

CAPITOLUL 3

DEFECTOSCOPIA CU PULBERI MAGNETICE

1. PARTICULARITATI

Aplicațiile industriale ale defectoscopiei cu pulberi magnetice datează din jurul anului 1930, ajungând astăzi una dintre cele mai răspândite și eficiente metode de examinare. Ea are la bază analiza câmpurilor magnetice create prin magnetizarea piesei sau a zonei controlate.

Metoda poate fi aplicată facil materialelor feromagnetice formate din cca. 1000 de și aliaje, dintre care cele mai importante sunt: Fe, Co, Ni și aliajele acestora. La urî defectoscopia cu pulberi magnetice poate fi aplicată tuturor sortimentelor de structură a feritice, ferito-perlitice, ferito-martensitice și martensitice, și nu poate fi aplicată oțelurilor de structură 8, austenitice.

Principalele mărimi magnetice - forța coercitivă, magnetizația de saturație, permeabilitatea și inducția remanentă - depind de compoziția chimică, formele de cristalizare, tipul structurii, cantitatea de dislocații și de incluziuni etc. Forța coercitivă este influențată mai ales de structură și doar în mică măsură de compoziția chimică. Magnetizația de saturație este influențată de modificările elementelor de aliere, deci de compoziția chimică și în mai mică măsură de structură.

Modificările de permeabilitate magnetică superficială și subsuperficială provocate de prezența unor discontinuități conduc la modificarea liniilor de câmp magnetic, obligând ca acestea să se închidă la suprafața piesei. Astfel se formează fluxul magnetic de dispersie, ca element de bază al observării, examinării și înregistrării discontinuităților de la suprafața piesei controlate.

Multitudinea procedeeleor de magnetizare conferă metodei o bună adaptabilitate la complexitatea geometrică și dimensională a pieselor.

În ceea ce privește de decelabilitate a discontinuităților, se precizează că dacă la un control de rutină aceasta se situează în domeniul $0,5 \div 1$ mm, la un control optim coordonat se poate ajunge la detectarea unor discontinuități cu deschideri de până la 0,001 mm.

2. CARACTERIZAREA CÂMPULUI MAGNETIC ȘI TIPURI DE MATERIALE

În exteriorul corpurilor magnetizate, inclusiv în vid se definesc două mărimi vectoriale ale câmpului magnetic, intensitatea \vec{H} și inducția magnetică \vec{B} , legate între ele prin relația:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (T) \quad (1)$$

unde μ_0 este caracteristica de permeabilitate a vidului, care este o constantă numită și constanta de inducție, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ [H/m]. În tabelul 1 sunt prezentate unitățile de măsură în sistemul SI și CGS pentru principalele mărimi magnetice și electrice.

Intr-un corp magnetizat se definesc trei mărimi ale câmpului magnetic, primele două fiind \vec{H} și \vec{B} , iar cea de a treia, magnetizația \vec{M} . Ele sunt legate prin relația:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

Magnetizația se definește pe baza relației:

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{m}_k}{V} \quad (A/m) \quad (3)$$

unde $\sum \vec{m}_k$ a este suma vectorială a momentelor magnetice din volumul V.

Starea de magnetizație sau intensitatea de magnetizație a corpurilor poate să fie temporară, notată cu \vec{M}_t dacă se manifestă numai în prezența unui câmp magnetic exterior, sau permanentă, notată cu \vec{M}_p , dacă este independentă de prezența câmpului magnetic exterior. Magnetizația temporară este dependentă de intensitatea câmpului magnetic, conform relației:

$$\vec{M}_t = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (4)$$

în care: χ_m reprezintă susceptivitatea magnetică, o constantă de material, ce poate avea valori pozitive sau negative.

Referitor la magnetizația corpurilor, s-a observat că unele dintre acestea se magnetizează temporar, iar altele se magnetizează permanent. Din prima categorie fac parte așa-numitele materiale neferomagnetice, iar din a doua materialele feromagnetice.

Tabelul 1

Nr crt	Mărimea	Simbol	Dimensiune (LMTI)	SI	CGS	Relații
1	Intensitatea curentului electric	I	I	A	Bi	4Bi = 10 A
2	Tensiunea electrică	U	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	V	$10^{-8}V$	-
3	Rezistența electrică	R	$L^2MT^{-3}I^{-2}$		$10^{-9}\Omega$	-
4	Intensitatea câmpului magnetic	\vec{H}	$L^{-1}I$	A/m	Oe	1 Oe = 79,6 A/m
5	Inducția magnetică	\vec{B}	$MT^{-2}I^{-1}$	T (1 T = 1 Wb/m ²)	Gs	1 Gs = 10^{-4} T
6	Fluxul magnetic	Φ	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	Wb (1 Wb = 1 V·s)	Mx	1 Mx = 10^{-8} Wb
7	Magnetizația	M	L^{-1}, I	A/m	Bi/cm	1 Bi/cm = 10^3 A/m
8	Tensiunea magnetică	U_m	I	A (As)	Gb	1 Gb = 0,0796 A
9	Reluctanța	R_m	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	A/Wb	$10^9/4\pi A/W$	-
10	Inductivitatea	L	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	H	$10^{-9}H$	1 H = 1 Ωs
11	Permeabilitatea	μ	$LMT^{-2}I^{-3}$	H/m	$4\pi \cdot 10^{-7} H/m$	-

Materialele neferomagnetice sunt așa-numite materiale magnetice liniare, adică relația $B=B(H)$ este o funcție liniară.

Astfel:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (5)$$

în care:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (6)$$

se numește permeabilitatea magnetieă absolută, iar

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (7)$$

se numește permeabilitatea magnetică relativă a materialului.

Din punct de vedere al permeabilității relative (μ_r) și a susceptivității (χ_m), materialele neferomagnetice sau cu magnetizație liniară se împart în două categorii:

- Materiale diamagnetice (ex.: Cu, Zn, Ag, Pb), care se magnetizează în sens opus câmpului magnetic aplicat: $\vec{M} \uparrow - \downarrow \vec{H}$, având $\chi_m < 0$ și deci $\mu_r < 1$. Moleculele acestor materiale nu au inițial moment magnetic rezultat (materiale nepolare) ele căpătând, printr-un fenomen de inducție electromagnetică, un moment magnetic orbital, de sens opus câmpului exterior. La substanțele diamagnetice χ_m nu depinde de temperatură.

- Materialele paramagnetice (ex.: Al, Cr, O, aer) se magnetizează în sensul câmpului magnetic aplicat: $\vec{M} \uparrow - \downarrow \vec{H}$, având $\chi_m > 0$ și deci $\mu_r > 1$. Moleculele acestor materiale nu au un moment magnetic propriu spontan (materiale polare) din cauza orientării dezordonate, momentul magnetic microscopic fiind nul. La aplicarea unui câmp magnetic exterior, momentele magnetice tind să se orienteze în direcția câmpului, ordonării opunându-se agitația termică. Rezultă o magnetizare pozitivă dependentă de temperatură prin susceptibilitate:

$$\chi_m = \frac{k}{T} \quad (8)$$

unde: k este o constantă de material; T este temperatura absolută ($^{\circ}\text{K}$). La materialele neferomagnetice μ_r este foarte apropiată de unitate, practic putându-se considera $\mu \approx 1$, iar permeabilitatea absolută se poate lua $\mu \approx \mu_0$.

La materialele dia și paramagnetice valorile lui χ_m sunt mici, de ordinul 10^{-5} - 10^{-3} . Materialele feromagnetice prezintă o clasă specială a materialelor cu molecule polare, care se magnetizează extrem de puternic, neliniar și ireversibil, prezentând histerezis și magnetizare permanentă. La aceste materiale (ex.: Fe, Co, Ni) permeabilitatea relativă are valori extrem de mari, de ordinul 10^2 - 10^5 , având $\chi_m > 0$.

Datorită faptului că $B=B(H)$ este o funcție neliniară, aceste materiale intră în categoria materialelor magnetice neliniare. Dintre constituenții structurali, ferita are cea mai mare permeabilitate magnetică. Cementita secundară și martensita sunt feromagnetice, dar cu o permeabilitate mai slabă decât a feritei. Fierul γ sau austenita este paramagnetic.

Tratamentul de călire, ca de altfel creșterea conținutului de carbon, mangan și crom scade magnetismul remanent, magnetizația de saturație și permeabilitatea și mărește câmpul coercitiv. Recoacerea și revenirea au efecte contrare, ca și mărirea conținutului de siliciu și chiar de nichel.

Introducând un corp feromagnetic în câmpul magnetic al unui conductor, se observă că la o intensitate mică a câmpului se obține o inducție puternică. Această comportare se explică pe baza teoriei microscopice a fenomenelor electromagnetice.

După cum se știe, conform acestei teorii, magnetismul este produs de sarcini electrice elementare în mișcare. Electronii deplasându-se pe orbite în jurul nucleului în mișcare de precesie și concomitent în jurul propriei axe de rotație - spinul electronului - dau naștere unor momente cinetice și de spin, care, însumate, formează momentul magnetic al atomului. În prezența câmpului magnetic, momentele magnetice se orientează astfel încât se obțin așa-numitele domenii Weiss cu spini orientați.

Materialele din această categorie sunt feromagnetice, atingând magnetizația de saturație când toate domeniile ajung orientate.

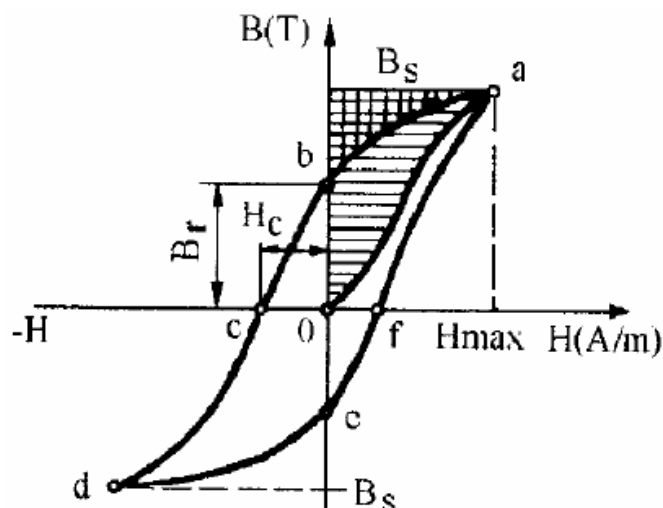


Fig. 1. Curba de magnetizare a materialelor feromagnetice

În prezența câmpului exterior, la aceste materiale are loc de fapt o orientare a domeniilor și o suprapunere între câmpul de excitație și câmpul magnetic propriu, deformarea câmpului uniform exterior și concentrarea în corpul din material feromagnetic. Odata cu creșterea câmpului H se mărește inducția B , în cazul primei magnetizări, după curba oa din figura 1, numită curbă de primă magnetizare.

Punctul a corespunde saturației magnetice a materialului, având semnificația limitării inducției magnetice, la valoarea de saturație B_s .

Dacă se micșorează intensitatea câmpului după atingerea saturației, inducția va scădea după curba a - c, determinând o inducție remanentă B_r la $H = 0$ (punctul b), corpul devenind astfel magnetizat permanent $M_r = B/\mu_0$. Schimbând sensul câmpului magnetic, inducția scade până la valoarea $B = 0$, definind în punctul e al curbei, câmpul necesar pentru anularea fluxului, numit câmp coercitiv sau forță coercitivă H_c . Mărind magnetizarea în sens opus, se ajunge la saturația negativă (punctul d), ca apoi, prin micșorarea câmpului negativ și schimbarea sa, inducția să crească din nou până la închiderea curbei în punctul a.

Bucula a, b, c, d, e, f, a, descrisă la variații ale câmpului H , poartă denumirea de buclă de histerezis. Dependenta $B=f(H)$ nu este liniară, deoarece permeabilitatea nu este constantă. Proprietățile magnetice ale materialelor pot fi descrise și mai simplu prin maximum lui μ_r respectiv μ_{rd} . Curbele de primă magnetizare la diferite materiale sunt indicate după [25] în figura 2. În figura 3 se prezintă caracteristicile complete de magnetizare ale oțelului foarte uzual OL37.

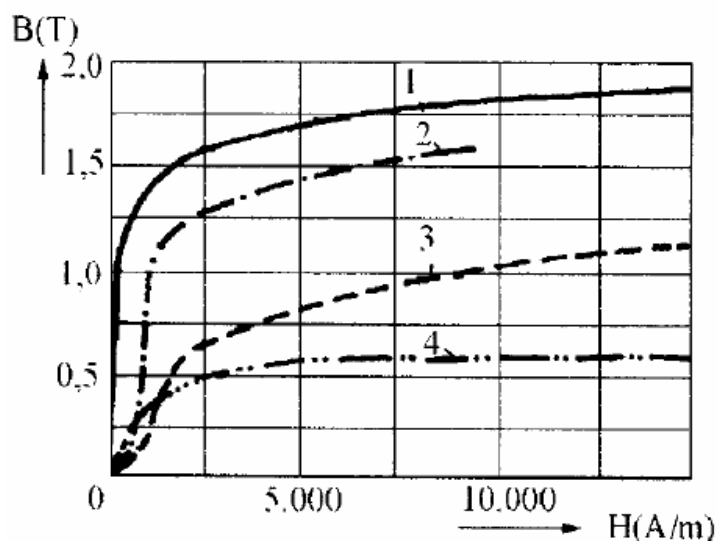


Fig. 2. Curbe de primă magnetizare ale unor materiale: 1 -tablă electrotehnică; 2 - oțel de scule; 3 - fontă cenușie; 4-nichel pur la 900°C

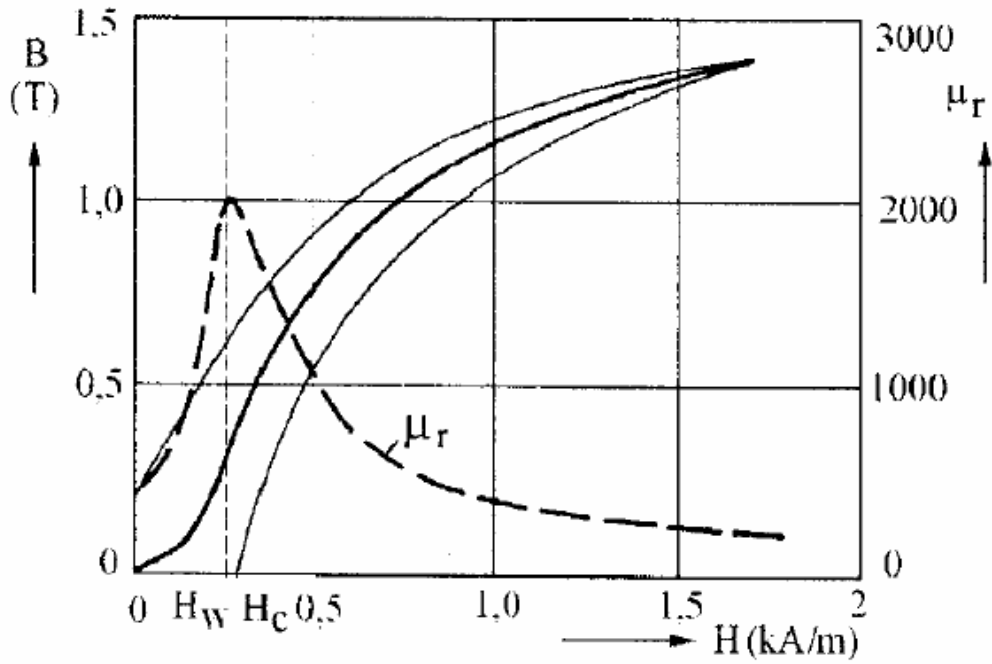


Fig. 3. Caracteristica de magnetizare a oțelului OL37

Proprietățile magnetice descrise, dispar dacă se depășește o anumită temperatură (punctul Curie), care la fier este 761°C, la nichel 360°C etc., materialul devenind paramagnetic. Suprafața delimitată de curba de primă magnetizare și inducția de saturație B_s (zonă hașurată simplu și dublu în figura 1), reprezintă energia specifică a unității de volum, consumată pentru producerea magnetizării:

$$W_v = H_{\max} \cdot B_s - \int_0^{H_{\max}} \bar{B} \cdot d\bar{H} = \eta \cdot B^{1,6} \quad (9)$$

unde η este un coeficient de material.

Din această energie, o parte este consumată prin căldură în circuit (zona simplu hașurată în figura 1).

$$W_{v_c} = H_{\max} \cdot B_r + \int_{H_{\max}}^0 (\bar{B} + \bar{B}_r) \cdot d\bar{H} - \int_0^{H_{\max}} \bar{B} \cdot d\bar{H} \quad (10)$$

iar o parte este redată circuitului la schimbarea polarității curentului de magnetizare (zona dublu hașurată din figura 1).

$$W_{v_r} = H_{\max} \cdot B_s - \int_{H_{\max}}^0 \bar{B} \cdot d\bar{H} \quad (11)$$

Pentru caracterizarea materialului, în jurul unei anumite stări, figura 4, corespunzătoare unei perechi de valori B și H , se definesc:

- Permeabilitatea magnetică relativă statică (totală)

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (12)$$

care variază cu \bar{H} atingând un maxim pentru a scădea și a tinde către 1 pentru $H \rightarrow \infty$. Variația permeabilității relative în funcție de intensitatea câmpului H la o gamă largă de oțeluri este evidențiată grafic în figura 5. Se observă că la majoritatea oțelurilor curbele $\mu_r = f(H)$ prezintă câte un maxim în domeniul $H = 0,8 \div 1,5$ kA/m urmat de o scădere lentă spre valori mai ridicate ale câmpului H . Fac excepție oțelurile cu conținut scăzut de carbon precum și unele oțeluri slab aliate cu mangan.

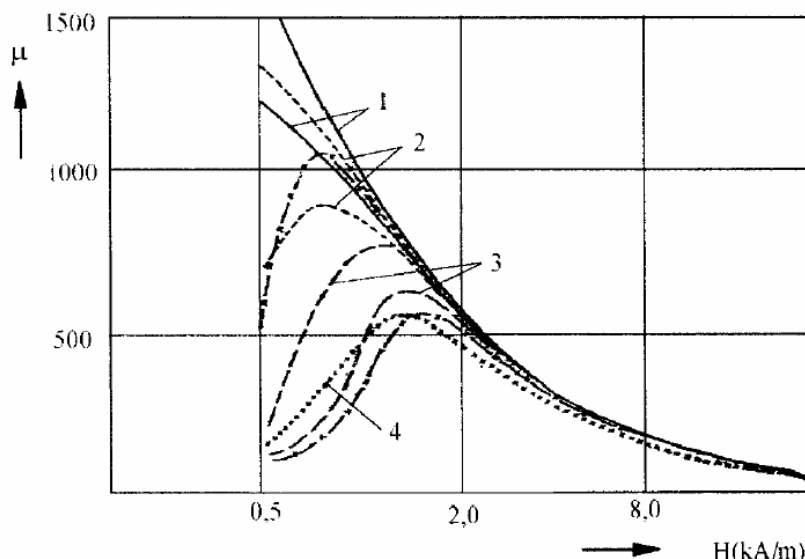


Fig. 5. Variația permeabilității relative în funcție de intensitatea câmpului magnetic:

- 1 - oțeluri cu C scăzut; 2 - oțeluri slab aliate C - Mn sau C - Mn - Mo; 3 - oțeluri aliate cu puțin Cr; 4 - oțeluri cu 13% Cr

- Permeabilitatea magnetică relativă diferențială (sau incrementală)

$$\mu_{rd} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \right)_{\text{sens direct}} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB}{dH} \right)_{\text{sens direct}} \quad (13)$$

care este proporțională cu panta curbei de magnetizare față de axa absciselor (coeficientul unghiular al tangentei în punctul dat P), la variația lui H în sens direct.

