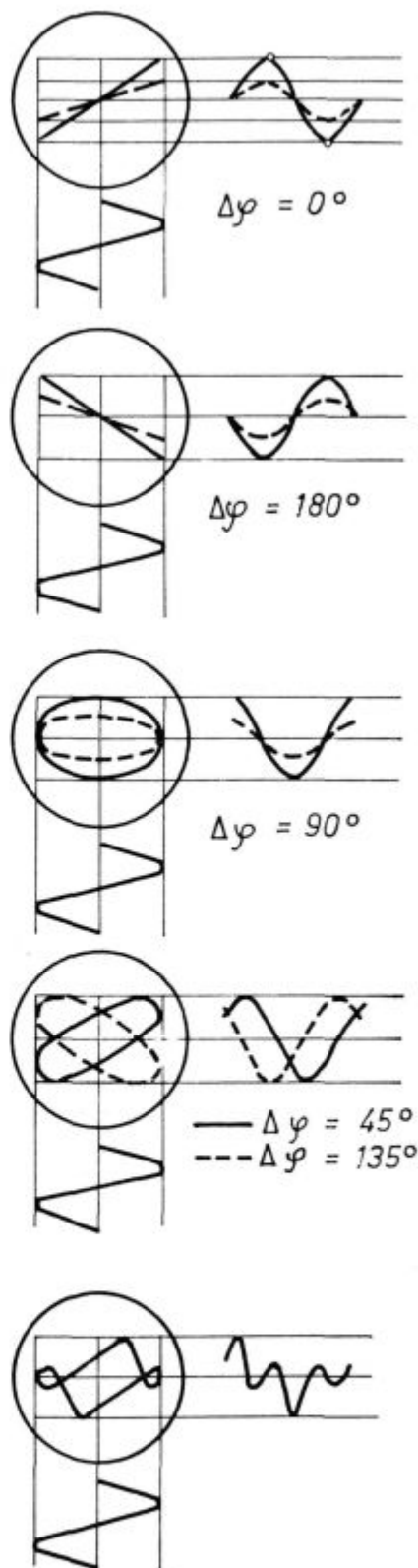


Slika 6

Shema magnatesta Q — z linearno časovno bazo

Vzorci 12 tičijo v tuljavah (2), ki so s primarne strani napajane iz transformatorja T_r , sekundarni tuljavi pa sta vezani v protistiku. Popolnoma jih kompenziramo s kompenzatorjem (3) in signal vodimo preko pojačala (4) na katodno cev (5).

Del izmeničnega signala iz transformatorja uporabimo za generiranje odklona časovne baze, tako da ga preko faznega pomikača (8) v cliperju (9) spremenimo v pravokotni impulz, ki ga diferenciramo v diferenciatorju (10). Pozitivni impulz uporabimo za start časovne baze (11), negativni impulz, ki je vedno točno v sredini, pa odpira sicer vedno zaprti impulzni ojačevalca (6), ki spusti merjeni signal je zelo kratek čas skozi. Ta čas delovanja ojačevalca traja le 10^{-4} sek. in ta »elektronska špranja« stoji točno na sredini ekrana.



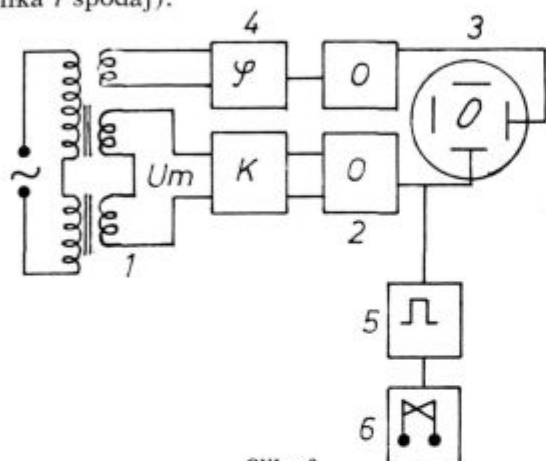
Slika 7

Prikazane so slike na ekranu KO levo po metodi elipse, desno po metodi linearne časovne baze, ako se fazni kot spreminja od 0 do 135°

Spodnja slika kaže, da so nastopile poleg osnovne še višje harmonične, ki sliko močno skomplicirajo

Občutljivost ojačevalca lahko spreminjamo in tako nam je mogoče signale, ki nastopijo točno na sredini ekrana, do določene višine spustiti skozi ojačevalce in do avtomatike (7). S faznim pomikačem (8) lahko spravimo poljubni del merjene napetosti nad špranjo in tako moremo proces avtomatizirati ravno v tistem delu krivulje, ki je za ločenje materiala karakteristična. Če uporabimo frekvenco 50 Hz in širino ekrana 10 cm, potem bo špranja široka le 0,5 mm. Oglejmo si nekaj slik oscilogramov pri različnih faznih pomikih med odklonsko napetostjo in merjeno napetostjo (slika 7).

Poglejmo še, kakšen bi bil kombinirani efekt, kjer sodeluje sprememba premera U_D in sprememba prevodnosti U_s istočasno na tuljavi (slika 7 spodaj).



Slika 8

Metoda elipse omogoča opazovanje spremembe faze in amplitude

b) Eliptična metoda

Namesto linearne časovne baze na horizontalne odklonske plošče katodne cevi vodimo sinusno napetost, katere fazno lego lahko s faznim pomikačem spreminjamo. Tako dobimo ravno črto, ako je fazni pomik med odklonsko in merjeno napetostjo 0 ali 180°. Črta je nagnjena, ako je amplituda različna, vendar ostane črta. Ko pa se spremeni faza, pa iz črte nastane bolj ali manj nagnjena elipsa, ki preide v krog pri 90° ali 270° in se zopet splošči proti 360° (glej sliko 7 b). Naprava je shematsko prikazana na sliki 8.

- 1 . . . merilne tuljave in most
- 2 . . . ojačevalnik
- 3 . . . katodna cev
- 4 . . . fazni pomikač
- 5 . . . trigger
- 6 . . . elektronika

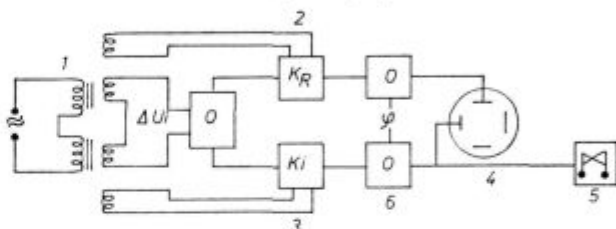
Ako ima naprava še fazni pomikač, lahko nezaželeno komponento kompenziramo, tako da odklonsko napetost pomaknemo v horizontalo z nezaželeno komponento.