- Permeabilitatea magnetică reversibilă

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B'}{\mu_0 \cdot \Delta H'} \right)_{\text{revenire}} \quad (14)$$

Dacă scade câmpul cu $\Delta H'$, în punctul P, înainte de a se atinge saturația și apoi se mărește din nou câmpul cu $\Delta H'$, se descrie un mic ciclu de histerezis, foarte turtit, care se poate confunda cu o dreaptă (numită dreaptă sau curbă de revenire), mai puțin înclinată față de abscisă decât tangenta în punctul P. Această transformare practic reversibilă este caracterizată de μ_{rev} . În general, μ_{rev} este mai mică decât μ_r și decât μ_{rd} . Această valoare atinge maximum pentru $B = 0$, când coincide cu permeabilitatea în origine a curbei de primă magnetizare, care se numește permeabilitate inițială:

$$\mu_{in} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H} \right)_{H=0, B=0} \quad (15)$$

Materialele feromagnetice se împart în trei categorii distincte:

- Materiale magnetice moi, care au $H_c < 80$ A·s/m, deci un ciclu de histerezis îngust și permeabilități foarte mari. Cel mai caracteristic material de acest fel este fierul moale, cu 4% SI și permalloyul, cu 78,5% Ni și 21,5% Fe;

- Materiale magnetice dure, care au $H_c > 4000 \text{ A}\cdot\text{s/m}$, deci ciclu de histerezis lat și permeabilități mici. Cel mai caracteristic în acest sens este oțelul cu 1% C, aliajul Al-Ni-Co sau alnico cu 12% Al, 20% Ni, 5% Co și 63% Fe.

Diferențele de comportare dintre materialele feromagnetice moi și dure dispar dacă $H > 2 \div 3 \text{ kA/m}$;

- Feritele, care sunt o clasă specială de materiale feromagnetice, formate din combinații de oxizi de fier, Fe_2O_3 cu oxizi de metale bivalente MO. Peritele se caracterizează prin inducții B_s și B_r foarte mici (0,1 ... 0,4 T) și prin pierderi neînsemnate prin curenți turbionari, în special la frecvențe înalte.

În tabelul 2 se indică valorile principalelor mărimi magnetice la unele tipuri de oțeluri și fonte.

Coroborând datele din tabel cu cele rezultate din figura 2 se constată că pentru câmpuri de peste 2000 A/m se depășește punctul de saturație corespunzând permeabilității relative maxime, adică:

$$|B|_{\mu_r \max} = \mu_0 \mu_r \max |H|_{\mu_r \max} \leq 0,72 \text{ T} \quad (16)$$

Excepție fac unele oțeluri inoxidabile și fontele cenușii la care magnetizarea trebuie realizată cu valori mai ridicate ale mărimilor de câmp. După standarde, condițiile minime de magnetizare impuse la controlul cu pulberi magnetice [11], [57], sunt $B = 0,72 \text{ T}$, respectiv $H_t = 2400 \text{ A/m}$.

Tabelul 2

Nr. crt.	Tipul oțelului, respectiv a fontei	H coresp. unei inducții de 0,72 T (A/m)	Inducția (T)		Câmpul magnetic coercitiv H_c (A/m)
			B_r	B_s	
1.	Oțeluri cu $< 0,25\% \text{ C}$	160 – 400	0,6 – 1,1	$> 2,07$	80 – 300
2.	Oțeluri cu $0,25 < \text{C} < 0,5\%$	480 – 1000	1,3 – 1,4	$> 2,04$	1100 – 1200
3.	Oțeluri C – Mn	900 – 1200	0,8 – 1,0	$> 2,05$	500 – 600
4.	Oțeluri slab aliate	1400 – 2000	0,8 – 1,5	$> 2,05$	900 – 2600
5.	Oțeluri inox 13% Cr normalizate	720 – 1200	0,8 – 1,2	1,6 – 1,8	300 – 750
6.	Oțeluri inox 13% Cr îmbunătățite	800 – 3200	0,6 – 1,1	-	1100 – 1500
7.	Oțeluri inox 15% Cr – 5% Ni în stare calită	3500 – 4000	-	-	-
8.	Oțeluri inox feritice	1600 – 2000	0,5 – 0,7	-	700 – 800
9.	Fonte cenușii	3200 – 4000	-	1,6 – 1,8	-
10.	Fonte maleabile	320 – 800	-	1,8 – 1,9	-
11.	Fonte cu grafit nodular – feritice	320 – 500	-	1,8 – 2,0	-
12.	Fonte cu grafit nodular – perlitice	800 – 1200	-	1,6 – 1,8	-

3. FORMAREA CÂMPULUI MAGNETIC DE DISPERSIE ÎN DISCONTINUITĂȚI

Un corp feromagnetic este străbătut de linii de forță sau de linii de câmp. Dacă continuitatea piesei este întreruptă de discontinuități, neomogenități sau defecte având o permeabilitate magnetică diferită de cea a corpului, are loc o modificare bruscă a direcției liniilor de câmp.

Pentru înțelegerea fenomenelor care au loc pe suprafața de separație între două medii diferite se face uz de două legi de bază.

- Legea fluxului magnetic care se scrie sub forma:

$$\Phi_{\Sigma} = \iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (17)$$

și exprimă faptul că fluxul vectorului inducție magnetică printr-o suprafață închisă Σ este nul indiferent de forma suprafeței. Elementul orientat de suprafață $d\vec{A}$ este:

$$d\vec{A} = \vec{n} dA \quad (18)$$

unde reprezintă vectorul unitate normal la suprafață. Din legea fluxului magnetic se deduce teorema conservării componente normale a vectorului inducție magnetică la trecerea dintr-un mediu (1) în alt mediu (2), adică:

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (19)$$

• Legea circuitului magnetic, care într-un regim staționar se exprimă astfel:

$$U_{m\Gamma} = \Theta_{s\Gamma} + \frac{d\Psi_{s\Gamma}}{dt} \quad (20)$$

ceea ce indică că tensiunea magnetomotoare de-a lungul unei curbe închise de contur Γ este egală cu suma dintre solenația corespunzătoare curentului care străbate o suprafață deschisă, mărginită de conturul Γ și derivata fluxului electric prin această suprafață. Din legea circuitului magnetic rezultă teorema conservării componente tangențiale a vectorului intensitate de câmp magnetic la trecerea dintr-un mediu (1) în altul (2), adică vom avea:

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (21)$$

Considerând suprafața de separație între două medii având permeabilitatea μ_1 respectiv μ_2 , unde presupunem $\mu_1 > \mu_2$, într-un punct considerat 0, intensitatea câmpului magnetic din planul de separație (H_t) și inducția, situată normal pe suprafața de separație (B_n), ca și componente ale vectorilor de câmp H și B (figura 6), se află în relațiile (19), respectiv (21).

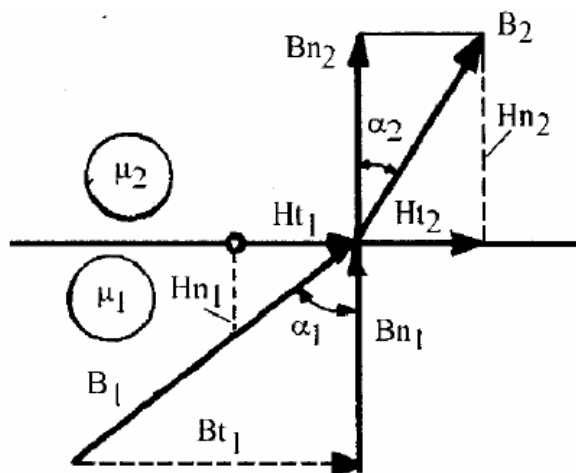


Fig. 6. Caracteristici ale câmpului magnetic la suprafața de separație între două medii având μ_1 , respectiv μ_2

Pe de altă parte:

$$B_{1t} = \mu_1 H_{1t} \quad \text{și} \quad (22)$$

$$B_{2t} = \mu_2 H_{2t}$$

de unde rezultă:

$$\frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (23)$$

Dacă se notează unghiul de intrare din mediul 1 în mediul 2, α_1 și unghiul de ieșire (refracție) în mediul 2, α_2 , se poate scrie:

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{B_{1t}}{B_{1n}} \quad \text{și} \quad \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{B_{2t}}{B_{2n}} \quad (24)$$

de unde prin folosirea relației (23) se obține legea refracției liniilor de câmp magnetic sub forma:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (25)$$

În cazul transferului liniilor de câmp din fier (indice Fe), în aer (indice A), având în vedere $\mu_{\text{Fe}} = 10^2 \div 10^3$ și $\mu_A = 1$, unghiul de refracție în aer va fi:

$$\operatorname{tg}\alpha_A = \frac{\operatorname{tg}\alpha_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}}} \quad (26)$$

Dacă liniile de câmp în fier întâlnesc suprafața de separație cu aerul sub un unghi de $\alpha_{\text{Fe}} = 45^\circ$ și permeabilitatea $\mu_{\text{Fe}} = 100$, rezultă $\operatorname{tg}\alpha_A = 0,01$, ceea ce corespunde unui unghi de refracție $\alpha_A \approx 0,5^\circ$, adică ieșirea liniilor de câmp din piesă în aer se realizează practic perpendicular la suprafața respectivă.

Aceeași lege guvernează și la transferul liniilor de câmp dintr-un spațiu în care are loc o distribuție omogenă, spre o piesă feromagnetică. În acest caz, se produce atât o deviere a liniilor în spațiul apropiat de piesa feromagnetică, cât și o concentrare a lor în interiorul acesteia.

Analizând traiectoria liniilor de câmp magnetic în zona unei discontinuități deschise la suprafață (de exemplu fisura), respectiv în zona unei discontinuități incluzionate în material în apropierea suprafeței, se pun în evidență modificări esențiale, figura 7.

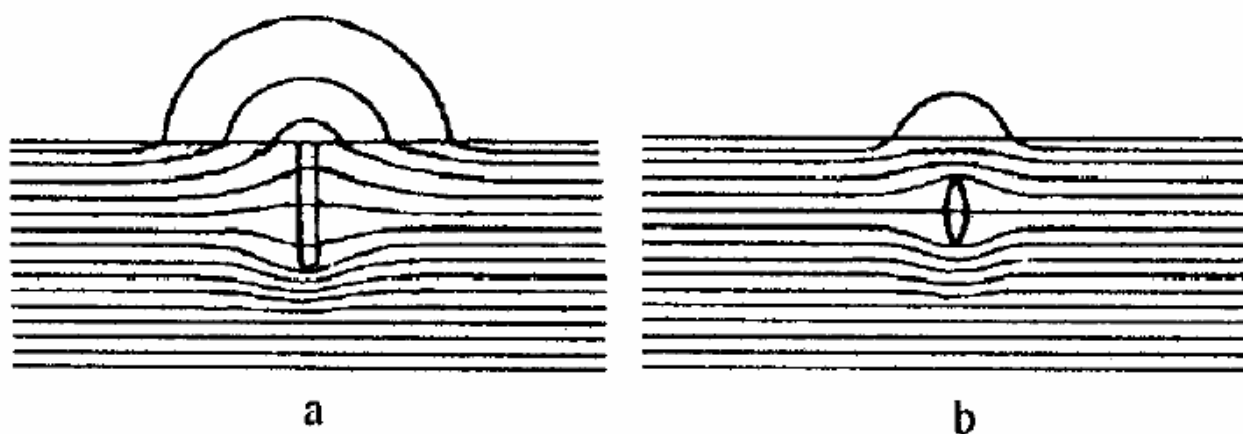


Fig. 7. Formarea câmpului magnetic de dispersie în jurul discontinuităților: a - deschise la suprafață; b - incluzionate în secțiune

Urmare a micșorării permeabilității $\mu_A \ll \mu_{\text{Fe}}$ are loc o mărire a rezistenței magnetice în discontinuitate. Într-adevăr, dacă se consideră expresia tensiunii magnetice în axa unui tub de flux

magnetic de lungime l suficient de subțire pentru a putea considera o repartiție uniformă a fluxului în secțiune și cum $\vec{B} \parallel \vec{H}$, se poate scrie:

$$U_m = \int_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_c \frac{\vec{B}}{\mu} d\vec{l} = \int_c \frac{\Phi}{A \cdot \mu} d\vec{l} = \Phi \int_c \frac{d\vec{l}}{\mu \cdot A} \quad (27)$$

unde reluctanța tubului de flux are expresia:

$$R_m = \int_c \frac{dl}{\mu \cdot A} \quad (28)$$

- A fiind secțiunea transversală străbatută de fluxul Φ .

Dacă în secțiunea lipsită de discontinuitate fluxul magnetic este:

$$\Phi_1 = B_1 \cdot A \quad (29)$$

iar în secțiunea cu discontinuități fluxul magnetic este

$$\Phi_2 = B_2(A - a) \quad (30)$$

$$B_2 = \frac{B_1 \cdot A}{A - a} > B_1 \quad (31)$$

În această situație se disting două cazuri:

- intensitatea câmpului magnetic $H_2 < |H|_{\mu_{\max}}$; în acest caz cu $B_2 > B_1$ pe curba $\mu = f(H)$ corespunde $\mu_2 > \mu_1$ și deci creșterea permeabilității compensează scăderea ariei efective $A - a$, de unde și $R_{m2} \approx R_{m1}$ astfel încât nu se formează un câmp magnetic de dispersie;
- intensitatea câmpului magnetic $H_2 > |H|_{\mu_{\max}}$ în acest caz cu $B_2 > B_1$ îi corespunde pe curba $\mu = f(H)$ un $\mu_2 < \mu_1$ și deoarece și secțiunea A scade la $A - a$, reluctanța crește în mod substanțial. Liniile de flux vor ocoli discontinuitatea și vor fi obligate să se închidă prin aer.

În general liniile de câmp comportă următoarele modificări:

- cele aflate în interiorul piesei sunt obligate să ocolească discontinuitatea, provocând îndesirea în jurul vârfului acesteia;
- parte traversează spațiul dintre suprafețele fisurii;
- liniile aflate mai la suprafață ies din piesă și se închid prin aer și, potrivit legii refracției, ieșirea lor din piesa se produce aproape perpendicular pe suprafață.

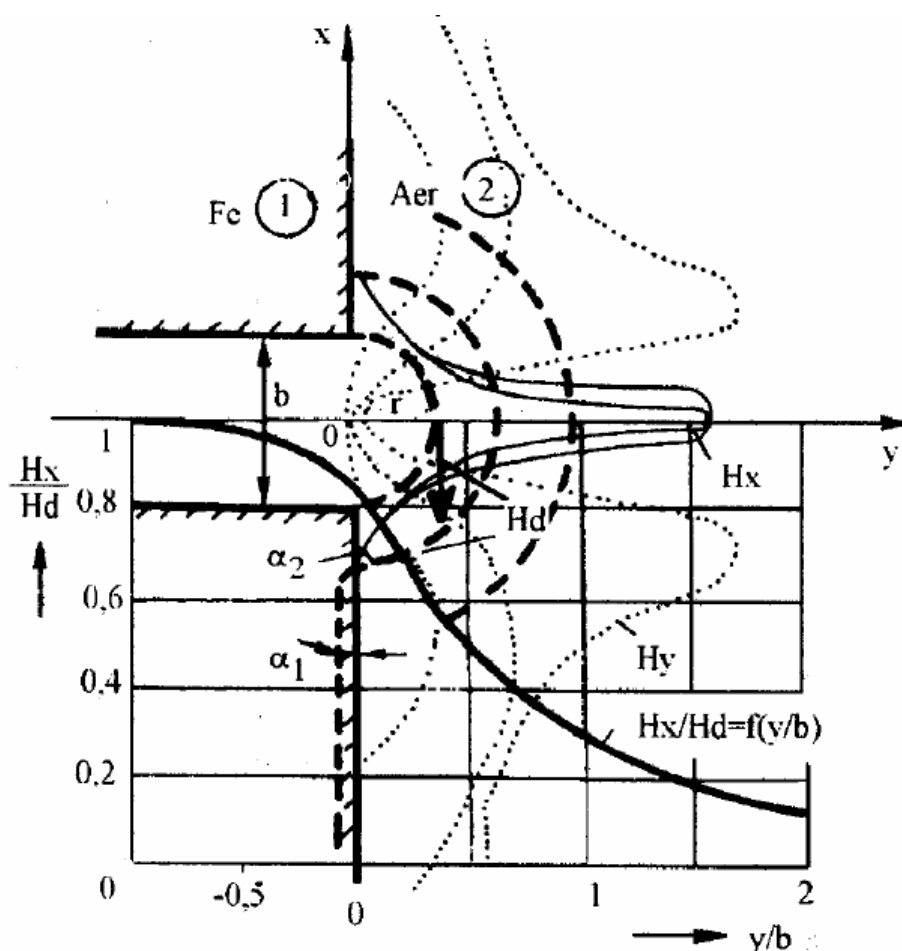


Fig. 8. Distribuția componentelor câmpului magnetic în jurul unei fisuri de adâncime nelimitată

Liniile din ultima categorie formează fluxul magnetic de dispersie. Cum spațiul de ocolire a discontinuității este incomparabil mai mare decât spațiul discontinuității propriu-zise, capacitatea de observare-indicare a defectelor este foarte ridicată.

Câmpul magnetic de dispersie într-o discontinuitate dreptunghiulară de lățime (deschidere) b și de adâncime infinită pe direcția y s-a calculat folosind relațiile de transformare Schwarz - Cristoffel ale reprezentării conforme. Modelul acestui câmp este reprezentat în figura 8.

Se relevă variația câmpului de dispersie din discontinuitate H_d în funcție de componentele sale H_x și H_y și de raportul y/b . Dacă pe adâncime până în stratul superficial $H_x = H_d = B_{Fe}$ din cauză că $\mu_A = 1$ pe direcțiile X și y , valorile componentelor tangențiale și normale ale câmpului se calculează din relațiile:

$$H_x = H_d \frac{b}{\pi} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} = \frac{H_d}{\pi} \cdot \frac{y/b}{(r/b)^2}$$

$$H_y = H_d \frac{b}{\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} = \frac{H_d}{\pi} \cdot \frac{x/b}{(r/b)^2}$$
(32)

Rezultă că liniile câmpului de dispersie sunt semicercuri concentrice în raport cu planul de simetrie a discontinuității, iar variațiile acestora prezintă singularități în axa de simetrie. Variația câmpului tangential perpendicular pe discontinuitate se obține făcând $x=0$ în relația (32):

$$\frac{H_{x \max}}{H_d} = \frac{b}{\pi} \cdot \frac{1}{y} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{y/b} \quad (33)$$

Dependenta $H_x/H_d = f(y/b)$ este reprezentată cu linie plină în figura 8.