Pri feromagnetikih se eliptična metoda redkeje uporablja, ker zaradi različnih permeabilnosti, ki

so odvisne od magnetilnega polja, dobimo višje harmonične, ki močno komplicirajo sliko na ekranu.

c) Metoda točke v Gaussovi ravnini

S primernimi pomiki faze krmilne napetosti lahko razstavimo impedančno točko v obe komponenti R in L, ter vsako posebej upodobimo na katodni cevi, tako da eno komponento peljemo na horizontalni par, drugo pa na vertikalni par odklonskih plošč. Ako so vse napetosti v fazi, je točka v sredini ekrana, ako se poveča samo komponenta R, potuje točka v horizontali, ako pa se poveča komponenta $\omega \cdot L$, pa potuje točka v vertikali, če je sprememba kompleksna, se točka ustavi nekje med osjo x in y. Ako želimo kompenzirati nezaželeno komponento s faznim pomikačem, obrnemo celo ravnino v smer nezaželene komponente in v nasprotni smeri nastopa le merjena koristna komponenta. V to smer lahko aktiviramo še avtomatiko. Shema take naprave je prikazana na sliki 9.



Slika 9

Metoda točke omogoča pomik impedančne točke v Gaussovi ravnini

- 1 . . . tuljave in impedančni most
- 2,3 . . . kompenzacija 0° in 90°
- 4 . . . katodna cev
- 5 . . . avtomatika

GLOBINA PRODİRANJA VRTINČASTIH TOKOV

Defekt, ki ga merimo, morajo zajeti vrtninčasti tokovi v vzorcu. Izmenično magnetno polje izriva vrtninčaste tokove tem bolj na površino, čim višja je frekvenca, sodelujeta pa tudi električna prevodnost σ in relativna permeabilnost μ_r . Približno jo moremo izračunati iz formule.

$$(2) \quad \delta = \frac{500}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} [\text{mm}]$$

δ . . . globina prodiranja [mm]

f . . . frekvenca [Hz]

σ . . . prevodnost $\left[\frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} \right]$

μ_r . . . permeabilnost [1]

Za ločenje materialov želimo zajeti čim večji presek materiala, zato delamo z nižjimi frekvenca-mi. Pri frekvenci 50 Hz prodirajo vrtninčasti tokovi v feromagnetni palici z

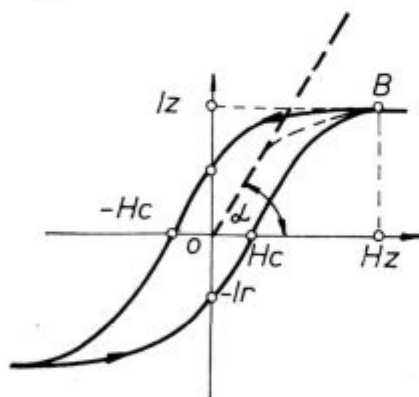
$$\sigma = 10 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} \right]$$

in $\mu_r = 100$

v globino ca. 2,3 mm. Močno razogljčena plast tedaj meritev močno popači, zato za ločenje materialov večkrat uporabimo še nižje frekvence, npr. 10 Hz, kjer naraste globina prodiranja vrtnčastih tokov na 5 mm. Za kontrolo površinskih plasti npr. razogljčene ali cementacijske plasti pa uporabimo mnogo višje frekvence, npr. 1 KHz, kjer pade globina prodiranja vrtnčastih tokov na 0,5 mm. Seveda pa je gostota tokov pri višjih frekvencah na površini mnogo večja kot pri nižjih frekvencah, zato bo tudi površinski efekt mnogo močnejše prikazan kot pa efekt v notranjosti vzorca. Pri feromagnetikih, kjer je relativna permeabilnost močno odvisna od jakosti magnetilnega polja, bo tedaj tudi globina prodiranja tokov različna, npr. za C-45 (Č. 1530) je μ_r pri zelo nizkih poljih 100 in že pri 30 Oe naraste na 550 in pri 170 Oe zopet pade na 100.

IZBOR TOKA MAGNETENJA

Za ločenje materiala predvsem uporabljamo spremembo μ_r , ki je mnogo večja kot pa spremembe prevodnosti σ (pri neferomagnetnih materialih je efekt ravno nasproten, ker je $\mu_r \approx 1$). Oglejmo si, kako poteka krivulja relativne permeabilnosti pri feromagnetnem vložku.

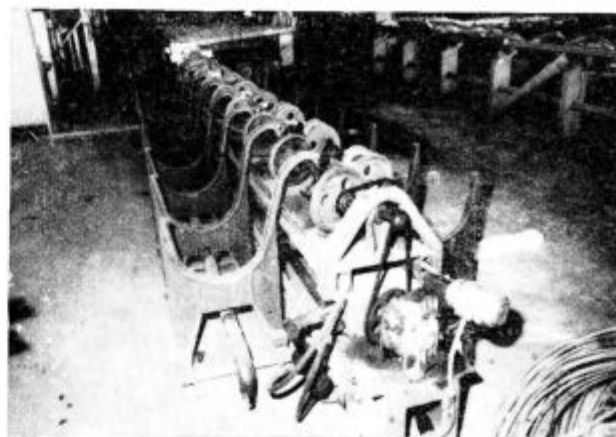


Permeabilnost je podana s kvocientom $\frac{B}{H}$ ki je v različnih točkah histerezne zanke različna

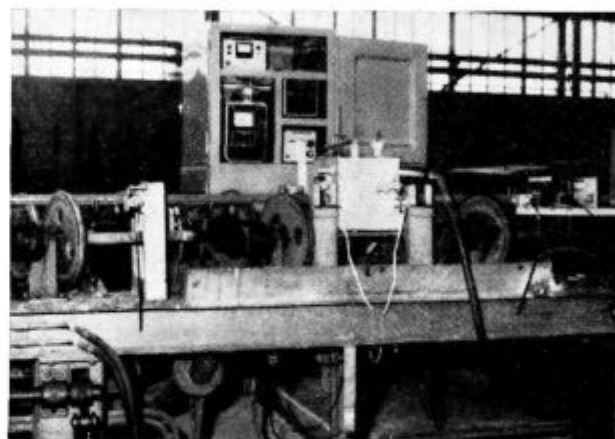
Iz histerezne zanke na sl. 10 vidimo, da je μ_r podan s tangento na točkasto krivuljo, ki se pri visokih poljih H nagiba k horizontali.

$$(3) \quad \mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \tan \alpha$$

Ze iz te slike vidimo, da se μ_r spreminja z jakostjo magnetnega polja. Za nekatera jekla je potek μ_r podan na sliki 11.