Lățimea câmpului de dispersie $b' > b$ ale unor discontinuități circulare cu diametrul d , este funcție de adâncimea h la care se află, conform relației demonstrate în lucrarea [14]:

$$b' = 0,7h + d \quad (34)$$

Acest efect de lupă permite decelarea facilă a discontinuităților situate chiar subsuperficial în interiorul piesei.

Câmpul de dispersie este maxim atunci când liniile de flux interceptează perpendicular discontinuitatea. Pentru practică se consideră satisfăcător dacă unghiul format între liniile de câmp și direcția discontinuității este cuprins între 45° și 90° .

Dacă liniile de flux coincid cu direcția discontinuității nu se mai formează câmpul de dispersie și, ca urmare, defectul nu poate fi detectat.

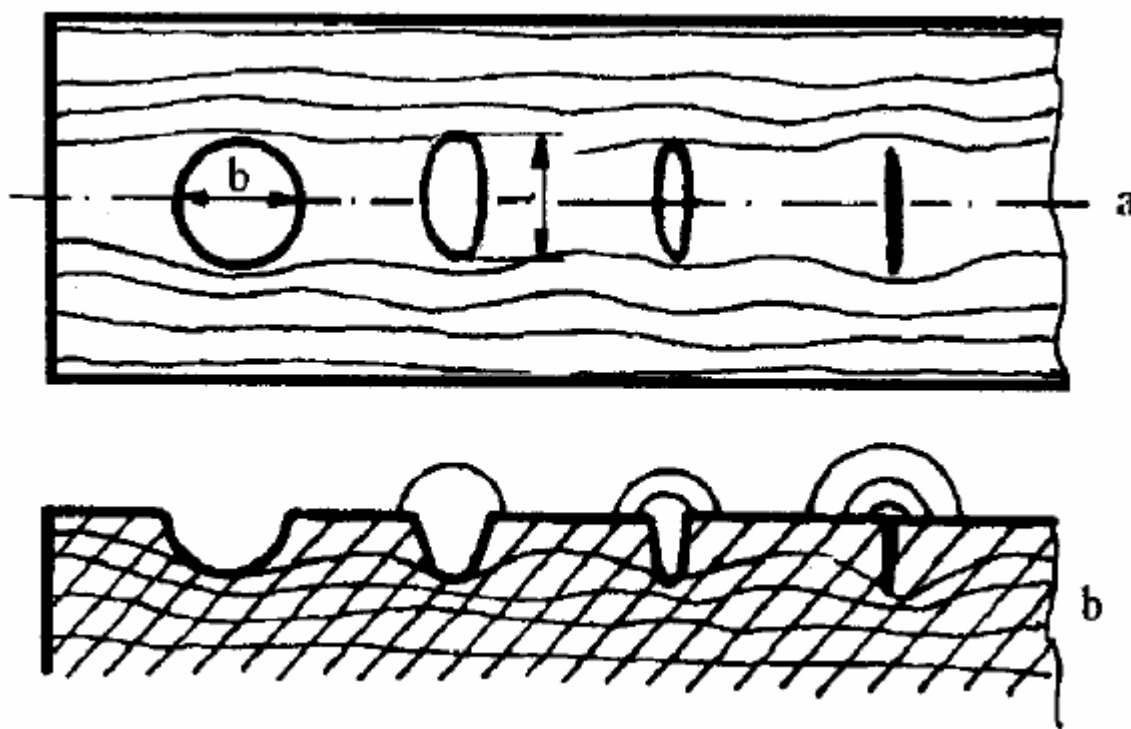


Fig. 9 Modificarea traiectoriei liniilor de câmp magnetic in jurul discontinuităților de forme diferite

Analizând modul de variație a inducției câmpului magnetic de dispersie într-un defect de tip fisură, precum și a permeabilității, cu creșterea intensității câmpului magnetic, se relevă următoarele: câmpul magnetic de dispersie H_d crește aproximativ liniar cu creșterea intensității câmpului până la valoarea corespunzătoare curbării bruște a curbei de primă magnetizare $B = f(H)$, după care rămâne aproximativ constant. Cum permeabilitatea μ corespunzătoare punctului de inflexiune a curbei de primă magnetizare, după un maxim începe să scadă, la valori ridicate ale magnetizării, tinzând la saturație spre valoarea 1, rezistența magnetică devine foarte mare. Aceasta are ca urmare formarea

câmpului de dispersie la orice neregularitate a suprafeței și astfel îngreunează decelarea câmpului de dispersie provocat de defecte. De aceea se consideră că în funcție și de material există un domeniu optim de magnetizare plasat în intervalul 50 - 100 A/cm.

Pe baza experiențelor efectuate de Förster [17], asupra variației permeabilității la diferite forme ale discontinuității, sferice, eliptice, liniare (fisuri) s-a demonstrat importanța raportului dintre lungime (l) și lățime (b). Traseul liniilor de câmp este reprezentat în figura 9. La o inducție B_{Fe} , în material, intensitatea câmpului de dispersie în discontinuitate, depinde numai de raportul l/b și de permeabilitatea μ , conform relației:

$$H_d = B_{Fe} \frac{1 + \frac{1}{b}}{\mu + \frac{1}{b}} \quad (35)$$

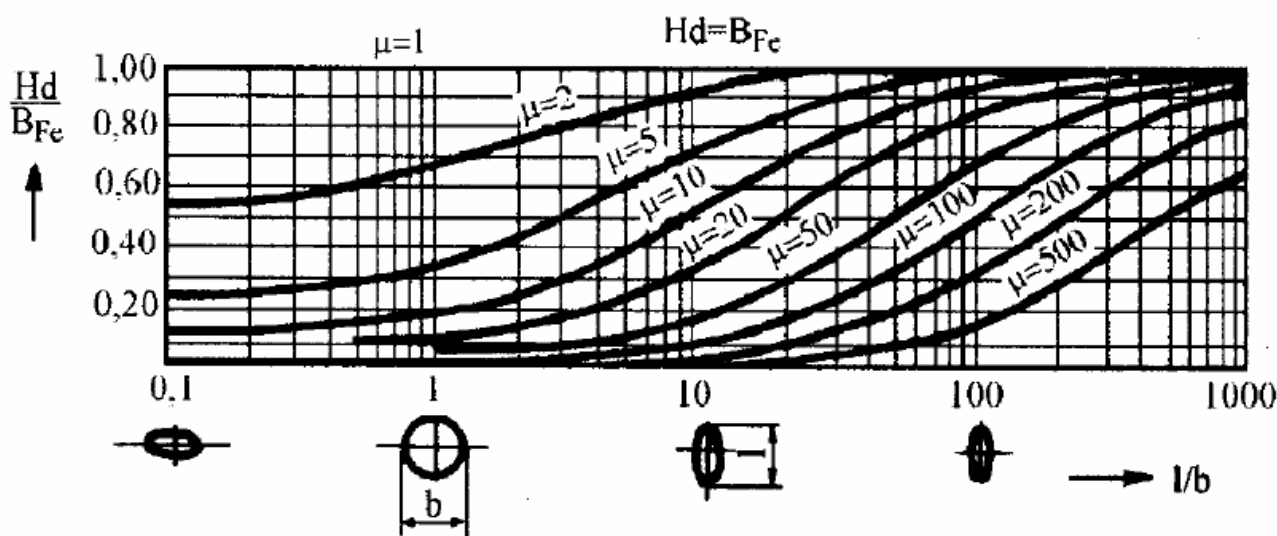


Fig. 10 Variația câmpului magnetic de dispersie la diferite forme de discontinuitate și la diferite valori ale permeabilității

Relația (35) este reprezentată grafic în figura 10 pentru un domeniu acoperitor pentru aplicații ale raportului l/b și valori ale permeabilității cuprinse în intervalul $\mu = 1 \div 500$. Se observă că la o anumită formă a discontinuității, odată cu scăderea permeabilității, intensitatea câmpului magnetic în defect, câmpul magnetic de dispersie, se mărește. La o magnetizare foarte puternică, sau în cazul oțelurilor austenitice, permeabilitatea se apropie de valoarea 1. Astfel, câmpul magnetic din defect devine egal cu inducția din materialul feromagnetic $H_a = B_{Fe}$ și ca urmare liniile de câmp trec prin defect fără a fi deviate. În cazul unei permeabilități foarte mari, liniile de câmp ocolesc discontinuitatea, câmpul magnetic în discontinuitate devine nul și drept consecință nu se mai formează un câmp de dispersie.

La o permeabilitate constantă și deci la un anumit grad de magnetizare, câmpul magnetic din defect crește cu mărirea raportului l/b , ceea ce are ca urmare faptul că metoda se pretează în primul rând la detectarea discontinuităților de tipul fisurilor.

Dacă se ia, de exemplu, curba corespunzătoare valorii $\mu = 20$, din figura 10 se constată că pe câtă vreme la un defect circular câmpul magnetic de dispersie în defect este aproape nul, la un defect de tip fisură câmpul magnetic de dispersie este egal cu câmpul magnetic din materialul feromagnetic ($H_d \approx B_r$).

4. PULBERI MAGNETICE

Pulberea magnetică trebuie să îndeplinească următoarele condiții generale;

- să fie dintr-un material cu permeabilitate ridicată și câmp coercitiv cât mai mic (material feromagnetic moale);
- în funcție de procedeul de aplicare să asigure o granulație corespunzătoare și cât mai omogenă;
- să asigure un contrast corespunzător pe suprafețele aplicate.

4.1. Clasificarea pulberilor magnetice

Pulberile magnetice pentru defectoscopie se pot clasifica în funcție de:

1. destinație:
 - pentru metoda uscată;
 - pentru metoda umedă;
2. natura suportului magnetic:
 - cu suport magnetic pe bază de pulberi de fier;
 - cu suport magnetic pe baza de pulberi de oxizi de fier magnetici;
 - cu suport magnetic pe bază de pulberi din aliaje feromagnetice;
3. culoare, cu variantele:
 - pulberi colorate (roșii, albe, negre, galbene și fluorescente de culori diferite);
 - pulberi necolorate peliculizate;
4. granulație, dată de diametrul mediu al particulelor:
 - granulație fină - pentru fisuri fine, $d_g = 1 \div 15 \text{ }\mu\text{m}$, granulație specifică pentru pulberile în suspensie;
 - granulație medie - pentru fisuri mai mari $d_g = 30 \div 100 \text{ }\mu\text{m}$;
 - granulație grosieră - pentru piese turnate și forjate, $d_g = 100 \div 300 \text{ }\mu\text{m}$, granulație specifică pulberilor uscate.

4.2. Proprietățile pulberilor magnetice

Pulberile magnetice pentru controlul defectoscopic sunt produse solide, granulate pe dimensiuni, colorate, necolorate sau luminoase.

În afară de dimensiuni, culoare, densitate, umiditate, puterea de acoperire, unghi de taluz ale particulelor, interesează, în primul rând, Proprietățile magnetice ale acestor pulberi.

Mărimea particulelor are deosebită importanță pentru sensibilitatea metodei.

Particulele cu dimensiuni mai mici asigură o sensibilitate mare cu condiția îndeplinirii unei permeabilități magnetice corespunzătoare. Pentru obținerea granulației particulelor în corcondanță cu destinația urmărită se pot influența condițiile de lucru astfel ca să se obțină predominant particule cu dimensiunile dorite.

Granulația pulberii, așa cum rezultă și în continuare joacă un rol deosebit de important asupra relevării câmpului magnetic de dispersie. Se ia în considerare pe de o parte capacitatea de vizualizare a zonelor de discontinuitate, iar pe de altă parte pragul de sensibilitate. Funcția densității de probabilitate I și funcția de repartiție 2 a diametrului echivalent al pulberilor utilizate în procedeul umed sunt prezentate după [50], [57], în figura 11. Intersecția funcției de repartiție cu probabilitățile $p=90\%$, $p=50\%$ și $p=10\%$, determină valorile minime, medii și maxime ale diametrului echivalent. Din punct de vedere al aspectului microscopic granulația pulberii poate fi deosebit de variată. În microfotografiile electronice Foto 1 și Foto 2, realizate la o mărire de 5.000 ori sunt arătate două forme tipice de granulație: granulație globulară obținută la o pulbere de trioxid

de fier (Foto 1), respectiv o granulație sub formă de bastonase, obținută la o pulbere fluorescentă (Foto 2).

Culoarea are importanță specială asigurând un contrast cât mai mare între suprafața piesei controlate și pulberea respectiva. Practic, pentru piese de culoare gri sau piese strălucitoare se folosesc pulberi roșii, iar pentru piese de culoare roșie oxi date sau acoperite electrolic se folosesc pulberi negre.

Puterea de acoperire a pulberii magnetice este dată de capacitatea acesteia de a se dispersa pe o anumită suprafață și se exprimă în em'/g . Este de dorit ca această putere de acoperire să fie cât mai mare, dar ea este strâns corelată cu granulația pulberii. Astfel, cu cât granulația este mai mică (pulberea mai fină) puterea de acoperire este mai mare.

Pentru o anumită pulbere unghiul de taluz reprezintă o caracteristică bine determinată. El depinde de mărimea particulelor, forma, densitatea lor, coeficientul de frecare particulă - particulă.

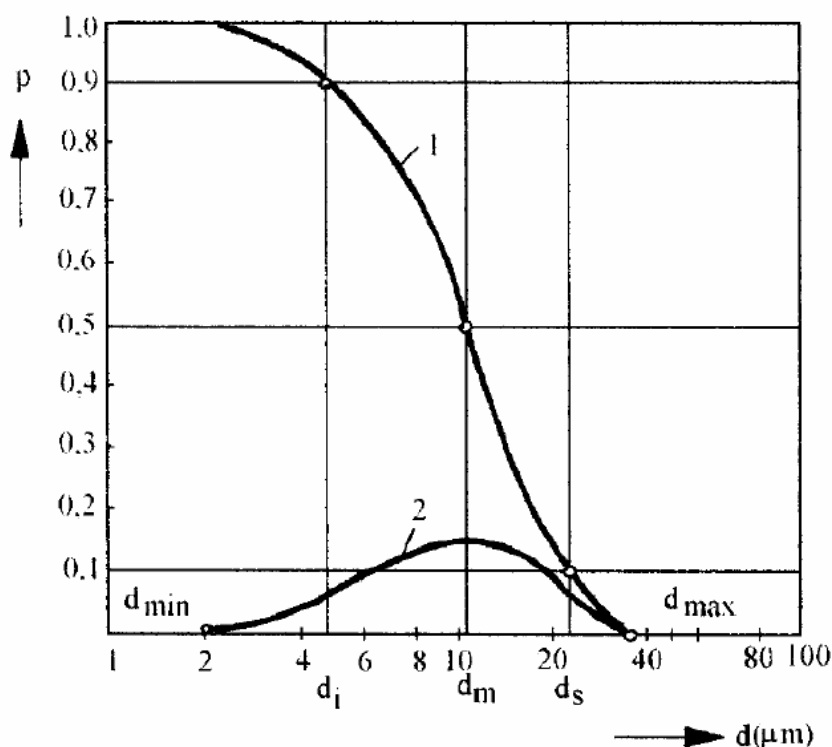


Fig. I11 Funcțiile densității de probabilitate, respectiv de repartiție ale mărimii pulberilor magnetice

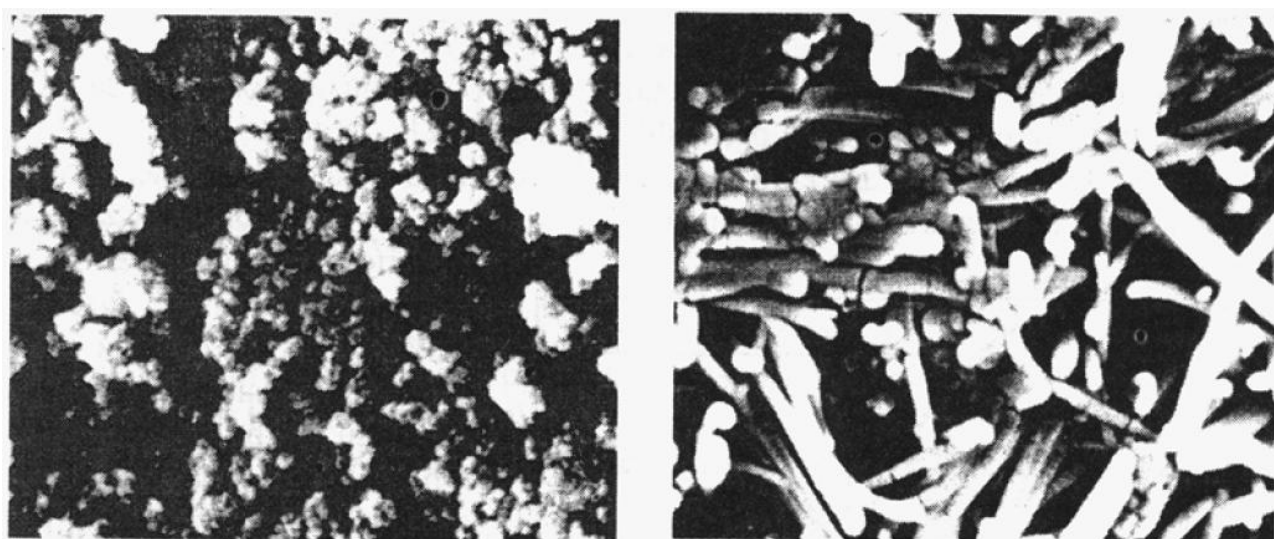


FOTO 1. Microfotografie electronică a pulberii fluorescente cu aspect de busionaye a γ -Fe:On x 50(H) (pulberea granulară la aspect de busionaye a γ -Fe:On x 50(H) pulberii fluorescente. x 5000)

Proprietățile magnetice ale pulberilor magnetice colorate au importanță deosebită asupra aprecierii calitative a acestora.

Variația inducticii magnetice (B) în funcție de câmpul aplicat (H), rezultă din studiul curbei de magnetizare. Între pulberea magnetică uscată și suspensia magnetică colorată sau fluorescentă există diferențe semnificative din acest punct de vedere.

Astfel, la suspensiile magnetice permeabilitatea este sub jumătate din cea obținută la pulberile uscate cenusii. În timp ce câmpul coercitiv H_c și inducția remanentă B_r , sunt superioare. Diferențele respective depind, în mod esențial, de mărimea câmpului de magnetizare. Acestea rezultă în mod concludent din variația raportului B/H , redat după [20] pe tipuri de pulberi, în tabelul 3.