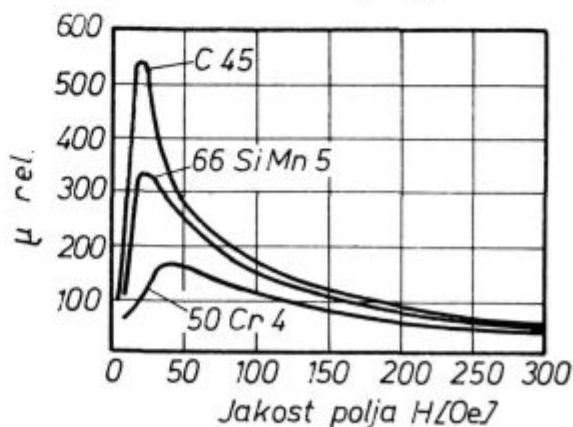
Naprava za avtomatsko ultrazvočno kontrolo palic v valjarni Železarne Ravne (pogonski in sortirni del)
V napravo je vgrajen tudi magnetoskop



Naprava za avtomatsko ultrazvočno kontrolo palic v valjarni Železarne Ravne (operativni del)
Magnetoskop zgoraj levo

Inducirana napetost v sekundarnih tuljavah je direktno odvisna od relativne permeabilnosti.

$$(4) \quad U_i = -\mu_r \cdot \mu_0 \cdot u^2 \cdot \frac{s}{1} \frac{dI}{dt}$$



Slika 11
Relativna permeabilnost različnih jekel se spreminja z jakostjo magnetilnega polja

Tedaj bomo izrabili področje največje strmine krivulji μ_r . Šele tedaj, ako sta krivulji dveh jekel popolnoma enaki (podobno C-45 in 66 SiMn 5), se poslužimo višjih magnetnih polj, kjer so razlike v μ_r zelo občutne.

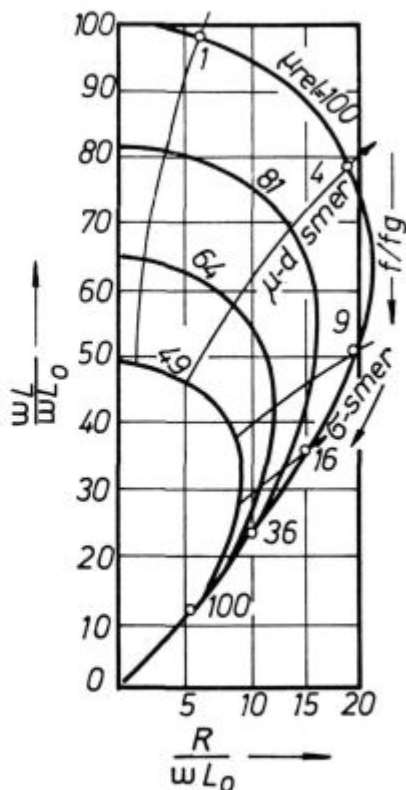
V nekaterih primerih pa se sinusna oblika krivulje popači z višjimi harmoničnimi, ki so sedaj merilo za ločljivost. Popačenje sinusne oblike nastopi vedno, kakor hitro μ_r ni premica, maksima in minima pa nastopijo, ako krivulja μ_r kulminira. Nasprotno pa delamo pri zelo visokih poljih po možnosti v zasičenju, ako se hočemo iznebiti efekta permeabilnosti in iščemo le spremembe prevodnosti, npr. zaradi razpok na površini. Iz histerezne krivulje tudi takoj lahko razberemo, da je hladna utrditev lahko močna motnja, saj poveča H_c , torej znižuje relativno permeabilnost, medtem ko namagnetena palica, ki magnetizem obdrži, potisne točko B_r navzgor in μ_r se poveča. Ako torej delamo z nizkimi magnetilnimi toki, je za uspešno delo vzorce treba prej razmagnetiti. Pri avtomatizirani kontroli, kjer palice z večjo brzino potujejo skozi tuljavo, morejo lokalni magnetni poli na palici povzročiti močne električne impulze, ki aktivirajo elektroniko.

Tudi temperatura vzorca vpliva na meritev, saj se prevodnost vzorca spreminja s temperaturo. Ako nimamo σ komponente kompenzirane, more ogret vzorec dokaj motiti. Temperatura vzorca naj ne presega 40°C.

LOČLJIVOST POSAMEZNIH EFEKTOV, KI VPLIVAJO NA INDUCIRANO NAPETOST V TULJAVI

Na inducirano napetost v tuljavi vplivajo razen geometrijskih parametrov tuljave in magnetilnega toka še prevodnost, relativna permeabilnost in dimenzija vzorca. Ker so parametri tuljav in magnetenja stalni, moremo torej izbirati med tremi neznankami μ , σ in d (d = premer palice). Ta problem je posebno važen, ako z metodo vrtničastih tokov iščemo razpoke na površini, tedaj se hočemo iznebiti vpliva μ_r in d . Pri ločenju materiala, kjer pa je σ zanemarljivo majhen nasproti μ_r in d , pa je ta selekcija manj važna, razen če temperatura vzorca ni bistveno različna ali če ima palica razpoke. Oboje namreč vpliva na prevodnost, posebno pri višjih frekvencah, kjer je zaradi skin efekta vpliv površine znoten. Ne da bi se spuščali v teorijo, pokažemo samo končni rezultat za feromagnetni vložek. Na sliki 12 je prikazan diagram pomikanja impedančne točke v Gaussovi ranini, ako se spreminja dimenzija d , relativna permeabilnost μ_r in prevodnost σ . Iz te slike vidimo, da so največji koti med σ in μ_r — d smerjo

v področju $\frac{f}{fg}$ do 20, potem pa se ta kot vse bolj manjša.



Slika 12

Impedančna točka tuljave v izmeničnem polju je odvisna od več parametrov d , μ_r , σ in f

Prikazane so realna R in imaginarne komponente $\omega \cdot L$ v odvisnosti od μ_r , d , σ in f

$$(5) \quad fg = \frac{\sigma \cdot \mu_r \cdot d}{5066} \text{ (Hz)}$$

Tudi razmerje $\frac{f}{fg}$ se spreminja z μ_r , torej tudi z jakostjo magnetnega polja.

Razen tega vidimo, da je nemogoče ločiti efekt μ_r od d . Sprememba dimenzije vložka daje tedaj enake efekte kot sprememba relativne permeabilnosti. Nujno je torej, da držimo dimenzijo konstantno, ako želimo meriti efekt μ_r , σ pa večinoma lahko zanemarimo.

Poglejmo še enkrat primer za C-45 pri nizkih poljih z $\mu_r = 100$ in pri 30 Oe z $\mu_r = 550$ ter premeru palice $\varnothing 10$ mm (1 cm). Iz enačbe 5 najdemo $fg = 5$ pri nizkih poljih in $fg = 1$ pri 30 Oe, ako delamo z $f = 50$ Hz dobimo $\frac{f}{fg} = 10$ in $\frac{f}{fg} = 50$.

Pri nizkih poljih je torej ločljivost še zelo dobra, pri višjih poljih pa ločljivost posameznih efektov močno pade, nekoliko odpomore večja gostota tokov v površinski plasti pri večjih μ_r .

Za ločenje materialov po sestavi pa tudi po termični obdelavi bomo torej uporabili nizke frekvence 50 Hz ali nižje ter po možnosti nizke toke magnetenja. Površinski efekti, npr. razpoke, majh-

no razogljčenje pri nizkih frekvencah, ne bodo bistveno vplivali na meritev. Če pa delamo z visokimi frekvencami, ker nas zanima le površinska plast, bodo seveda eventualne razpoke na površini že močno vplivale, pri tem pa se jih ne da prav

dobro ločiti med seboj, saj razmerje $\frac{f}{f_g}$ močno zraste npr. pri 1 KHz na 200 oziroma 1000.

Podobno vpliva večji presek. Za prejšnji primer vzemimo premer palice 60 mm $\varnothing$.

$$\text{za } f_g \text{ najdemo } \frac{5066}{10 \cdot 100 \cdot 6^2} = 0,14 \text{ in } 0,025$$

$$\text{ter } \frac{f}{f_g} = \frac{50}{0,14} = 360 \text{ in } 2000$$

Pri debelejših palicah se tedaj vsi efekti močno mešajo med seboj in jih s fazno selekcijo ni mogoče več ločiti med seboj.

VPLIV VELIKOSTI TULJAVE

Iz diagrama na sliki 12 vidimo, da se impedančna točka pri tanjših vložkih pomika proti izhodišču koordinatnega sistema, prav tako upada inducirana napetost v tuljavi in s tem občutljivost metode.

Tuljave naj se čim tesneje prilegajo vzorcu.

Inducirana napetost je podana z enačbami.

$$(6) \quad E = E_o \cdot \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \cdot \text{real.}$$

$$(7) \quad E = E_o \cdot \eta \cdot \mu_r \cdot \mu_{ef} \cdot \text{imag.}$$

$$(8) \quad \eta = \left(\frac{d_i}{d} \right)^2 \cdot d \cdot \dots \text{ premer tuljave} \\ d_1 \cdot \dots \text{ premer vzorca}$$

Občutljivost torej upada s kvadratom premera palice.

VPLIV PROSTIH KONCEV VZORCA

Prosti konec vzorca deluje razmagnetilno na vzorec, torej slabi magnetni pretok skozi probo. Permeabilnost se zmanjša za faktor razmagnetitja N na fiktivno permeabilnost μ_r .

$$(9) \quad f = \frac{1}{\frac{1}{\mu_r} + N}$$

Natančneje povedano, permeabilnost pada v odvisnosti od dimenzij vzorca in relativne permeabilnosti vzorca. Vzorci morajo torej tičati tako daleč v tuljavi oziroma morajo biti toliko iz tuljave, da njihovi prosti konci nimajo več vpliva na meritev. Včasih pa so vzorci tako kratki, da se vplivu oblike ne moremo izogniti. V tem primeru moremo vzorce namestiti v tuljavo natančno v isti legi najbolje

s pomočjo kalupov. Pri tem seveda moramo vzeti v zakup manjšo občutljivost meritve, ki je nikakor ne moremo primerjati z meritvijo na istem materialu, ki je toliko dolg, da ga potisnemo dovolj daleč skozi tuljavo in izključimo vpliv koncev.

IZBIRA KOMPENZACIJSKEGA VZORCA

Če vemo, za katera jekla gre, je najbolje pripraviti po dva znana vzorca istih jekel in istih dimenzij ter z regulacijskimi elementi spraviti imedančni most v ravnotežje. Sedaj vse ostale vzorce primerjamo z znanimi in v primeru različnih materialov dobimo razglasitev mosta in diferenčno napetost, katero odčitamo po eni prej naštetih metod. Začnemo pri najnižji jakosti magnetilnega toka in jo stopnjujemo do točke, kjer je ločljivost največja. Če uporabljamo enostavni, fazno neobčutljivi kazalčni instrument, se nam more zgoditi, da pri še večji jakosti toka občutljivost prične padati zaradi pojava višjih harmoničnih. Nikakor ni nujno, da je primerjalni vzorec ravno tisti, ki je v zamešani količini, je lahko tudi drugi in druge dimenzije, skrbeti pa je potrebno, da razlike niso prevelike in da se po možnosti ne pojavijo višje harmonične. Ako razpolagamo z elipsa instrumentom ali še bolje s časovno linearnim pokazovanjem napetosti, potem lažje zasledujemo potek faznih premikov in spremembe amplitud ter poiščemo s faznim pomikačem tisto mesto na ekranu, ki je najbolj karakteristično za razliko slike med dvema vzorcema. Ko najdemo primerno jakost magnetilnega toka in najprimernejši položaj slike, se lotimo serije vzorcev. Ako so palice dolge, je priporočljivo peljati celo palico skozi tuljavo, da ugotovimo eventualne razlike po dolžini, ki morejo nastopati zaradi lokalnih nehomogenosti, hladnih utrdnitev ali razogljčenj, da bi tako ocenili tudi pas razsipanja rezultatov. Če imamo na razpolago enostavni instrument, je priporočljivo z regulatorjem nekoliko razlasiti most, kajti razlika merjenih napetosti še vedno ostane, izognemo pa se nelinearnemu delu instrumenta, katerega marsikateri ima, seveda moramo potem uporabljati vedno isto tuljavo kot vzorčno tuljavo.