Tabelul 3

Felul substanței	B_r/B_s	
	$H = 400 \text{ A/cm}$	$H = 40 \text{ A/cm}$
Pulbere uscată cenușie	0,031	0,064
Suspensie neagră	0,381	0,044
Suspensie fluorescentă	0,310	0,048

Concentrația pulberii magnetice în suspensie este diferită în funcție de parametri de magnetizare, tipul pulberii, pigmentului și felul lichidului purtător. Pentru a conferi o calitate corespunzătoare, suspensia trebuie să conțină și un antispumant și un anticoroziv. De regulă, ea se încadrează în limitele $0,5 \div 3 \text{ gA}$ pentru pulberea fluorescentă și $1 \div 10 \text{ g/l}$ pentru pulberea obișnuită [1]. Cercetări experimentale, [55], au demonstrat că cu cât concentrația este mai mare, curentul necesar este mai mic.

Densitatea pulberii magnetice influențează calitatea acesteia și depinde în bună parte de natura suportului magnetic și de cantitatea de liant și pigment folosită. Este de dorit ca pentru o anumită granulatie, densitatea să fie cât mai mică, dacă celelalte proprietăți fizice și magnetice rămân constante.

4.3. Materii prime și auxiliare folosite pentru preparare

Ca suport magnetic pentru pulberile granulate se folosesc: magnetită, Fe_3O_4 , trioxid de fier, γ - Fe_2O_3 și pulbere de fier.

Magnetita - Fe_3O_4 - este de culoare neagră și se prezintă sub formă de pulbere foarte fină, care se orientează rapid în câmpul magnetic al defectoscopului.

Pulberea de magnetită se obține din sulfat feros $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ prin precipitare cu bicarbonat de amoniu. Există și alte metode de obținere a acestei pulberi, dar magnetizările produse cu pulberile astfel obținute sunt superioare.

Trioxidul de fier - γ - Fe_2O_3 este de culoare maro, are o magnetizare cu 10 - 15% mai mică decât magnetita și este foarte reactiv din punct de vedere chimic. Trioxidul de fier - γ - Fe_2O_3 se obține în condiții de laborator prin calcinarea magnetitei.

Pulberea de fier se obține prin reducerea trioxidului de fier forma altropă α - Fe_2O_3 , prin procedee specifice pulberilor metalice sau în urma prelucrărilor mecanice, ca produs secundar.

Liantii sunt substanțe anorganice sau organice incolore compatibile cu pulberea și pigmentul și trebuie să asigure o granulare ușoară și un coeficient mic de frecare pe suprafața piesei.

Un contrast superior se obține prin folosirea amestecului de pulbere magnetică cu particule fluorescente. Ca luminofori se folosesc tetraclorura de carbon, antracenu sau dibenzantracenu cu amestec de pigment alb litopon, oxinatul de zinc, oxinatul de magneziu, respectiv de cadmiu. Oxinatul de zinc produce o intensitate maximă a spectrului de emisie la lungimi de undă de 520 nm [7], ceea ce corespunde culorilor verde deschis - galben-verde.

Suspensia folosește, în principal, următoarele lichide purtătoare: petrol, ulei mineral, cu vâscozitate sub 1 - 2° E, amestecuri de petrol cu ulei mineral, sau amestecuri de apă cu anticoroziv și detergent pentru evitarea efectelor nocive de corodare, emulsionare și pentru micșorarea tensiunii superficiale.

4.4. Forțe de interacțiune asupra pulberii magnetice

Asupra pulberii magnetice, dispuse pe suprafață prin procedeul umed, acționează următorul sistem de forțe, figura 12:

- forța de orientare a câmpului de dispersie produs de discontinuitate;
- forța de rezistență hidraulică la deplasarea particulei în suspensie;
- forța de frecare pe stratul limită la suprafața piesei;
- forța gravitațională.

Forța de orientare a câmpului produce deplasarea particulelor din suspensia magnetică în locurile de concentrație maximă a liniilor de flux, apropiindu-le de locul discontinuității. Forța de atracție depinde de dimensiunile particulei, de Proprietățile magnetice ale acesteia, de intensitatea câmpului H_d mai ales de variația acestuia pe direcția fluxului:

$$F_c = \chi \cdot V_0 \bar{H}_d \frac{d\bar{H}_d}{dx} \quad (36)$$

unde: V_0 este volumul particulei; dH_d/dx gradientul câmpului pe lungimea particulei; $\chi = \mu_r - 1$ susceptivitatea magnetică.

Pentru un material dat și un câmp determinat, relația poate fi scrisă în funcție de dimensiunea medie d , a particulelor feromagnetice:

$$F_c = a \cdot d_g^3 \quad (37)$$

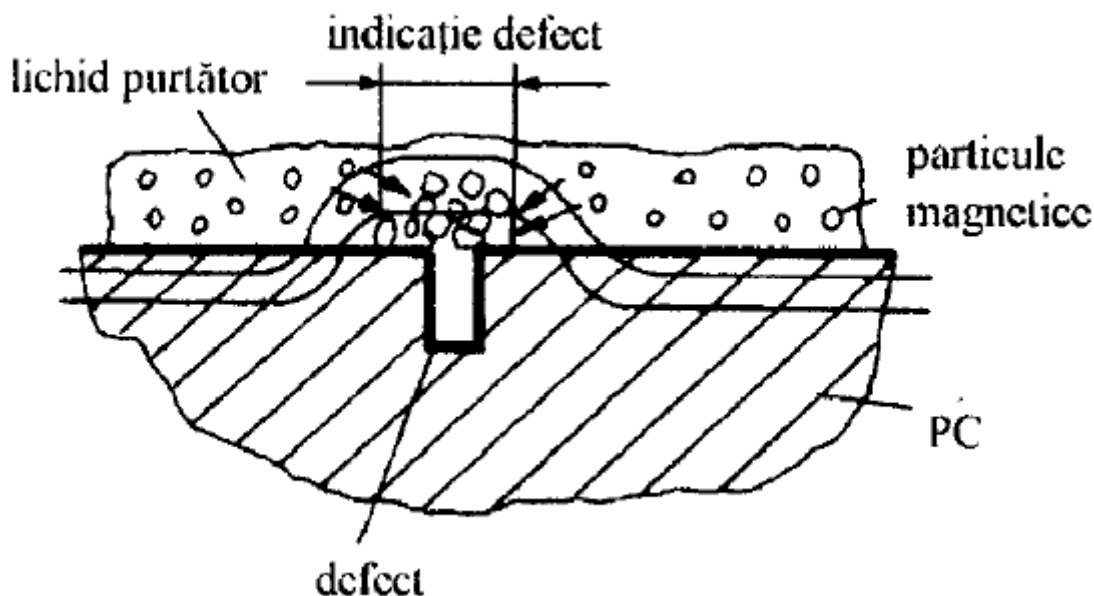


Fig. 12 Mișcarea pulberilor în câmp magnetic de dispersie a discontinuităților

Forța de rezistență hidraulică la deplasarea particulelor în lichidul în care se găsesc în suspensie este proporțională cu suprafața acestora:

$$F_h = b \cdot d_g^2 \quad (38)$$

Forța de frecare pe suprafața piesei este proporțională cu greutatea particulei:

$$F_f = c \cdot d_g^3 \quad (39)$$

Ca urmare, forța rezultantă, care acționează asupra particulei în apropierea unei discontinuități este:

$$F_r = F_c - (F_h + F_f) = \left(a - c - \frac{b}{d} \right) \cdot d_g^3 \quad (40)$$

Dacă se ține seama și de expresia forței de atracție magnetică, se observă că, în funcție de dimensiunile discontinuității, există o granulație optimă a particulelor pentru care forțele perturbatoare sunt minime și ca urmare sensibilitatea metodei, maximă. La stabilirea granulației optime a particulelor feromagnetice se consideră modelul câmpului de dispersie format în jurul unei fisuri infinite de lățime b , figura 13. Variația câmpului magnetic în valoare absolută, curba (H_d), indică maxime în dreptul polilor (+) și (-). Gradientul câmpului variază ca derivata acestuia conform curbei (dH_d/dx), trasată cu linie întreruptă, iar forța de atracție F_d , potrivit liniei întrerupte subțiri. Se evidențiază astfel că forța de atracție în câmpul magnetic de dispersie scade pe măsura măririi distanței față de poli cu o viteză mai mare decât însuși câmpul H_d . În această situație, particulele în suspensie se vor orienta din punct de vedere magnetic și vor fi atrase dacă dimensional este satisfăcută condiția $d, < b/4$. Forța gravitațională se manifestă când examinarea se face în plan înclinat, sau când examinarea se face peste cap. Forța gravitațională acționează în sens opus forței de atracție magnetică micșorând sensibilitatea de detectare a defectelor.

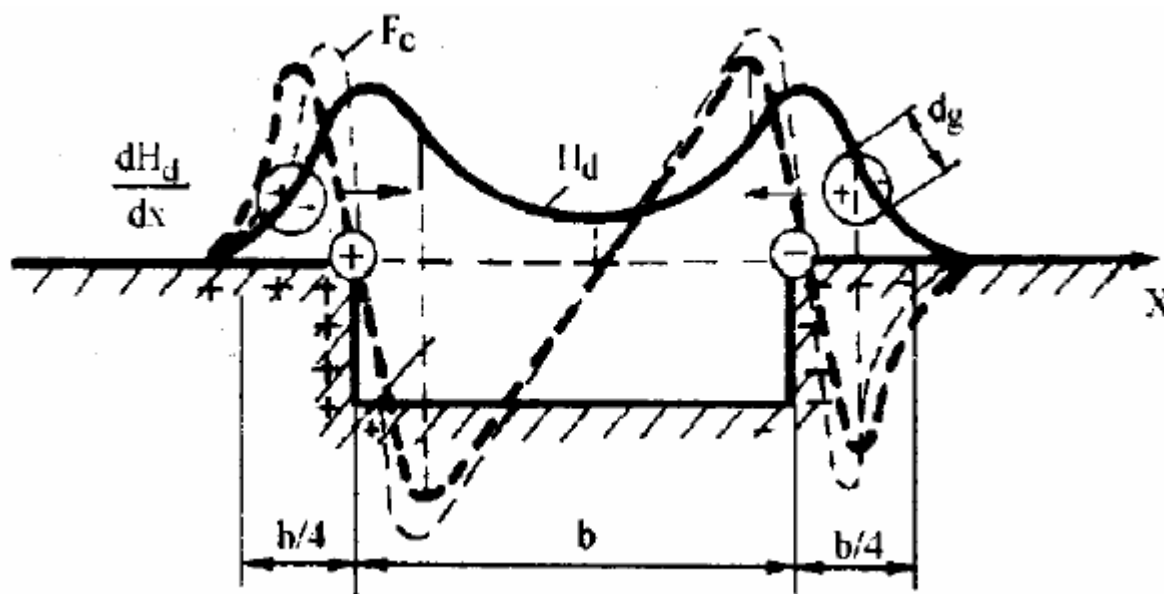


Fig. 13 Distribuția câmpului de dispersie, variația transversală a acestuia în jurul unei discontinuități

5. PROCEDEE DE MAGNETIZARE

Magnetizarea piesei reprezintă o fază indispensabilă examinării cu pulberi magnetice și urmărește producerea unei inducții magnetice suficiente la suprafața piesei. Posibilitățile de magnetizare fiind foarte largi, se impune o selectare judicioasă în funcție de forma și dimensiunile piesei, precum și de tipul defectiunilor urmărite.

În tabelul 4 sunt prezentate principalele 17 metode folosite în mod curent în tehnologia controlului. Procedeele de magnetizare se împart după modul de orientare a câmpului magnetic din piesă, în:

- 1) magnetizare polară sau longitudinală;

- 2) magnetizare circulară sau transversală;
- 3) magnetizare mixtă.

Tabelul 4

Procedeu de magnetizare	Variante de obținere a câmpului magnetic	Tip de curent	Simbol
Polară (Longitudinală)	Cu jug magnetic	Magnet permanent	PJMP
		Curent continuu	PJCC
		Curent alternativ	PJCA
		Impulsuri de curent	PJIC
	Cu bobină de magnetizare	Curent continuu	PBCC
		Curent alternativ	PBCA
		Impulsuri de curent	PBIC
Circulară (Transversală)	Electrozi de contact	Curent continuu	CECC
		Curent alternativ	CECA
		Impulsuri de curent	CEIC
	Conductor interior	Curent continuu	CCCC
		Curent alternativ	CCCA
		Impulsuri de curent	CCIC
	Prin inducție	Curent alternativ	CICA
		Impulsuri de curent	CIIC
Mixtă	Jug magnetic și electrozi de contact	Curent continuu	MJEC
		Curent alternativ	MJEA

Aparatele utilizate la detectarea defectelor se numesc defectoscoape. Ca tipuri constructive se deosebesc defectoscoapele universale Axe cu facilități mai largi de magnetizare (magnetizare mixtă), reglare, de așezare a piesei și de demagnetizare etc. și defectoscoape specializate pentru un anumit tip de piese. La piesele mari se folosește magnetizarea parțială cu ajutorul defectoscoapelor portabile, în cel puțin două direcții pentru a detecta discontinuitățile, indiferent de orientarea lor.

5.1. Criterii de alegere a curentului de magnetizare

Tipurile de curent întrebuințate de diferitele procedee de magnetizare, schemele de redresare, valcarea și variația în timp sunt prezentate în tabelul 5.

Curentul continuu - C.c. - se alege atunci când se dorește obținerea unui efect de adâncime. Pe baza unor experimentări sistematice efectuate asupra unei piese cu orificii cu diametrul de 2 mm, plasate la diferite adâncimi, [53], rezultă că prin utilizarea c.c., adâncimea de detectare a câmpului de dispersie este de 8 ori mai mare decât în cazul curentului alternativ. Inducția realizată este invers proporțională cu suprafața secțiunii transversale a piesei. Se pretează în bună măsură la controlul pieselor lungi și de mari dimensiuni.

Curent alternativ. Dacă magnetizarea se produce într-un câmp variabil în material se induc curenți turbionari. Câmpul magnetic al acestora acționează contrar câmpului aplicat din exterior. Pe de altă parte curentul alternativ provoacă efectul pelicular de distribuție neomogenă a acestuia în secțiune. Inducția produsă la suprafață este invers proporțională cu perimetrul secțiunii piesei. Urmarea directă este obținerea unei magnetizări maxime la suprafața piesei. Adâncimea de pătrundere a (mm) este definită ca distanță de la suprafața conductorului la care amplitudinea câmpului electromagnetic scade la $1/e$ din valoarea înregistrată la suprafață. Ea depinde esențial de frecvență și se calculează cu relația:

$$\mu_r \cdot f \cdot l$$

unde f - este frecvența curentului (Hz), μ_r - permeabilitatea relativă a materialului (H/m) iar A - conductivitatea electrică (m/R mm²)

Folosirea c.a. este optimă când se dorește detectarea unor discontinuități foarte fine de la suprafața piesei, respectiv controlul de serie a unor piese mici și mijlocii. În schimb, nu este convenabil în cazul pieselor lungi.

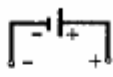
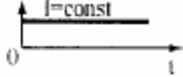
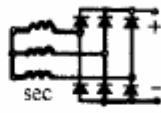
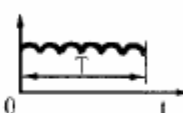
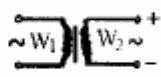
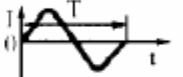

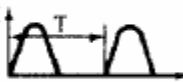

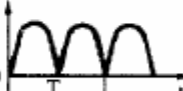

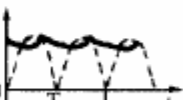
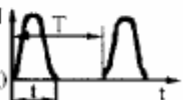
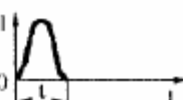
Alimentarea în curent alternativ prezintă și avantajul unei soluționări simple a demagnetizării, chiar în instalația de magnetizare, prin scăderea curentului la zero.

Curentul pulsat combină în fapt avantajele celor două cazuri anterioare. Experimentări comparative cu cele descrise au demonstrat că adâncimea de detectare poate ajunge de 7 ori mai mare decât în cazul alimentării în c.a. Coeficientul de umplere al curentului pulsat reprezintă un factor important în detectia defectelor, deoarece deplasarea pulberii în câmpul magnetic depinde atât de intensitatea câmpului, cât și de durată. În cazul în care curentul este întrerupt o anumită durată, valoarea efectivă a curentului este influențată, potrivit relației:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (42)$$

unde $i(t)$ - este valoarea instantanee a curentului în perioada T .

Tabelul 5

Felul curentului	Tipul redresării	Simbol	Valoare	Schemă de redresare	Variația curentului în timp
Curent continuu	Fără	c.c.	$I_{ef} = I_{max}$		
	Redresare în punte trifazată	c.c.	$I_{2\ ef} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_c$ $I_c = 1,12 I_{2\ ef}$		
Curent alternativ	-	c.a.	$I_{ef} = 0,7 I_{max}$ $I_{max} = 1,41 I_{ef}$		
Curent redresat fără filtrare	Monofazătă simplă	M	$I_c = 0,45 I_{2\ ef}$		
	Monofazătă în punte	B	$I_{ef} = 0,7 I_{max}$ $I_c = 0,9 I_{2\ ef}$		
Curent redresat cu filtrare	Monofazătă în punte cu filtre	F	$I_c = f(I_{2\ ef}, C; L)$		
Impulsuri periodice de curent	-	P	I_{ef} I_{max}		
Impuls singular de curent	-	S	I_{ef} I_{max}		

5.2. Magnetizarea longitudinală sau polară

Magnetizarea longitudinală sau polară poate fi realizată, fie cu ajutorul unui magnet permanent sau a unui electromagnet reprezentat în figura 14, alimentat în c.c.

sau c.a., care introduce fluxul în piesa de controlat prin capetele polare, fie cu ajutorul unei bobine, figura 15, în care se introduce piesa de controlat. În ambele cazuri, câmpul magnetic străbate piesa în lungime, fiind avantajos orientat pentru decelarea cu predilecție a discontinuităților orientate transversal în piesă.