Največji vpliv na permeabilnost ima ogljik. Čim več je dolegiranih elementov, tem bolj se vplivi prepletajo in slika se komplicira, zato nikakor ni mogoče trditi, da je aparat uporaben za ločenje jekel, npr. po JUS ali DIN, vedno moramo upoštevati še druge faktorje, ki vplivajo na permeabilnost, npr. razogljčenje, deformacije, oblika, nehomogenosti. Tudi na prevodnost nekateri elementi znatno vplivajo. Prevodnost znižujejo Si in P, manj pa C, Cr, Mo in V, Ni skoro ne vpliva na prevodnost.

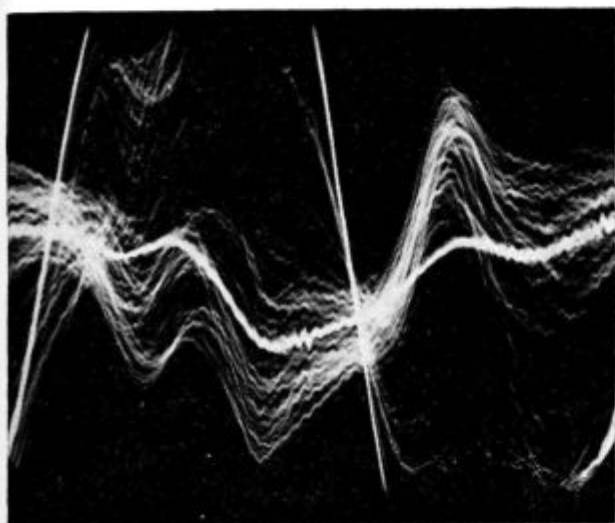
Kakorkoli že postopamo, moramo vedeti, kaj delamo in ne smemo vrteti regulatorjev na slepo. Vsaka uglasitev instrumenta velja le za določen

merilni problem. Ko začnemo preiskovati druge dimenzije ali druge vrste jekla, moramo uglaševanje znova opraviti. Vmes pa je vedno potrebno sortirane vzorce kontrolirati še z drugimi metodami, npr. iskrne probe, kemijska analiza, merjenje trdote itd.

Le na ta način bomo široke možnosti, ki jih nudi magnetna metoda vrtnčastih tokov, lahko popolnoma izrabili in bodo rezultati zadovoljivi.

DISKUSIJA PRIMEROV

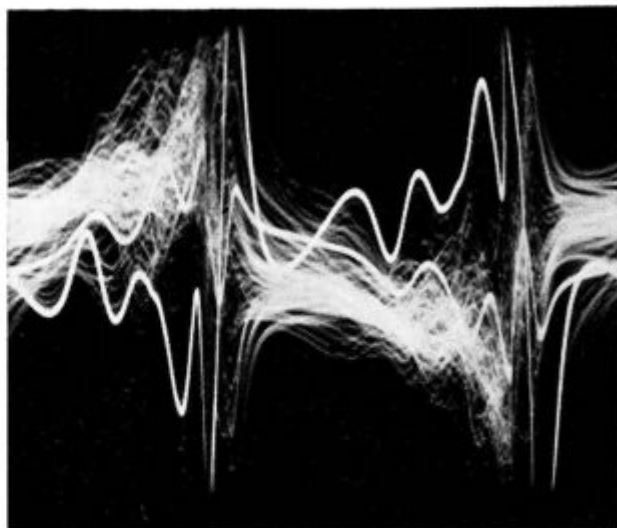
Na seriji slik 13—22 so prikazani različni efekti, ki vplivajo na popačenje osnovne sinusoide na magnetoskopu domače izdelave. Slika 13 prikazuje posnetke na ekranu katodne cevi za palico $\varnothing 20$ mm iz jekla VCV-150 pri srednjih jakostih



Slika 13
Č 4830 (VCV 150) — $\varnothing 20$ mm. Magnetno polje srednje jakosti

magnetnega polja. Posnetek je dobljen tako, da smo zaslonko fotoaparata odprli in skozi tuljavo vlekli palico, ki ima deloma razpoke pa tudi hladne utrditve, saj je bila vlečena. Zaradi neenakomerne trdote po dolžini palice je prišlo do različnih lokalnih utrdnitev. Dobro je vidna osnovna oblika sinusoide na mestu, kjer je bila palica razpokana, srednja močno poudarjena črta predstavlja lokalne utrditve, ki so po dolžini palice različne, zato najdemo na posnetku družino krivulj, ki so po amplitudi in po fazi popolnoma različne. Imajo pa približno isto stično točko, ko osnovna sinusoida preide skozi 0.

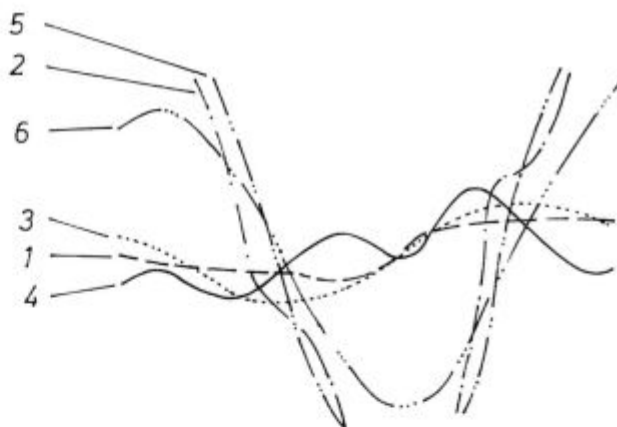
Slika 14 prikazuje isto palico v zelo močnem magnetnem polju (magnetest D). Na prehodnih točkah, kjer preide tok magnetenja skozi 0, t. j. v področju začetne permeabilnosti, so deformacije sinusoide najmočnejše v področju največjih jakosti polja. Kjer na sliki 13 sinusoida doseže svoj



Slika 14
Č 4830 (VCV 150) — $\varnothing 20$ mm. Zelo močno magnetno polje

Kontrola toplotne obdelave in ločenje vrst jekel z domačim magnetoskopom v Železarni Ravne

vrh, so spremembe bistveno manjše. To je razumljivo, saj je pri tako visokih poljih (preko 2000 Oe) material magnetno zasičen in se obnaša kot para-



Slika 15

Slika 15 prikazuje enake posnetke kot sl. 13 in 14, ki pa so posneti na roko, tako da smo preko zaslona položili transparentni papir. Palica iste kvalitete $\varnothing 8$.

Krivulja

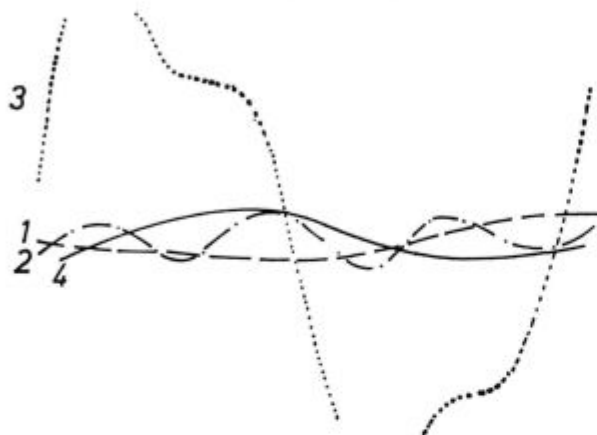
- 1 — palica brez napak, most v ravnotežju
- 2 — hladno deformirana palica, srednje visoko magnetenje. Pojavljajo se rahle deformacije sinusoide
- 3 — hladno deformirana palica, nizko magnetenje. Sinusoida je nepopačena, proti 2 pa fazno pomaknjena naprej
- 4 — palica je bila postružena na manjši premer, pojav višjih harmoničnih
- 5 — palica (nepostružena) ogreta na 70°
- 6 — palica (nepostružena) ogreta na 40° , v obeh primerih sinusoida ostane nepopačena, amplituda raste



Slika 16

Ista palica v visokem magnetilnem polju

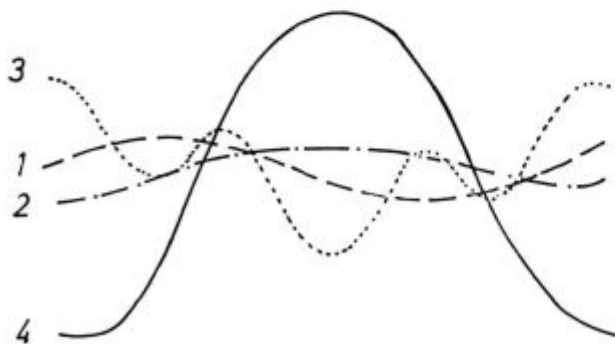
- 1 — palica brez defekta, most približno v ravnotežju
- 2 — v palico so bile izvrtane luknje na površini, kar pomeni delno zmanjšanje preseka in obenem površinsko lokalno napako. Pojavljajo se višje harmonične



Slika 17

Palica $\varnothing 15$ iste kvalitete

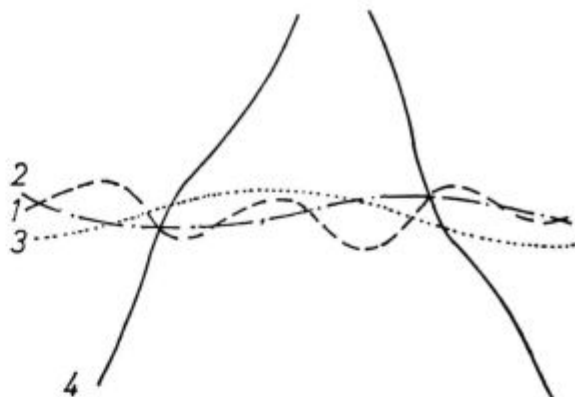
- 1 — prazne tuljave, most v ravnotežju
- 2 — palica v visokem polju, brez defektov. Pojavljajo se višje harmonične (II. harm.)
- 3 — ista palica z razpoko v visokem polju. Razen močno povečane amplitude opazimo še popačenje in fazni pomik
- 4 — ista palica z razpoko v nizkem polju. Opazimo v glavnem fazni pomik brez bistvenega povečanja amplitude



Slika 18

Palica $\varnothing 20$, iste kvalitete

- 1 — brez defektov, nizko polje
- 2 — z razpoko, nizko polje, opazimo močan fazni premik
- 3 — brez defekta, visoko polje, pojavi se močna II. harmonična
- 4 — z razpoko, visoko polje, razen povečanja amplitude je videti še močan pomik faze

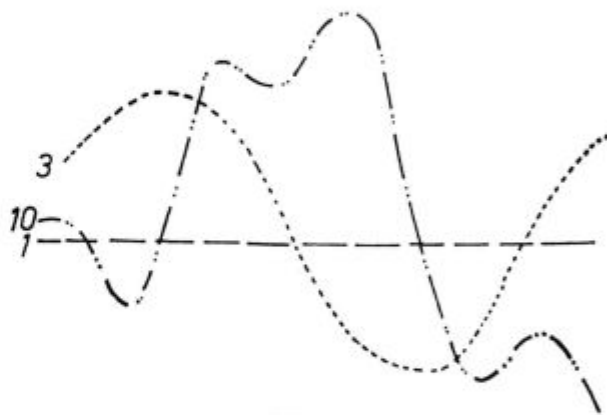


Slika 19

Palica iste kvalitete $\varnothing 24$

- 1 — z razpoko, visoko polje, mostu ni mogoče spraviti v ravnotežje zaradi višjih harmoničnih
- 2 — z razpoko, nizko polje, močan pomik faze, amplituda se ne spremeni bistveno
- 3 — brez defekta, nizko polje
- 4 — brez defekta, visoko polje, bistveno povečanje amplitude in rahle višje harmonične

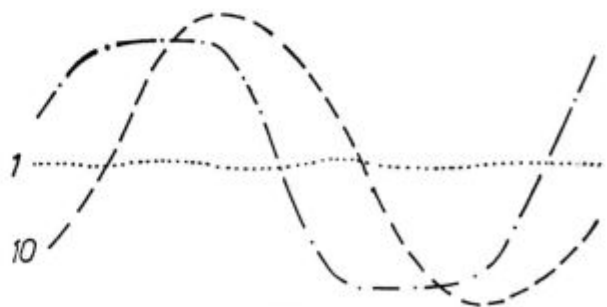
V primeru 13 g smo most uglasili na palico z razpoko, v drugi tuljavi pa je bila zdrava palica