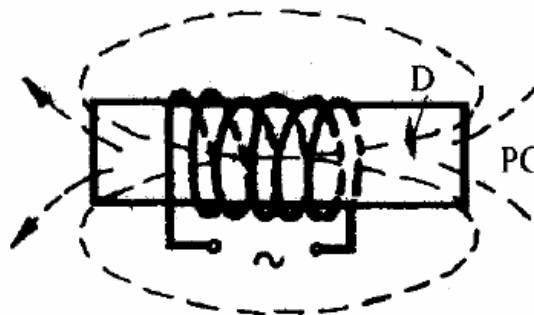
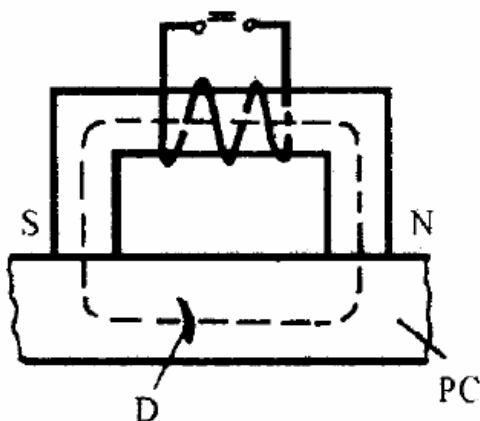


Fig. 14 Magnetizare polară cu jug fig. 15 Magnetizare polară cu bobină. PC-piesă magnetică, PC-piesă de controlat; D-defect

5.2.1. Magnetizare cu magnet permanent

Magnetizarea cu ajutorul magnetului permanent este frecvent utilizată în cazul pieselor mai mici sau în cazul construcțiilor realizate din semifabricate subțiri. Principalul dezavantaj al magnetizării cu magnet permanent constă în faptul că nivelul de magnetizare al piesei nu poate fi reglat și/sau controlat. De aceea, pentru verificarea câmpului magnetic se determină forța portantă sau forța necesară desprinderii unei piese feromagnetice de pol. Ea se calculează cu relația:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} \quad (43)$$

unde B este componenta inducției magnetice în vecinătatea polului și dirijată perpendicular pe suprafața transversală a acestuia (T), A - secțiunea polului (m^2), μ_0 - permeabilitatea magnetică a vidului (H/m). Un magnet permanent corespunzător prezintă în zona polului o inducție $B = 1,5T$. La piese mici și subțiri, datorită suprafeței limitate de răspândire a fluxului magnetic se obține inducția minimă necesară efectuării controlului de $0,72T$. La piesele groase, inducția este scăzută, la suprafața acestora neîndeplinindu-se condiția menționată.

În absența unui criteriu riguros controlabil se consideră că magnetizarea este corespunzătoare dacă forța portantă este suficientă pentru a ridica cu magnetul permanent o piesă feromagnetică în greutate de 18 kg.

5.2.2. Magnetizare cu jug electromagnetic

În cazul magnetizării polare cu jug electromagnetic portabil, adaptarea la suprafețele de contact aflate în planuri diferite se asigură prin folosirea polilor rabatabili. Fluxul magnetic se închide între doi poli ai electromagnetului, între capetele mobile ale jugului, iar zona controlată se consideră cuprinsă în cercul înscris între poli. Datorită dispersiei, fluxul Φ care străbate piesa în secțiunea polară, este mai mic decât fluxul Φ_0 produs în jugul magnetic. Legătura dintre câmpul magnetic transversal H_e și fluxul Φ este liniară, dependentă de: permeabilitatea piesei controlate, reluctanța jugului, magnetizația și rostul sau distanța dintre suprafețele în contact pol - piesă. Cu creșterea

distanței polare și mai ales prin folosirea polilor rabatabili, ca urmare a măririi reluctanței jugului magnetic, are loc o scădere a fluxului magnetic și o micșorare a coeficientului de regresie a dreptei $H_t = f(Q)$, astfel încât magnetizația scade aproximativ proporțional cu distanța polară, iar fluxul magnetic într-o măsură sensibil mai mică. Având în vedere dependența liniară $H_t = f(\phi)$, pentru ridicarea caracteristicii (curba 1 din figura 16) sunt necesare două puncte. După [45] o pereche de valori H_t și Q se măsoară după asezarea defectoscopului pe o placă din oțel nealiat de 500 x 500 x 10 mm lăsând un spațiu între suprafețele de asezare a polilor și suprafața placii de 0,5 mm. Cea de-a doua pereche de valori se măsoară direct în aer, unde se poate considera $Q = 0$. Caracteristica defectoscoapelor portabile electromagnetice cu spații între jug și placă este indicată după [47] de curba 2 din în figura 16.

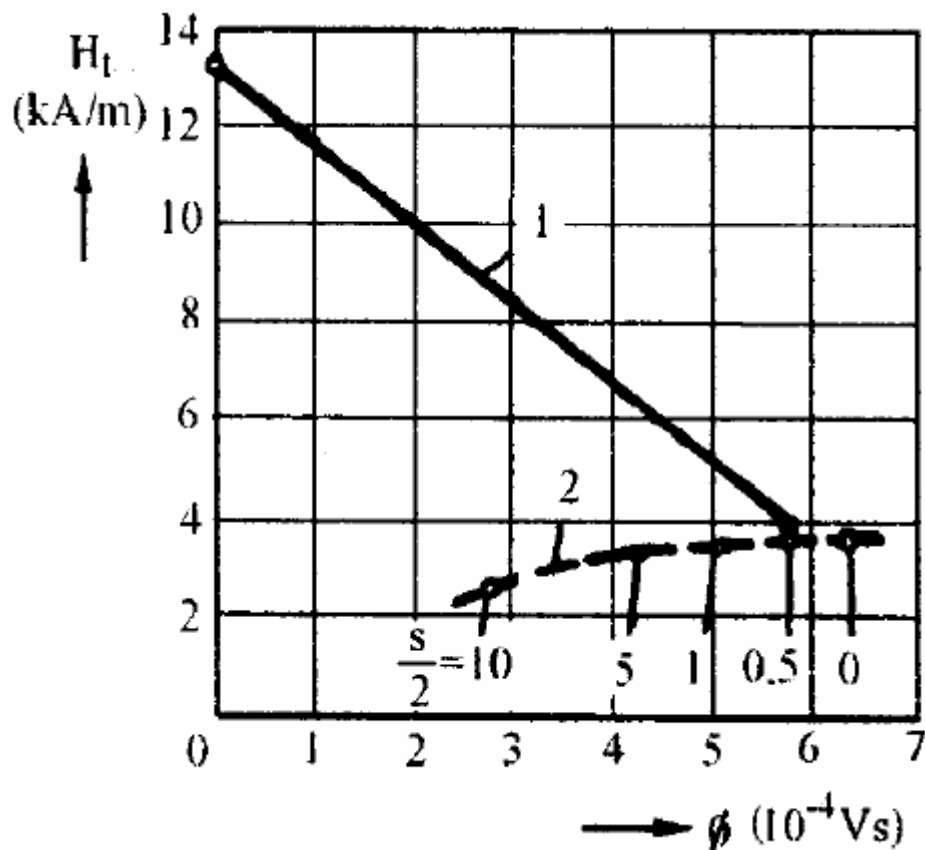


Fig. 16 Caracteristica $H_t = f(\phi)$ a defectorului cu jug electromagnetic

Jugul magnetic cu bobină de c.a. este alimentat direct de la rețea. Condiția de magnetizare minimă se exprimă de asemenea prin forța de ridicare a unei piese de 4,5 kg greutate. Forța de ridicare a electromagnetului alimentat în c.a. este sensibil inferioară forței portante a magnetului permanent, la aceeași valoare a inducției ($F_e = -F_e$). Cu toate acestea datorită efectului pelicular, inducția la suprafața piesei atinge valoarea de 0,72 T. Distanța dintre polii jugului electromagnetic (1) este impusă după anumite norme la 200 mm sau la 300 mm. Considerând că zona controlată reprezintă cercul înscris între poli, care are diametru 1, inducția la suprafața piesei va fi:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{\pi l \cdot a} = \frac{A \cdot B_0}{\pi l \cdot a} \quad (44)$$

unde B_0 este inducția în jugul electromagnetic, care corespunde inducției de saturație a materialului jugului $B_0 \approx 2 \text{ T}$, A este suprafața polului, l - distanța dintre poli, iar a - adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic.

Un alt reper de orientare în alegerea curentului de magnetizare îl reprezintă recomandarea unei valori de 200 - 300 A pentru 1 cm grosime a piesei. Dacă curentul de magnetizare se aplică direct pe suprafața piesei, el poate fi micșorat de 2 ÷ 3 ori.

În vederea obținerii unor efecte maxime la controlul îmbinărilor sudate unghiul format de linia polilor și axa longitudinală a îmbinării va fi pe cât posibil de 90° , nu mai mic însă de 50° , [47].

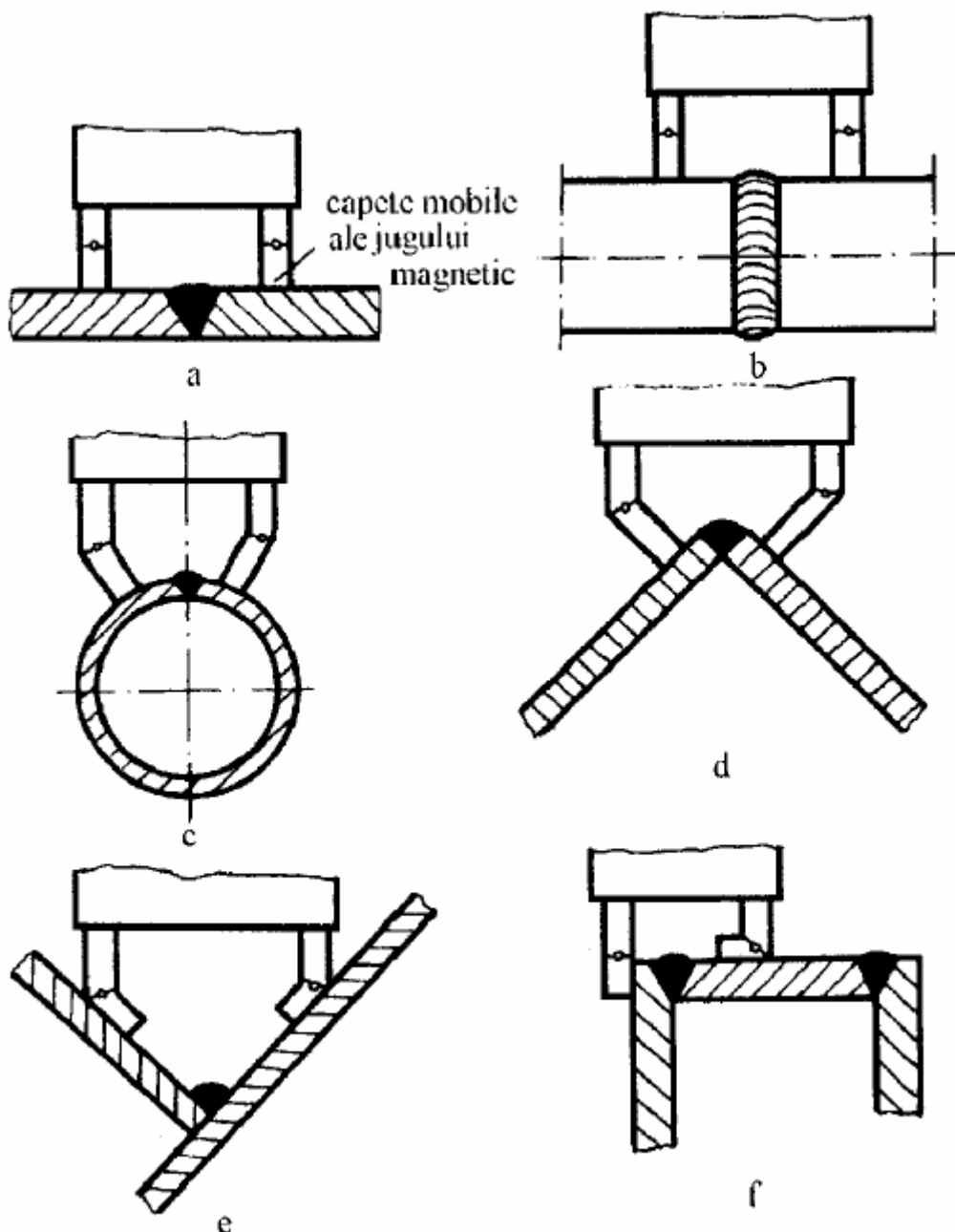


Fig. I 7 Scheme de control a îmbinărilor sudate cu jug electromagnetic: a - îmbinare cap la cap; b - îmbinare cap la cap circulară; c - îmbinare cap la cap pe generatoare; d - îmbinare de colt în capete; e - îmbinare de cal f - îmbinare de cal f pătrunsă în T; f - îmbinare de e of f pătrunsă la profile cheson

Pentru demagnetizarea piesei, între poli se interpune o bară din material feromagnetic moale, care are rolul de scurtcircuitare a câmpului.

Marele dezavantaj al electromagnetului portabil constă în imposibilitatea reglării câmpului funcție de dimensiunile piesei, grevând astfel și asupra sensibilității de examinare. Pentru magnetizarea

longitudinală a pieselor lungi de revoluție s-au construit electromagneți inelari, care permit mișcarea relativă de rotație și de translație a piesei față de electromagnet.

Varietatea constructivă a defectoscoapelor portabile cu jug electromagnetic este deosebit de mare [8], [48], [60], [6]. Majoritatea sunt construite cu distanța polară de $10 \div 170$ mm și asigură un câmp magnetic de $3 \div 9$ kA/m.

Unele aplicații ale examinării cu jug electromagnetic portabil, cu poli fiși, suplimentari de 45° , sau rabatabili, la construcții sudate, sunt prezentate în figura 17.

5.2.3. Magnetizare polară cu bobină

Magnetizarea cu ajutorul bobinei se pretează la controlul unor piese lungi și alimentării în curent alternativ. Având în vedere că în acest caz câmpul magnetic este deschis la capetele pieselor, magnetizația este deosebit de mare. Pentru evitarea acestui neajuns, în cursul controlului, fie piesa, fie bobina se deplasează de-a lungul axei proprii. Dezavantajul bobinei constă în obturarea suprafeței controlate și plasarea mai dificilă pe piesă. În cazul unor piese de forme mai complexe, în locul bobinei se pot folosi cabluri flexibile străbătute de curenți mari, care se întăsoară în jurul piesei, în zona de examinare.

Câmpul magnetic al bobinei străbătute de un curent alternativ

Dacă pentru magnetizare se folosește o bobină parcursă de un curent alternativ, atunci câmpul H și inducția magnetică B , variază periodic cu aceeași frecvență ca și tensiunea u și intensitatea curentului I . Potrivit legii lui Faraday, într-un conductor circular străbătut de un flux magnetic, prin variația în timp a fluxului, se induce o tensiune numită tensiune electromotoare indusă e . Pornind de la tensiunea electromotoare, ca integrală pe un contur închis se obține:

$$e = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(n\phi)}{dt} = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (45)$$

unde: Φ este fluxul total al bobinei, prin suprafața E de contur T , ϕ este fluxul elementar al unei spire a bobinei, iar n este numărul de spire al bobinei. Deci, tensiunea electromotoare indusă depinde de numărul spirelor bobinei și de viteza de variație a fluxului prin bobină. Semnul minus indică faptul că tensiunea indusă e , este invers orientată față de tensiunea u , sau cu alte cuvinte fluxul indus se opune variației fluxului inductor și ca urmare:

$$u + e = 0 \quad (46)$$

Fluxul variabil poate fi produs pe mai multe chipuri:

- prin mișcarea relativă a unui miez magnetic față de spira străbătută de curent;
- prin variația curentului dintr-un circuit vecin, inductor;
- prin variația curentului electric din însăși spira indusă, care joacă rolul de inductor. În ipoteza unui circuit magnetic liniar, cu un flux magnetic omogen și uniform printr-o bobină, tensiunea electromotoare a circuitului se calculează astfel:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} (BS) = -n \frac{d}{dt} (\mu HS) = -n\mu S \frac{dH}{dt} = -n\mu_0\mu_r S \frac{d}{dt} \left(\frac{nI}{l} \right) = - \frac{n^2\mu_0\mu_r S}{l} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (47)$$

Inductivitatea proprie a unui circuit se definește ca fiind raportul pozitiv dintre fluxul total Φ , prin circuit, și curentul I al aceluiași circuit.

$$L = \frac{\Phi}{I} > 0 \quad (48)$$

Astfel, tensiunea electromotoare se mai poate exprima:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} \quad (49)$$

Identificând relațiile (47) și (49), se obține relația de calcul a inductivității unei bobine:

$$L = \frac{n^2 \mu_0 \mu_r S}{l} \quad (50)$$

Având în vedere tensiunea electromotoare, cât și căderea de tensiune pe rezistența înfășurării, într-o bobină are loc o cădere de tensiune rezistivă și o cădere de tensiune inductivă. Deci, caderea de tensiune într-o bobină este:

$$u = I \cdot R + L \frac{dI}{dt} \quad (51)$$

Tensiunea alternativă este descrisă de relația sinusoidală:

$$u = u_0 \cdot \sin \varphi \quad (52)$$

în care φ este unghiul de fază:

$$\varphi = \omega \cdot t = 2\pi f \cdot t \quad (53)$$

Autoinducția provoacă defazarea în urma a curentului cu un unghi α , astfel încât:

$$I = I_0 \cdot \sin(\varphi - \alpha) \quad (54)$$

Trecându-se la reprezentarea complexă a mărimilor respective, se poate scrie:

$$\begin{aligned} u &= |u| \cdot e^{j\omega t} = u \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \\ I &= |I| \cdot e^{j(\omega t - \alpha)} = I \sqrt{2} \cdot e^{j(\omega t - \alpha)} \end{aligned} \quad (55)$$

unde: U , respectiv I , sunt valori efective; UU , respectiv IU , sunt valori maxime.
Prin introducerea expresiilor (55) în relația (51) se obține relația:

$$\frac{U}{I} e^{j\alpha} = R + j\omega L = Z \quad (56)$$

unde Z reprezintă impedanța complexă a bobinei:

$$Z = |Z| \cdot e^{j\omega}; \quad |Z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (57)$$

În planul impedanței, se poate separa rezistența ohmică R ca parte reală, de rezistența inductivă ωL , ca parte imaginară. Diferența de fază dintre curent și tensiune se calculează din relația:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L}{R} \quad (58)$$

și este cu atât mai mare cu cât rezistența inductivă este mai mare în comparație cu rezistența ohmică. Dacă $R = 0$, $\alpha = 90^\circ$, ceea ce înseamnă că defazajul maxim de $\pi/2$ între tensiune și curent se obține într-un circuit pur inductiv.

Considerând mărimile de câmp magnetic \vec{H} și \vec{B} în interiorul miezului magnetic al unei bobine parcurse de curent alternativ, are loc o variație în același ritm a câmpului magnetic, astfel încât intensitatea câmpului magnetic se poate exprima prin mărime complexă:

$$\vec{H} = |H| \cdot e^{j\omega t} \quad (59)$$

Inducția magnetică alternativă are o defazare în raport cu câmpul magnetic, astfel încât prin similitudine se poate scrie:

$$\vec{B} = |B| \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (60)$$

unde: δ este diferența de fază dintre \vec{B} și \vec{H} . Astfel, rezultă că permeabilitatea magnetică în curent alternativ este și ea o mărime complexă:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} = \frac{|B| \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{|H| \cdot e^{j\omega t}} = \frac{B\sqrt{2}}{H\sqrt{2}} e^{-j\delta} = \frac{B}{H} e^{-j\delta} = |\mu| \cdot e^{-j\delta} = \mu \sqrt{2} e^{-j\delta} \quad (61)$$

micșorată însă în comparație cu cea de la magnetizarea în curent continuu. Această comportare își găsește explicația prin faptul că în curent alternativ, pe baza efectului pelicular, materialul se comportă ca și când numai stratul exterior ar fi feromagnetic.