Slika 20

Palica $\varnothing 20$, kvaliteta C 45

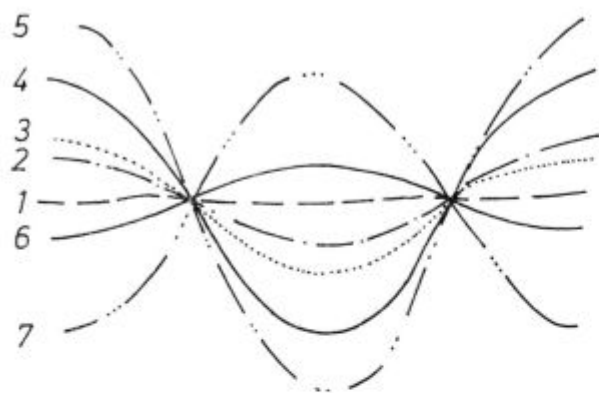
- 1 — brez defekta, most v ravnotežju
- 10 — močne preplate, visoko polje, močan premik faze proti osnovni sinusoidi, ki je prikazana črtkano, pojavljajo se višje harmonične



Slika 21

Palica $\varnothing 20$, kvaliteta C 45

- 1 — brez defekta, most v ravnotežju
- 2 — močne preplate, nizko polje, pojavi se fazni pomik proti osnovni sinusoidi 10 (črtkana) ter slabo vidne višje harmonične



Slika 22
Palica 22 × 22, nizko polje

- 1 — brez defekta, trdota 540 HB
- 2 — brez defekta, trdota 500 HB
- 3 — brez defekta, trdota 470 HB
- 4 — brez defekta, trdota 398 HB
- 5 — brez defekta, trdota 331 HB
- 6 — zmanjšan presek
- 7 — še bolj zmanjšan presek

magneten ($\mu_r \rightarrow 1$.) Eventualna popačenja izvirajo od sprememb prevodnosti σ , ker je premer palice d konstanten, prav tako frekvenca 50 Hz vedno enaka.

Močno poudarjena črta pomeni zopet razpoko. Vidimo, da je potek napetosti, ki se v tuljavi inducira, zelo kompliciran v eni polperiodi. Razen višjih harmoničnih opazimo tudi premik faze, maksimalna popačenja ne nastopajo v skupni stični točki, ko gre tok skozi 0, temveč nekoliko pozneje.

Visoka magnetilna polja uporabljamo, le kadar iščemo razpoke na palici in ne spremembe trdote ali sestave. Da bi čimbolj odpravili moteče deformacije na prehodu magnetilnega toka skozi 0, palico v modernih napravah močno enosmerno predmagnetimo, tako da dosežemo praktično nasičenje in moremo delati z mnogo nižjimi izmeničnimi tokovi, katere superponiramo enosmernemu magnetilnemu toku.

Iz slike 22 vidimo, da s spremembo trdote raste samo amplituda signala, faza pa ostane nespremenjena.

Zmanjšan presek obrne signal v nasprotno smer, polnilni faktor se manjša in inducirana napetost pada, dokaz, da ne moremo ločiti parametrov μ_r in d .

Iz vseh navedenih primerov je razvidno, da je za ločenje materialov primerno izbirati nizka magnetilna polja pod predpostavko, da je material brez razpok in napak na površini. Za iskanje napak na površini so na razpolago druge metode. Ako uporabimo visoka magnetilna polja, se bolj oddaljujemo od uspeha, kot pa se mu približujemo. Le v izjemnih primerih se poslužimo visokih magnetilnih polj, in to le v primeru, če imamo na razpolago napravo s katodnim osciloskopom, ki ima linearno časovno bazo. Ako pa imamo na razpolago le enostavno napravo s cevnim voltmetrom, nam pojav višjih harmoničnih popolnoma zamegli sliko, ker instrument signal integrira in postane popolnoma nepregleden.

Nobena od naštetih metod ni popolna in le druga drugo izpopolnjujejo, zato je neobhodno potrebno, da imamo v obratu poleg elektronskega instrumenta še iskralca in po možnosti se poslužimo še tipkalnih prob in termoelektrične sonde.

Vsekakor to niso edine metode za ločenje materialov brez porušitve. Tudi magnetostriktivni efekt moremo v določeni meri izrabiti za ločenje materialov. Težave pa so podobne kot pri magnetestu, ker je magnetostriksijska lastnost odvisna od permeabilnosti in temperature, razen tega pa še od jakosti magnetilnega polja. Taki aparati so bili v praksi že preizkušeni, vendar v literaturi ni mogoče zaslediti posebnih uspehov z njihovimi primeri z visoko nabavno ceno teh naprav.

Tudi ultrazvočni val bi v principu bilo mogoče uporabiti za ločenje nekaterih materialov, posebno še, če bi opazovali spremembo dušenja zvočnega vala. Vendar so razlike v dušenju zvočnega vala pri normalno uporabljenih frekvencah 1 do 6 MHz bolj očitne zaradi heterogenosti na mejah kristalov, kot pa zaradi drugih efektov, ki so povezani s sestavo jekla in ni pričakovati večjih uspehov s to metodo.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel sind die gegenwärtigen Methoden der Trennung ferromagnetischer Stoffe nach der Zusammensetzung und der thermischen Bearbeitung beschrieben. Die Methoden sind für eine teilweise oder eine vollkommene Automatisierung vor allem für ferromagnetische Stoffe geeignet.

Die gebräuchlichsten Methoden sind heutzutage diejenigen, welche auf Wirbelströmen beruhen und auch die Entwicklung neuer Anlagen geht in der Richtung elektromagnetischer Methoden. Es sind drei Arten der Bewertung der Ergebnisse, welche durch zerstörungsfreie Messungen der magnetischen Parameter vor allem der relativen Permeabilität gewonnen worden sind, beschrieben. Die Trennbarkeit der einzelnen Effekte wie Permeabilität, Leitfähigkeit, Abmessungen und die echten Fehler ist stark von der Frequenz abhängig mit welcher der Versuch durchgeführt wird. Bei der Trennung der einzelnen Stahlsorten

spielt die relative Permeabilität die grösste Rolle. Dieser Effekt ist aber nicht vom Effekt der Abmessung zu trennen, deshalb ist ein übertriebener Komfort der Elektronik unnötig. Gerade deswegen haben wir bei der eingenen Konstruktion des Magnetoskopes eine hohe Empfindlichkeit mit den niedrigen Anschaffungskosten zu vereinigen versucht, unter der Voraussetzung, dass das untersuchte Werkstoff in gewissen Grenzen gleichmässig ist.