Dacă se compară caracteristicile magnetice în mediul discontinuității (mediul 1) și în mediul piesei feromagnetice (mediul 2) se observă următoarele. În mediul 1 ($p=0$; $\mu_r=1$), intensitatea câmpului magnetic este $|H_0|$, iar în mediul 2 de rezistivitate p și permeabilitate μ_r , intensitatea câmpului este $|H|$ și variază după relația

$$|H| = |H_0| \cdot e^{-x/a} \quad (62)$$

Densitatea de curent $|J|$ se poate exprima funcție de intensitatea de câmp și conductivitatea electrică, cu relația:

$$|J| = \frac{H_0}{\lambda} \cdot e^{-x/a} \quad (63)$$

Permeabilitatea în curent alternativ se calculează din cele două componente ale permeabilității inductive ca parte imaginară și ale permeabilității rezistive ca parte reală, pe baza relației de compunere:

$$\mu = \sqrt{\mu_L^2 + \mu_R^2} \quad (64)$$

și este o mărime fizică fundamentală.

- Curentul de magnetizare

Magnetizația din piesă depinde de un număr mare de factori: materialul, forma și poziția piesei în interiorul bobinei, geometria acesteia, curentul de magnetizare.

Într-o ipoteză simplificatoare câmpul de magnetizare se poate exprima prin câmpul produs de bobină în absența piesei de controlat.

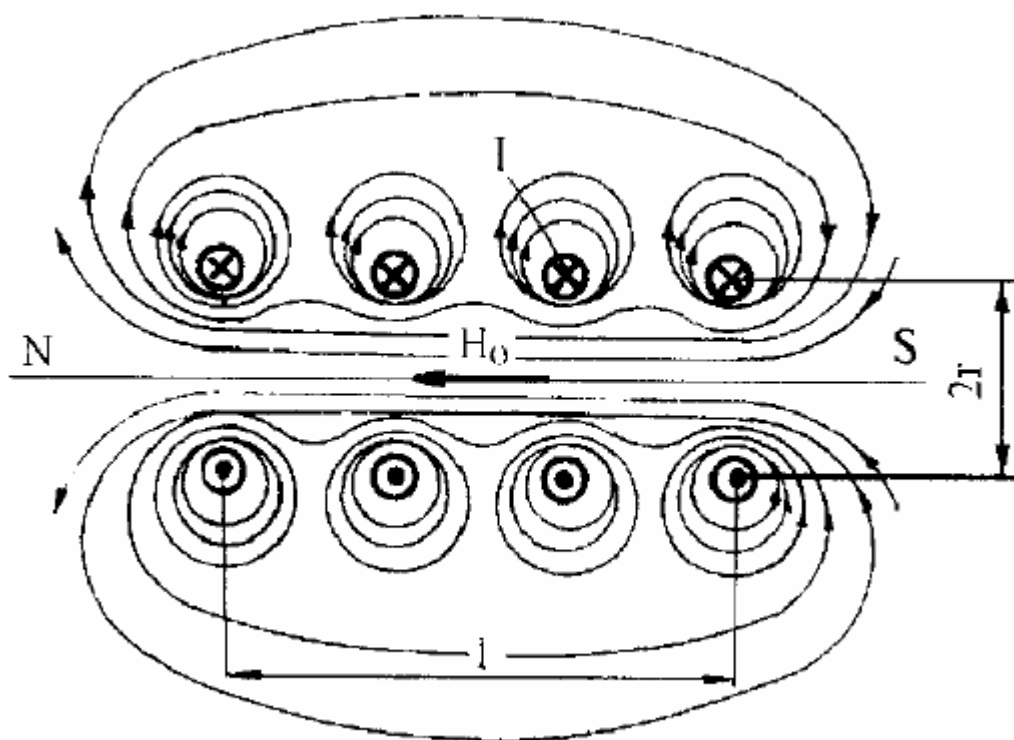


Fig. 18 Liniile de câmp magnetic în jurul unei bobine polare străbătute de curentul i

Magnetizarea longitudinală utilizează bobine a căror caracteristică lungime raportată la diametru (figura 18) este cuprinsă în intervalul $5 < l/2r \leq 20$.

Intensitatea câmpului magnetic în interiorul bobinei circulare H_0 , depinde de solenitate sau numărul de amperi - spire nI , raza bobinei, r și de poziția punctului considerat în raport cu axa bobinei. În axa bobinei câmpul magnetic este:

$$H_0 = \frac{nI}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \quad (65)$$

Dacă bobina este lungă $l \gg 2r$, se obține:

$$H_0 = \frac{nI}{l} \quad (66)$$

iar dacă bobina este plată:

$$H_0 = \frac{nI}{l} \quad (66)$$

În ipoteza în care diametrul piesei cilindrice de controlat D este mic față de raza bobinei:

$$H_0 = \frac{k nI}{D} \quad (68)$$

unde $k \approx 0,24$, este o constantă. Rezultă că inducția în piesă va fi:

$$B = \frac{5 \frac{l}{2r} \cdot \mu_0 \cdot knI}{D} \quad (69)$$

de unde impunând $B = 0,72T$, se obține în cazul alimentării în curent continuu:

$$nI = \frac{32000}{L/D} \quad (A.s) \quad (70)$$

iar pentru o inducție $B = 1,08T$, se obține:

$$nI = \frac{45000}{L/D} \quad (A.s) \quad (71)$$

L - fiind lungimea piesei, D - diametrul acesteia.

Relațiile (70) și (71) se modifică atunci când alimentarea se face în curent alternativ, astfel:

$$nI_{ef} = \frac{22000}{L/D} \quad (A.s) \quad (72)$$

I_{ef} - reprezentând valoarea efectivă a c.a. sau valoarea medie a unui curent redresat monofazat în punte, respectiv:

le - reprezentând valoarea medie a c.a. redresat monofazat simplu. Relațiile (70)÷(73) dau valori excesive în cazul în care raportul L/D este mic și anume dacă $L/D < 5$. Pentru a micșora curentul în aceste situații se folosesc bare polare de prelungire a lungimii pieselor.

5.2.4. Magnetizare cu cablu flexibil înfășurat

Această metodă folosește un cablu parcurs de c.c. sau c.a., care este înfășurat în jurul piesei (figura 19) și este foarte uzitată în cazul pieselor lungi sau de diametru

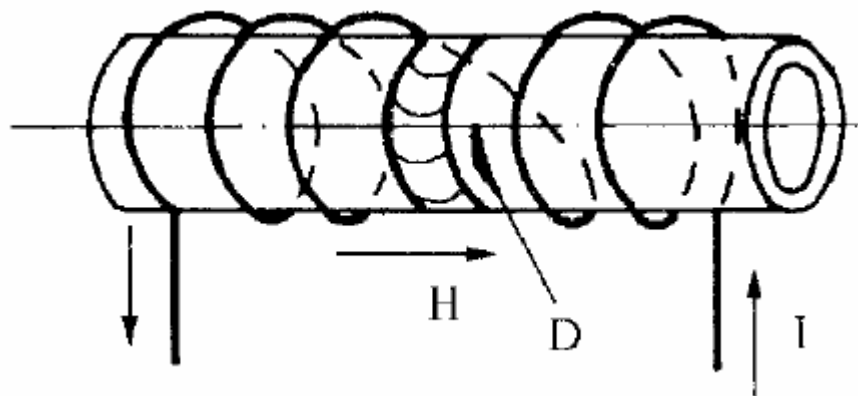


Fig. I 9 Magnetizarea cu cablu înfășurat pe piesă

mari, precum și în cazul unor piese de formă complexă. Fluxul magnetic și inductivitatea este influențată pe de o parte de material prin permeabilitatea relativă a acestuia și de distanța dintre două spire vecine.

Expresia componentei tangențiale a câmpului magnetic format între doi conductori vecini, parcursi de curentul I , este:

$$H_t = \frac{I}{\pi \left(s + \frac{t^2}{4s} \right)} \quad (74)$$

unde s - reprezintă grosimea în mm, a piesei, respectiv a tevi bobinate cu cablu flexibil, iar t - distanța în mm dintre două ramuri vecine ale conductorului. H , fiind dirijat pe direcția generatoarei piesei, pune în evidență cu predilecție discontinuitățile orientate în planul transversal al piesei. Introducând în expresia (74) valoarea minimă a câmpului de magnetizare de 2400 A/m, se obține în conformitate și cu prevederile unor standarde, curentul de magnetizare necesar de tipul c.c. în (A):

$$I = 7,5 \left(s + \frac{t^2}{4s} \right) \quad (75)$$

Dacă alimentarea cablului se realizează în c.a., grosimea s se înlocuiește cu adâncimea de pătrundere. Relația acoperitoare pentru calculul valorii de vârf a curentului de această dată este:

$$I = 7,5 \left(10 + \frac{t^2}{40} \right) \quad (76)$$

iar după standardul [44], relația folosită este de forma:

$$nI = \frac{35000}{L/D + 2} \quad (\text{A.s}) \quad (77)$$

n - fiind numărul de înfășurări, L - lungimea zonei (piesel) înfășurate, iar D -diametrul de înfășurare.

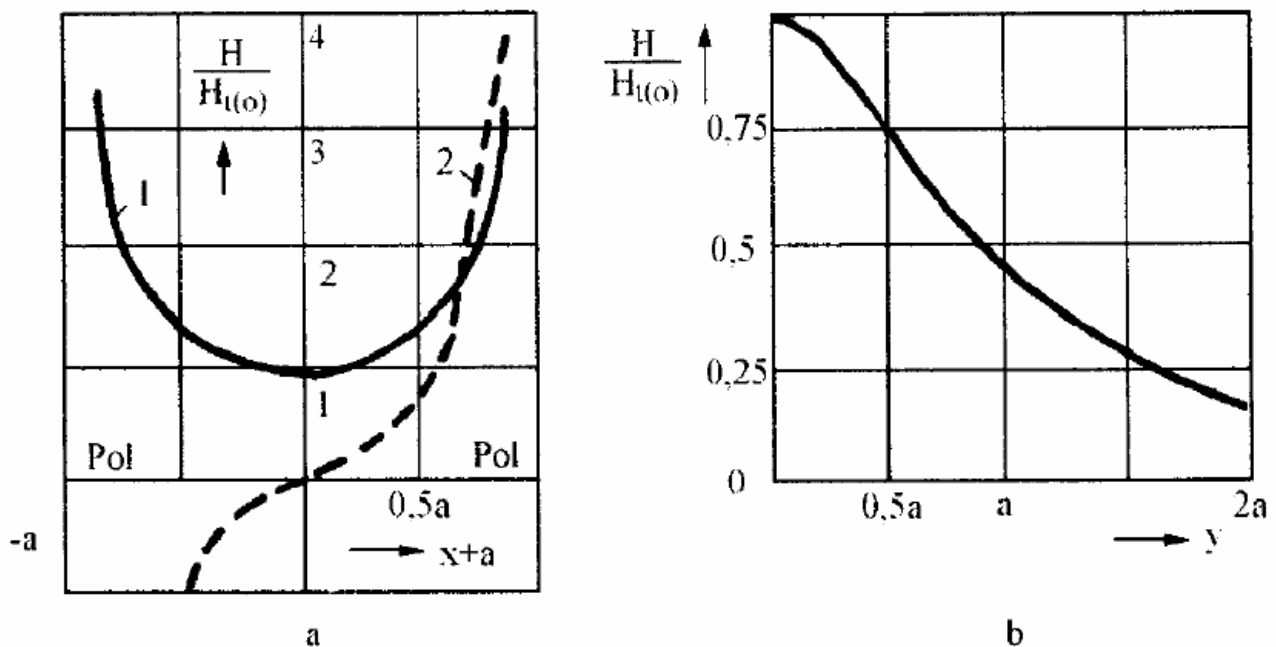


Fig. 20 Distribuția câmpului magnetic în=ona polară: a - în direcție longitudinală: b - În direcție transversală

5.2.5. Distribuția câmpului magnetic într-o placă

Controlul pieselor sub formă de placă, utilizând magnetizarea polară intervine frecvent. Câmpul magnetic din placă produs la magnetizarea longitudinală comportă variații semnificative. Astfel pe direcția liniei polare, câmpul magnetic transversal de la suprafață H , variază exponențial având valoarea minimă H_0 la mijlocul distanței dintre poli. Valori apropiate de H_0 se mențin simetric pe un interval de aproximativ jumătate din distanța polară. Spre capete unde se realizează contactul jugului magnetic cu placa, intensitatea câmpului crește simetric spre valoarea inducției din jug, așa cum indică curba 1 din figura 20.

Componenta normală a câmpului B_n , indică o variație cu inflexiune la mijlocul distanței polare, unde $B_n=0$. Spre poli creșterile sunt foarte mari (curba 2 din figura 20).

În direcție transversală (y), câmpul magnetic scade, ajungând la o distanță de o semideschidere polară aproximativ jumătate din valoarea corespunzătoare lui $y = 0$.

5.2.6. Adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic

Magnetizarea în curent alternativ cu frecvență ridicată oferă avantajul urmăririi riguroase a profilului piesei de controlat, datorită efectului pelicular intens. De aceea, la controlul pieselor cu profil mai cenicat se va prefera alimentarea în curent alternativ.

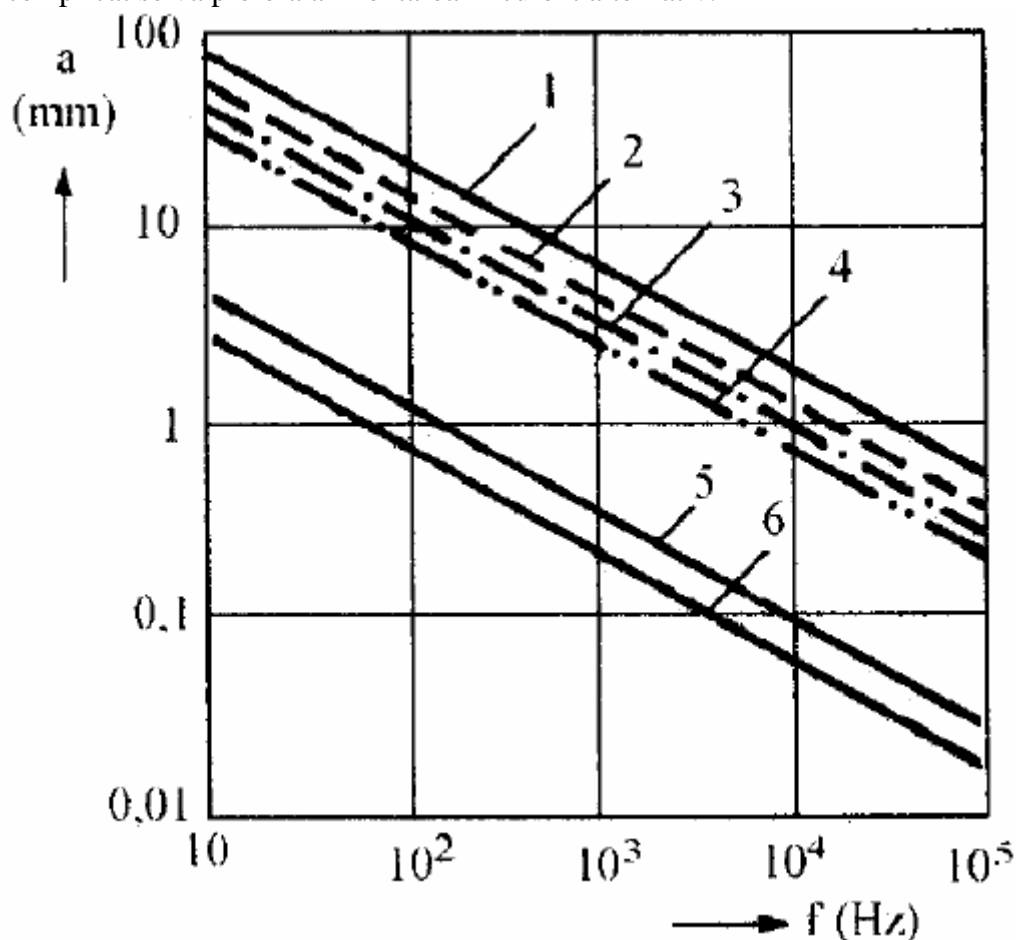


Fig. 2 I Adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic la diferite materiale: 1 - Fier ($\mu_r = 2$, $A = 2$ m/D mm); 2 - Alumină ($A = 12$ m/D mm); 3 - A lamă ($A = 35$ m/D mm); 4 - Cupru ($X = 15$ m/Q mm³); 5 - Fier ($\mu_r = 200$, $L = 2$ m/IR mm²); 6 - Fier ($\mu_r = 2000$, $L = 2$ m/D mm);

Adâncimea de pătrundere a câmpului magnetic reprezintă o caracteristică importantă a metodei, în relație directă cu criteriile de alegere și de comparație cu alte metode de control. Ea se calculează cu ajutorul relației (41) și așa cum rezultă, este foarte influențată pe lângă caracteristicile electromagnetice - permeabilitate și conductivitate - în special de frecvență. În afara parametrilor menționați, adâncimea de pătrundere depinde în mare măsură de forma piesei și de rugozitatea suprafeței de contact.

Dependența de frecvență a adâncimii de pătrundere a câmpului magnetic reprezintă regresii liniare (figura 21) având parametri $A = \text{const.}$, ceea ce corespunde unor materiale diferite și $\mu_r = \text{const.}$, ceea ce corespunde unor grade diferite de magnetizare.

Grosimea stratului pelicular străbătut de curent la oțeluri carbon este dată de relația:

$$a = 20 / \sqrt{f} \quad (78)$$

Aceasta explică tendința actuală de micșorare a frecvenței defectoscoapelor de la 50 Hz la 16.67 Hz, precum și de orientare chiar spre frecvențe de 3 Hz.

5.2.7. Magnetizația remanentă

În general oțelurile cu un conținut de carbon $C > 0,2\%$ pot fi controlate prin magnetizație proprie remanentă după o magnetizare prealabilă corespunzătoare.

Magnetizația remanentă folosește inducția reziduală dintr-o piesă magnetizată în prealabil într-un câmp magnetic continuu. Magnetizația în curent alternativ nu poate fi folosită, deoarece alternativ cu magnetizarea se produce demagnetizarea piesei. În această situație pulberea magnetică se poate aplica independent de operația de magnetizare.

Condițiile în care magnetizația remanentă poate fi folosită direct pentru control tin de material și de caracteristicile de magnetizare. Astfel se consideră suficient ca:

- inducția remanentă B_r 0,72T, după unele surse B_r 0,5T;
- bucia de histereză să fie largă, extinsă aproape egal ca și câmp magnetic și ca și inducție;
- câmpul coercitiv să fie H_c 2 1000 A/m.

Datorită urmărilor nocive provocate de magnetizația remanentă unor materiale, imediat după efectuarea controlului se impune demagnetizarea.

5.3. Magnetizarea circulară sau transversală

Magnetizarea circulară, transversală sau prin trecerea curentului, poate fi realizată, fie trecând curentul direct prin piesă, figura 22,a, prin intermediul unor electrozi de contact în cazul pieselor de secțiune plină, fie trecând un conductor străbătut de curent prin piesă, figura 22,b, respectiv prin înfășurarea piesei cu un conductor în cazul pieselor tubulare.

Liniile de flux create în jurul conductorului, într-un plan perpendicular, înconjoară conductorul de excitație, magnetizarea obținută este circulară. Ea se pretează la detectarea cu predilecție a discontinuităților D orientate longitudinal în piesa de controlat PC .

Magnetizarea circulară poate fi realizată cu rezultate superioare folosind alimentarea cu curent pulsant, tabelul 5, fie cu ajutorul condensatoarelor, sau cu transformatoare speciale. Avantajul alimentării cu impulsuri de curent constă în aceea că, datorită reducerii duratei de trecere a curentului, cantitatea de căldură degajată se micșorează, ceea ce permite ridicarea curentului de magnetizare și prin aceasta obținerea unei adâncimi de pătrundere și de detectare superioare. Această metodă se aplică cu bune rezultate la piese cu magnetism remanent ridicat.

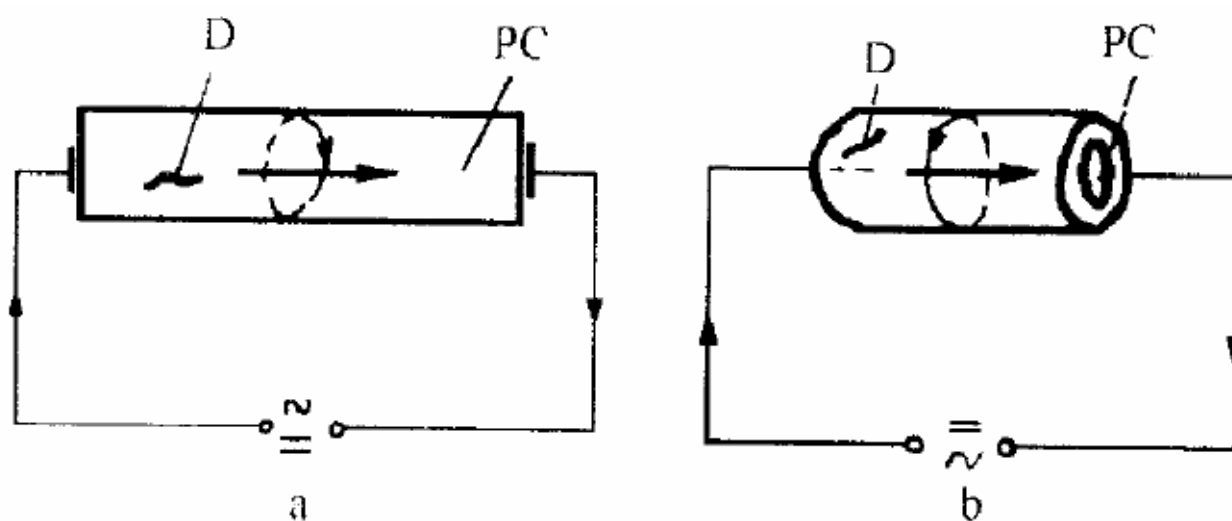


Fig. 22 Magnetizarea transversală: a - cu electrozi de contact; b - cu un conductor interior parcurs de curent

53.1. Magnetizarea cu electrozi de contact

Curentul este furnizat de la o sursă externă cum ar fi înfășurarea de joasă tensiune a unui transformator. Câmpul magnetic circular este caracterizat prin inducția în material. Densitatea de curent variază punctual în funcție de caracteristicile de material, de forma piesei și de poziția electrozilor de contact pe piesă.

Relațiile dintre curentul de magnetizare sau curentul total din piesă și inducția magnetică creată la suprafața piesei sunt în general simple.

În cazul unei bare cilindrice străbătute în lung de curentul I se induce un câmp magnetic

$$H = \frac{I}{\pi D} \quad (79)$$

D - fiind diametrul barei (m). Cum $B = \mu_0 \mu_r H$, se obține

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{\pi D} \quad (80)$$

Punând pe de o parte condiția ca inducția magnetică să fie cel puțin 0,72T și luând în calcul $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ H/m și $\mu_r = 240$ pentru oțeluri, se ajunge la relația simplificată în care intensitatea necesară (A):

$$I = 7,5 \cdot 10^3 D \quad (81)$$

În cazul unei piese paralelipipedice intensitatea curentului de trecere exprimată în (A) este:

$$I = 2,4 \cdot 10^3 p \quad (82)$$

unde p este perimetrul secțiunii transversale (m).

Curentul necesar se poate determina mai exact cunoscând curba de primă magnetizare a materialului (vezi figurile 2 și 3). În acest scop pe diagramă se intersectează orizontala $B = 0,72$ T cu curba de primă magnetizare și se obține valoarea câmpului H . Aplicând relația (79) se calculează curentul.

Dupa [44] în cazul utilizării unor curenți redresați pentru evidențierea strictă a discontinuităților superficiale, relațiile recomandate pentru calculul curentului sunt:

$$\begin{aligned} I &= (28 \div 36) D && \text{în cazul } D \leq 125 \text{ mm} \\ I &= (20 \div 28) D && \text{în cazul } 125 < D \leq 375 \text{ mm} \\ I &= (4 \div 12) D && \text{în cazul } D > 375 \text{ mm} \end{aligned} \quad (83)$$

5.3.2. Magnetizare cu bară sau cablu parcurse de curent

Procedeul de magnetizare cu ajutorul unei bare parcurse de curent sau cu ajutorul unui cablu, introduse în interiorul piesei sau locului de examinare - orificiu, canal - etc. își găsește aplicații la piese tubulare și alezaje cilindrice. Se pretează la decelarea discontinuităților orientate în lungul conductorului sau având o înclinare de cel mult $\pm 45^\circ$ față de direcția conductorului. Magnetizarea se realizează mai ales în c.c., permitând o repartizare mai uniformă a câmpului în piesă.

Tabelul 6

Diametrul conductorului (mm)	Grosimea piesei (mm)	Valoarea I(A) recomandată
12,5	3,125	500
	6,250	750
	9,375	1000
	12,500	1250
25,0	3,125	750
	6,250	1000
	9,375	1250
	12,500	1500
37,5	3,125	1000
	6,250	1250
	9,375	1500
	12,500	1750
50,0	3,125	1250
	6,250	1500
	9,375	1750
	12,500	2000

În jurul unui conductor liniar infinit de lung străbătut de curent, potrivit legii Biot - Savart - Laplace, intensitatea câmpului magnetic este

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (84)$$

unde R este distanța, în (m), de la conductor la suprafața piesei. Punând condiția de minimă magnetizație necesară $H \geq 2400$ A/m, rezultă că intensitatea curentului de magnetizare (A)

$$I = 15 R \quad (85)$$

Pentru a mări intensitatea câmpului magnetic se recurge la următoarele variante:

a. trecerea de mai multe ori a cablului în zona de examinare (figura 23,a);

b. apropierea cablului sau a barei de suprafață - plasare excentrică - respectiv așezarea pe suprafața piesei (figura 23,b).

În varianta a, se obține un efect de bobină, curentul necesar este obținut prin raportarea lui I din relația (85) la numărul de înfășurări n:

$$I_n = \frac{I}{n} \quad (86)$$

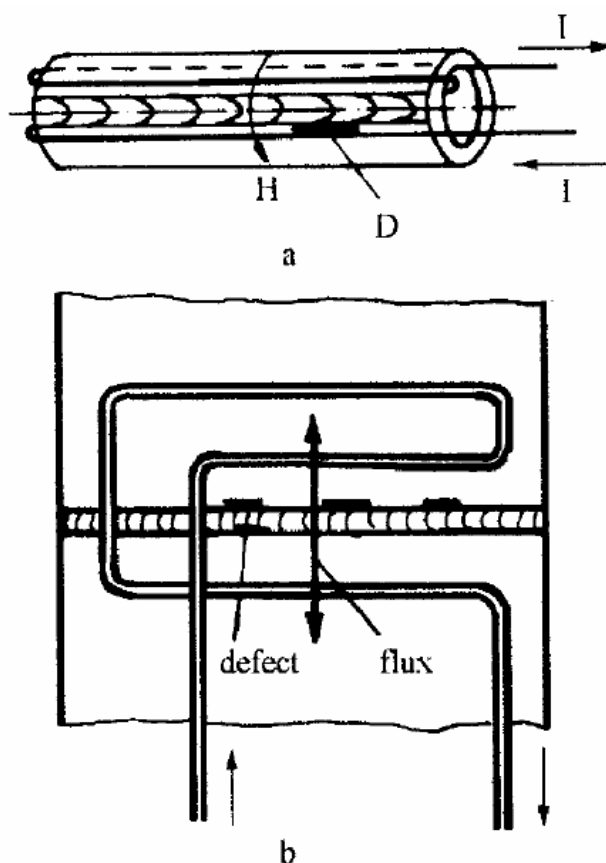


Fig. 23 Magnetizare cu cablu flexibil parcurs de curent:

- a - înfășurat pentru obținerea unei magnetizări circulare într-o piesă cilindrică în zona îmbinării sudate; b - plasat pe suprafața unei piese pentru obținerea unei magnetizări transversale la îmbinarea sudală

După [44) curentul necesar este funcție de diametrul conductorului și de grosimea piesei, respectiv a peretelui acesteia, conform datelor cuprinse în tabelul 6. Este important de știut că pentru directionarea fluxului magnetic modul de asezare a cablului și sensul parcursului de curent joacă un rol esențial. După cum rezultă din figura 23, cablul se așază astfel încât de o parte și alta a zonei de examinare să se asigure același sens al curentului. În varianta b, dacă conductorul este lipit de piesă, componenta utilă a câmpului transversal este nulă, întrucât liniile de câmp sunt perpendiculare la suprafața piesei. Urmare a influenței materialului, în baza legii refracției liniile de câmp tind să se alinieze cu suprafața.

S-a stabilit că o intensitate de curent:

$$I = 30 R \quad (87)$$

este suficientă pentru a produce până la distanță de cea $2R$ sub conductor un câmp magnetic tangential H , $> 2400 \text{ A/m}$. Se precizează însă că acest câmp nu trebuie să fie perturbat de porțiunea de întoarcere a curentului prin cablu provenit prin modul de înfășurare. În vederea evitării unui astfel de efect, distanța dintre ramuri sau la sursă trebuie să fie de cel puțin $20R$.

Metoda prezintă inconvenientul unei încălziri uneori excesive a piesei examinate.

5.3.3. Magnetizare prin injecție de curent cu electrozi mobili

Tehnica magnetizării prin injecție de curent folosind electrozi mobili este o variantă a magnetizării transversale cu electrozi de contact. Curentul de magnetizare poate fi c.c., c.a. sau impulsuri redresate și este introdus de la o sursă externă în zona de examinare prin intermediul a doi electrozi manuali (figura 24), aplicați de către operator. Se asigură astfel o versatilitate favorabilă unui control minutios, deoarece linia ce unește electrozii poate fi modificată favorizându-se detectarea discontinuităților directionate aleator. De regulă, dată fiind forma circulară sau eliptică a zonei de control cuprinse între cei doi electrozi, este suficientă aplicarea câmpului în două direcții perpendiculare.

Curentul se cuplează numai după realizarea unui contact corespunzător pe suprafața piesei și aplicarea unei presiuni manuale. Presiunea se menține pe toată durata examinării până la deconectarea sursei. În caz contrar se poate forma un arc electric, care produce de regulă arsuri locale pe suprafața piesei.

Metoda relevă discontinuități orientate perpendicular pe câmpul magnetic, discontinuități directionate în lungul liniei electrozilor, respectiv oblice într-un interval de $\pm 45^\circ$ față de această direcție.

Distanța dintre electrozi se ia în medie de 250 mm, frecvent însă intervalul de distanțe este cuprins în limitele 100 ÷ 400 mm.

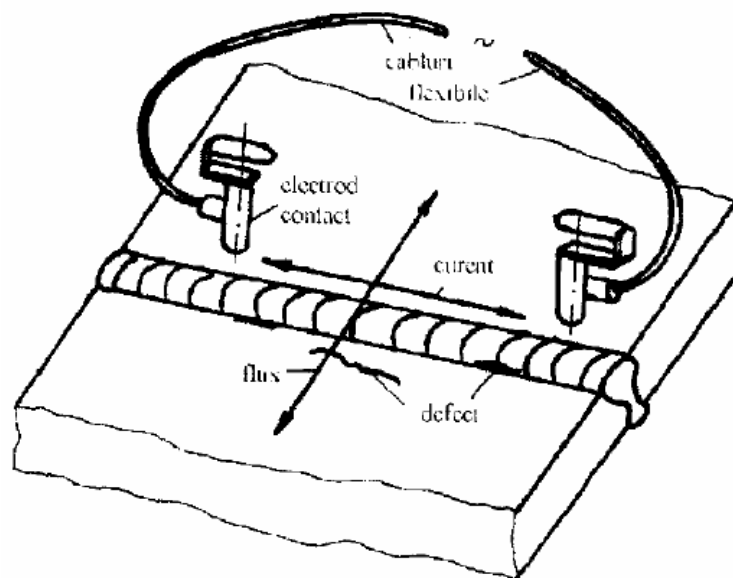


Fig.24 klagneti:area prin injec,tie de curent cu electrozi de contact mobile

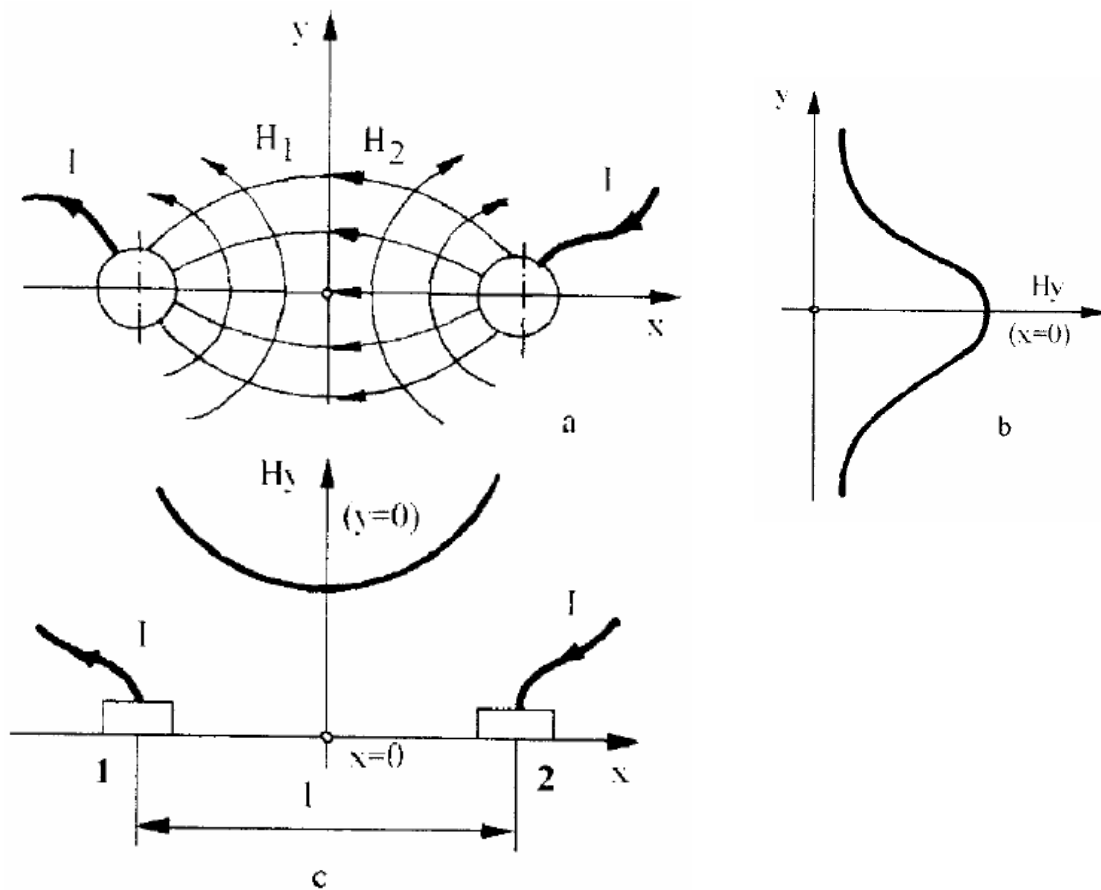


Fig. 25 Câmpul magnetic produs între doi electrozi mobili prin injectie de curent

Câmpul magnetic într-un punct oarecare din planul piesei este format din două componente. O componentă H_1 produsă de conductorul ce realizează contactul în punctul 1 și o componentă H_2 produsă de conductorul care realizează contactul în punctul 2. În ipoteza că cele două puncte sunt străbătute perpendicular pe suprafața piesei de către un conductor infinit lung, cele două componente proiectate pe direcția y din figura 25, vor fi:

$$H_{1y} = \frac{I}{2\pi r_1} \cos \theta_1 \quad (88)$$

$$H_{2y} = \frac{I}{2\pi r_2} \cos \theta_2$$

unde r_1 și r_2 reprezintă razele vectoriale ale punctului considerat în care se calculează valoarea câmpului magnetic în raport cu cele două puncte de contact 1 și 2, iar θ_1 și θ_2 unghiurile formate de aceste raze vectoriale cu direcția 1 - 2. Rezultă:

$$H_y = H_{1y} + H_{2y} = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{\cos \theta_1}{r_1} + \frac{\cos \theta_2}{r_2} \right) \quad (89)$$

Functia (89) este reprezentată grafic în figura 25. În cazul în care punctul considerat se află pe cercul înscris între punctele 1 și 2 situate la distanța 1, vom avea:

$$\frac{\cos \theta_1}{r_1} = \frac{\cos \theta_2}{r_2} = \frac{1}{l} \quad (90)$$

Relația (89) devine astfel:

$$H_y = \frac{I}{\pi l} \quad (91)$$

și cum H_y trebuie să fie cel puțin de 2400 A/m, rezultă:

$$I/l = 7500 \quad (\text{A/m}) \quad (92)$$

În ipoteza că forma suprafeței în care se manifestă câmpul magnetic nu este un cerc ci o elipsă cu axa mare egală cu l , se obține:

$$I/l = 4700 \quad (\text{A/m}) \quad (93)$$

Având în vedere abundența de informații în legătură cu magnetizarea prin injecție de curent folosind electrozi mobili, se prezintă în continuare și alte recomandări cu privire la alegerea curentului de magnetizare. Astfel, pentru discontinuități deschise la suprafață $l = 40 \div 55$ A pentru fiecare cm distanță între electrozi, iar pentru discontinuități subsuperficiale se prescrie $I = 60 \div 80$ A pentru fiecare cm distanță între electrozi la magnetizarea c.c., respectiv $50 \div 70$ A pentru fiecare centimetru distanță între electrozi în cazul alimentării în curent redresat monofazat în punte. După standardul [44], $I = 3,6 \div 4,4$ A pentru fiecare mm distanță între electrozi în cazul pieselor având grosimea sub 19 mm, respectiv $I = 4,0 \div 5,0$ A pentru fiecare mm distanță între electrozi în cazul pieselor având grosimea peste 19 mm.