Die Beschreibung der Anlagen zeigt, dass die Entwicklung noch lange nicht beendet ist. Wir hoffen, dass sich die einzelnen Methoden in der Praxis bis zu den industriellen Reife vervollständigen werden, welche der Automatisierung der Kontrolle, vor allem bei der thermischen Bearbeitung dienen sollen und dessen Anschaffung auch auf dem Innenmarkt möglich sein wird.

SUMMARY

In the article the newest techniques of separation of ferromagnetic materials due to their composition and heat treatment are described. The techniques are suitable for complete or partial automation, especially for ferromagnetic materials.

The most useful methods nowadays are those which are based on the eddy currents. Also the development of new equipment proceeds in the direction of electromagnetic methods. Three methods for result estimation are described where results were obtained by non-destructive measurements of magnetic parameters, chiefly of magnetic permeability. Separability of individual effects as permeability, conductivity, dimensions and actual defects depends a great deal on the frequency used in the experi-

ments. In separating different steels, relative permeability is the most important. This effect should not be separated from the dimension effect, therefore a surplus electronic comfort is not necessary. In our own design of magnetoscope high sensitivity was tried to be combined with a low cost price, assuming that the tested material is uniform in certain limits.

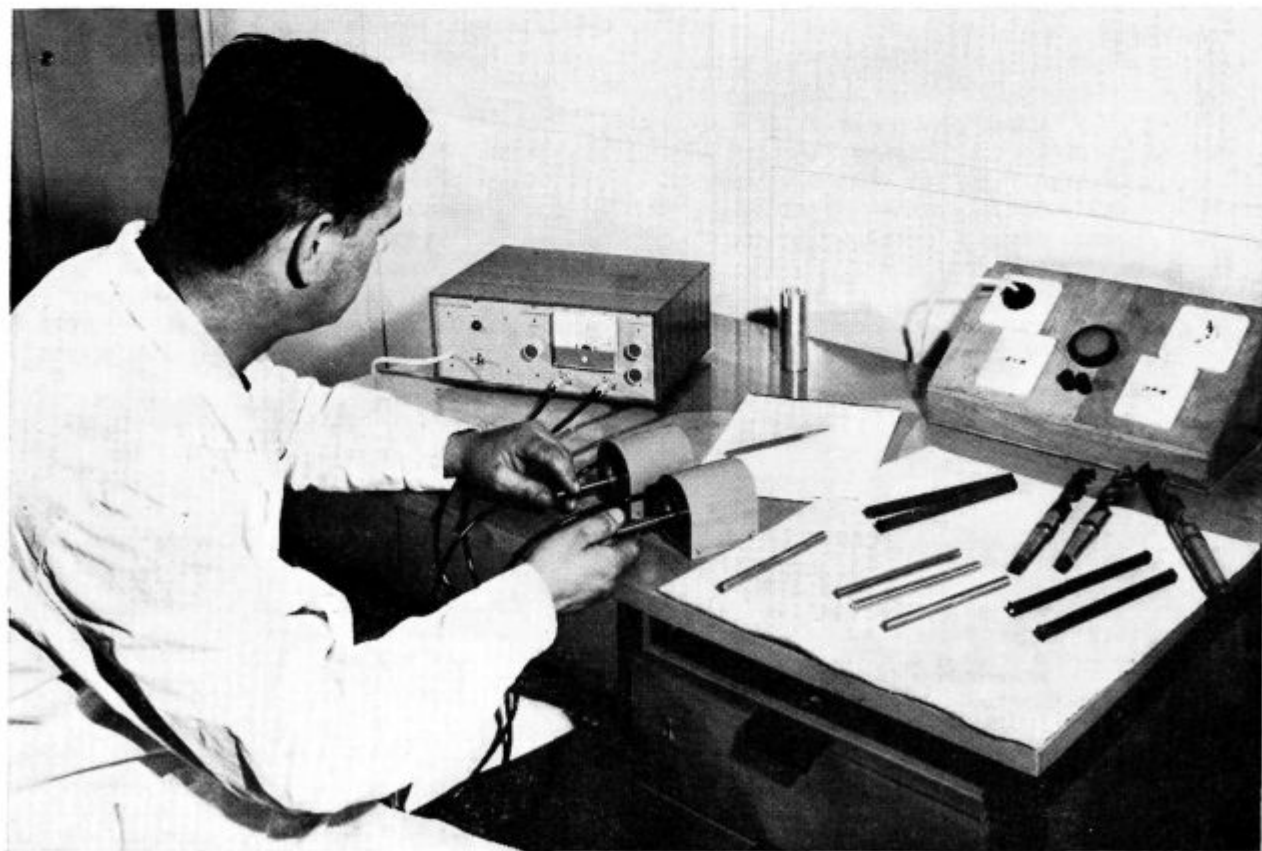
Description of the equipment shows that the development is not yet finished. We hope that individual methods will find improvements in practice to such an extent that their industrial use for automatic control, especially at the heat treatment, will be justified and that the equipment will be accessible also on our internal market.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны современные методы отделения материалов по составу и по тепловой обработке. Методы приготовлены для применения при частичной и полной автоматизации в особенности для ферромагнитных материалов. Эти методы, при которых употребляется вихревой ток, находясь теперь в широком употреблении и развитие новых приборов устремлено к их усовершенствованию.

В статье описаны три способа оценки результатов полученных измерением магнитных параметров в особенности проницаемости методом без разрушения. Охарактеризован отдельные эффекты, как например магнитная проницаемость, проводимость, размерность и действительные дефекты, зависит от рабочей частоты с которой выполняем исследование. Для отделения отдельных

сортов стали между собой самую важную роль имеет относительная проницаемость. Но этот эффект невозможно отделить от эффекта размерности поэтому электронное приспособление излишне; исследование было ограничено выделкой домашнего магнитоскопа, в котором соединены высокая чувствительность и низкая стоимость прибора, но с условием, что испытываемый материал в определённых границах однороден. Все описанные приборы доказывают, что их развитие ещё не закончено. От промышленной практики желательно, что она воспринимит и усовершенствует отдельные методы в промышленности до такой степени, что они будут употребимы для автоматизации контроля, в особенности при тепловой обработки и возможности снабжения на домашнем рынке.



Magnetoskop domače izdelave v pogonu.