Dacă curentul folosit este alternativ, I reprezintă valoarea efectivă.

5.3.4. Distribuția câmpului magnetic în piese

Câmpul magnetic obținut prin trecerea curentului variază în limite largi fiind influențat de felul materialului, forma piesei, intensitatea câmpului și forma curentului de magnetizare. Ca o particularitate, se remarcă faptul că în toate situațiile în care se practică exclusiv injecția de curent, valoarea maximă se situează la suprafața exterioară a piesei.

În figura 26 se arată variația lui H în secțiunea unei piese cilindrice pline parcurse de c.c. la o piesă neferomagnetică (linie întreruptă), respectiv la o piesă feromagnetică (linie plină). Variațiile sunt liniare pe secțiune, cuprinse între valoarea 0 în axa piesei și H' , respectiv $\mu H'$ la suprafață. În exteriorul piesei câmpul magnetic scade semnificativ odată cu mărirea distanței de la suprafața piesei. Spre deosebire, dacă se aplică c.a. datorită efectului pelicular variația lui H este de formă exponentială (curba 2 din figura 26).

Variația câmpului magnetic H în secțiunea unei tevi este pusă în evidență în figura 27.

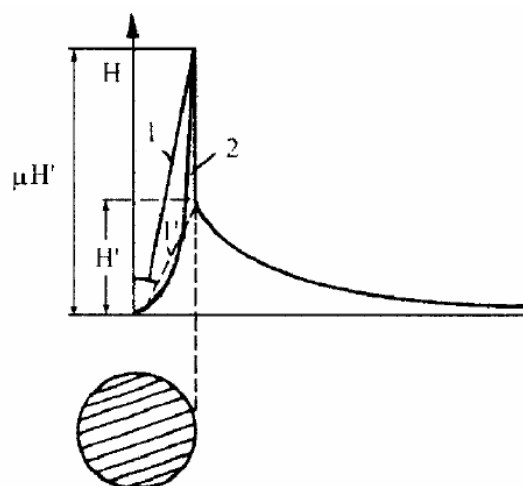


Fig. 26 Distribuția câmpului magnetic într-o bară cilindrică plină parcursă de curent:

- 1 - c.c. și material feromagnetic;
- 1' c.c. și material neferomagnetic
- 2 - c.a. material feromagnetic

La suprafața interioară a tevii $H = 0$, iar la suprafața exterioară se obține H_{max} . Curbele 1 și 1' reprezintă variația H pe grosime la materiale feromagnetice, respectiv neferomagnetice parcurse de c.c., iar curba 2, variația H în cazul materialului feromagnetic parcurs de c.a.

În figura 28 se prezintă variația câmpului magnetic în cazul a două conductoare coaxiale, unul interior dintr-un material neferomagnetic și unul exterior dintr-un material feromagnetic. În acest caz valoarea maximă a câmpului magnetic se localizează la suprafața interioară a tevii.

În cazul conductorilor cu secțiune dreptunghiulară, de lățime b și lungime h , magnetizați prin trecerea curentului alternativ și având raportul $b/h > 0,5$, intensitatea câmpului magnetic la suprafață poate fi calculată cu relația:

$$H = I/p \quad (94)$$

unde: I - intensitatea curentului, în A; p - este perimetrul secțiunii (m).

Intensitatea câmpului magnetic scade spre marginile conductorului, iar variația (distribuția) la suprafață este simetrică față de axa conductorului, dar cu diferite funcții de felul curentului continuu sau alternativ.

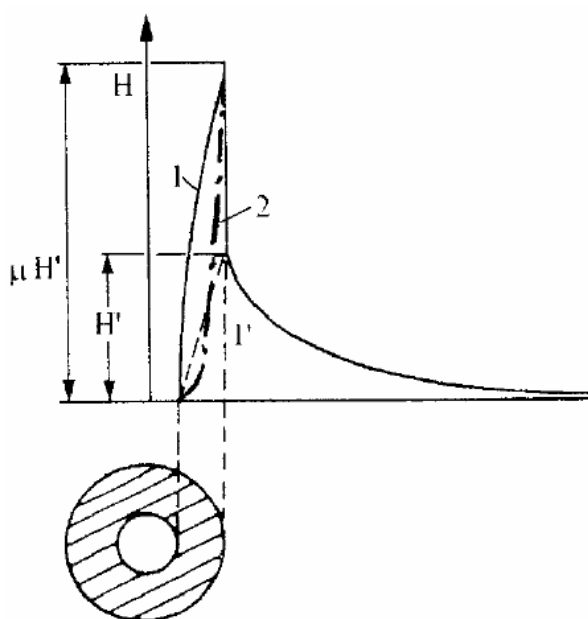


Fig. 27 Distribuția câmpului magnetic într-o parcurș de curent: cilindrice coaxiale I c.c.

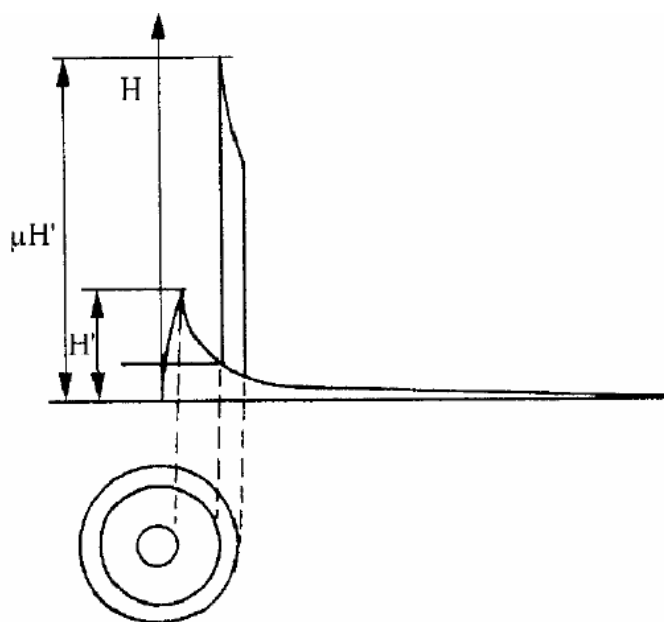


Fig. 28 Distribuția câmpului magnetic în piese feavò parcursò de curent: cilindrice coaxiale I c.c. 4i materialJeromagnetic:

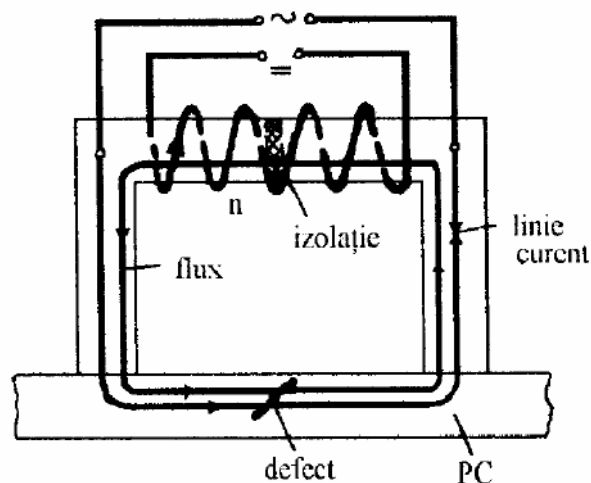
1' c.c. și material nefèromagnetic:

2-c.a.materialfèromagnehc

5.4. Magnetizarea mixtă

Magnetizarea mixtă se folosește în general atunci când nu se cunoaște modul de orientare a defectului, respectiv atunci când este posibilă o singură poziție de așezare a piesei în raport cu instalația. Se realizează practic cu ajutorul defectoscoapelor fixe universale, care permit și o reglare după necesități a curentului pe cele două direcții până la $3000 \div 5000$ A pentru magnetizarea transversală și $20.000 \div 50.000$ As pentru magnetizarea longitudinală. Situații speciale de control la piese foarte mari au impus construirea unor defectoscoape fixe cu deschiderea de până la 6 m, la care magnetizarea longitudinală este produsă de o solenoidă de 400.000 As, [8].

Pentru a asigura variația orientării vectorului de câmp și cuprinderea tuturor direcțiilor, componentele câmpului trebuie să fie reglabile și/sau cel puțin una din ele alternativă. Metoda clasică aplicată la defectoscoapele universale constă în suprapunerea magnetizării circulare (transversale) alternative cu magnetizarea polară (longitudinală) în curent continuu, figura 29.



Prin suprapunerea celor două câmpuri, așa cum rezultă din figura 30, vectorul câmpului rezultat își schimbă poziția cu frecvența câmpului sinusoidal al magnetizării circulare. Soluții avantajoase se pot obține prin combinarea magnetizării longitudinale și circulare cu curenți alternativi defazați și redresați, ceea ce are ca rezultat mărirea frecvenței câmpului rotitor rezultat și prin aceasta ridicarea gradului de decelabilitate a discontinuităților. Unghiurile de defazare recomandate se situează între 50° și 130°.

Un avantaj incontestabil al defectoscoapelor fixe constă în posibilitatea reglării câmpurilor magnetice și astfel obținerea unui câmp de dispersie optim pentru decelarea discontinuităților, indiferent de formă și permeabilitate.

Fluxul produs de bobina alimentată în c.c. și care se închide prin jugul defectoscopului în concordantă cu notațiile din figura 29, este dat de relația:

$$\Phi_L = \frac{U_i \cdot R \cdot C}{n} \quad (95)$$

unde: U_i - tensiunea de alimentare a bobinei;
 R, C - constante; n - număr de spire pe bobină.

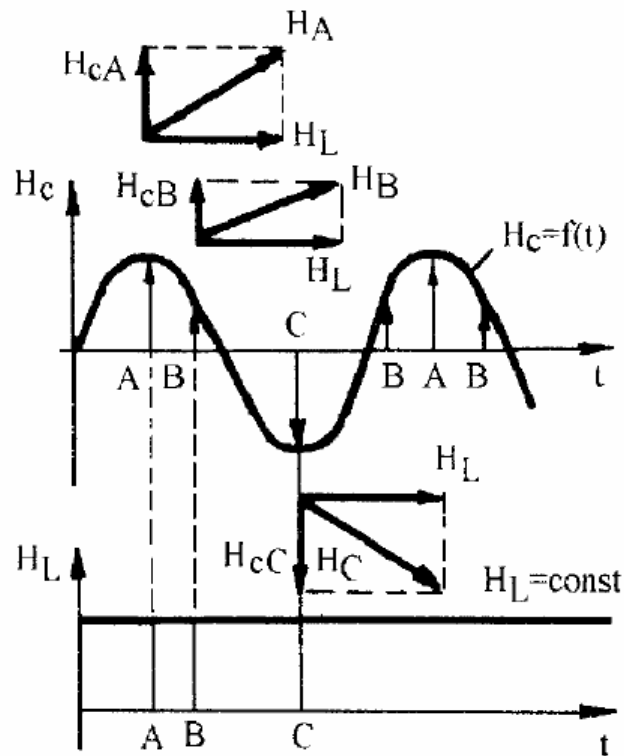


Fig. 30 Suprapunerea câmpului longitudinal constant H_L cu câmpul circular variabil H_C

Fluxul produs de curentul alternativ se determină din relația:

$$\Phi_C = \frac{U_2}{2\pi \cdot f \cdot n_2} \quad (96)$$

unde: U_2 - tensiunea secundară a transformatorului de alimentare; $f = 50 \text{ Hz}$ - frecvența tensiunii rețelei; n_2 - numărul de spire din secundarul transformatorului.

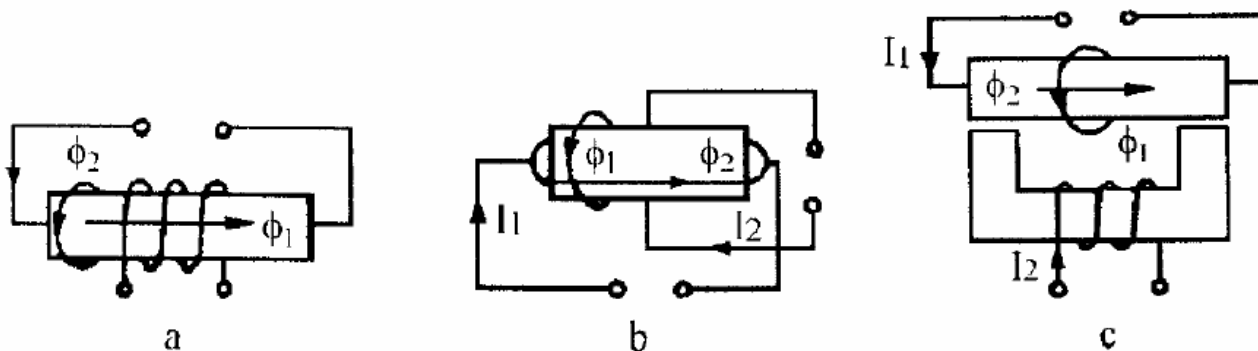


Fig. 31 Alte scheme de magnetizare mixtă: a - combinație solenoid, trecere de curent; b - electrozi de contact pe două direcții; c - combinație electromagnet, injecție de curent

Alte scheme de magnetizare mixtă rezultă din figura 31. După figura 31,a, câmpul longitudinal produs de un solenoid Q, este combinat cu cel circular produs prin trecerea curentului prin piesă Q2. În figura 31,b, combinarea fluxurilor Φ_1 și Φ_2 se realizează cu electrozi de contact și injecție de curent pe două direcții perpendiculare. În figura 31,c, combinarea fluxurilor magnetice se realizează suprapunând unei magnetizări polare cu electromagnet, injecția de curent cu electrozi de contact.

6. DEMAGNETIZAREA

După încheierea controlului este obligatorie demagnetizarea piesei întrucât magnetizația remanentă provoacă perturbatii, atât în prelucrarea ulterioară a pieselor, cât și, mai ales, în exploatarea lor (perturbarea funcționării aparatelor electromagnetice, creșterea susceptibilității la coroziune, mărirea vitezei de uzare etc.). Pe de altă parte, la magnetizarea polară, piesele se ridică greu de pe polii instalației datorită forțelor care iau naștere în cursul magnetizării. Experiența a arătat că, în general, arcul electric la sudare nu este influențat de magnetizarea remanentă până la cea. 50 A/cm. În cazul prelucrărilor prin aschiere, magnetizarea remanentă trebuie coborâtă însă sub 10 A/cm.

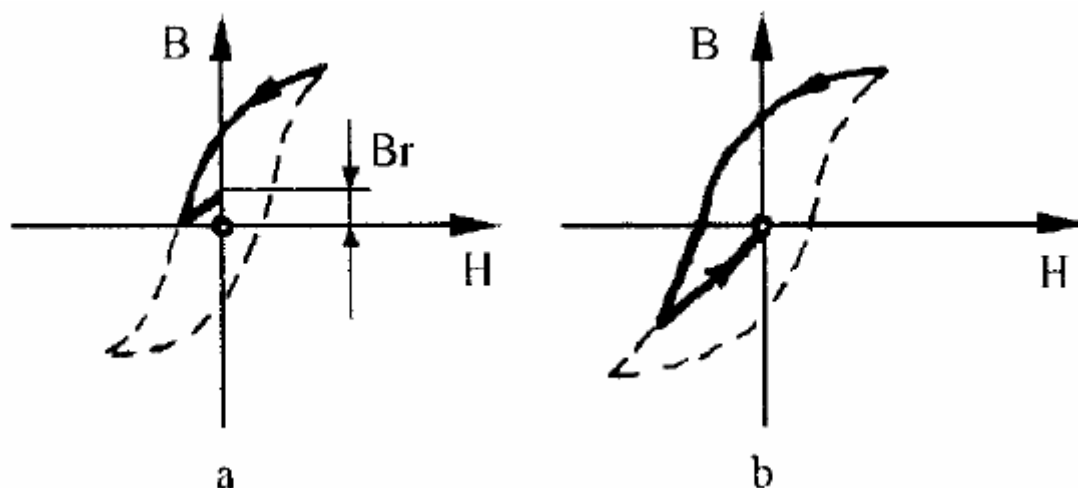


Fig. 32 Demagnetizare prin inversarea câmpului magnetic: a -cu inducție remanentă; b --fără inducție remanentă

Cele mai dăunătoare sunt câmpurile remanente longitudinale. Prezența lor poate fi măsurată cu ajutorul magnetometrului, respectiv apreciată prin atragerea – devierea unui lant format din agrafe. Câmpurile magnetice circulare sunt limitate în piesă, în exterior nemanifestându-se și ca urmare sunt mai puțin nocive.

Direcția câmpului demagnetizant este independentă de direcția magnetizației remanente, important fiind faptul utilizării unui câmp de demagnetizare inițial egal sau mai mare decât cel folosit la magnetizare.

Valoarea magnetizației remanente admisă după demagnetizare trebuie corelată cu valoarea componentei orizontale a câmpului magnetic terestru, care este de 16 A/m.

Demagnetizarea se realizează de regulă pe instalațiile cu care s-a produs magnetizarea, putându-se folosi în principal trei metode:

a. O primă metodă se pretează la demagnetizarea pieselor magnetizate longitudinal în curent continuu. Ea constă în magnetizarea cu un câmp contrar până la anularea inducției din piesă. Ciclul de demagnetizare este prezentat în figura 32,a.

Dezavantajul metodei este că după eliminarea câmpului aplicat la demagnetizare și după ridicarea din instalație, piesa se remagnetizează potrivit ramurii crescătoare de pe curba de histerezis. O soluție superioară constă în magnetizarea cu un câmp contrar mai puternic, astfel încât după întreruperea alimentării inducția să ajungă la zero, așa cum este prezentat în figura 32,b.

b. Altă metodă învederează demagnetizarea într-un câmp alternativ descrescător, prin micșorarea curentului până la anularea buclei de histereză, conform figurii 33.

Aceasta este o metodă care se poate aplica numai în bobine de demagnetizare speciale deschise, care complica din punct de vedere constructiv instalația. Totodată, metoda este limitată la piese de grosimi (diametre) mici și mijlocii.

c. A treia metodă, mai importantă, constă în inversarea succesivă a polarității în curent continuu și micșorarea acestuia până la zero. În cazul pieselor mai mari sau de grosimi relativ mari, se va lucra cu frecvență micșorată. Se va folosi în acest scop un convertizor de frecvență și un dispozitiv de schimbare a polarității prin comutarea succesivă a alimentării bobinei de magnetizare, concomitent cu introducerea unor rezistențe suplimentare în circuit.

În linii mari 10 inversări și reduceri ale curentului dau rezultate satisfăcătoare.

Demagnetizarea locală se poate efectua pe două căi:

- cu ajutorul jugului magnetic portabil alimentat în c.a., așezând polii în contact cu suprafața piesei, apoi retrăgându-l sub tensiune în mod treptat; întreruperea curentului se face numai după ieseirea completă a jugului din zona de influență a piesei;
- utilizarea cablurilor parcurse de c.c. așezate pe suprafața piesei și aplicarea, fie a unui câmp magnetic egal și contrar celui de magnetizare, fie a unei reduceri treptate a curentului până la zero, concomitent cu inversarea sensului.

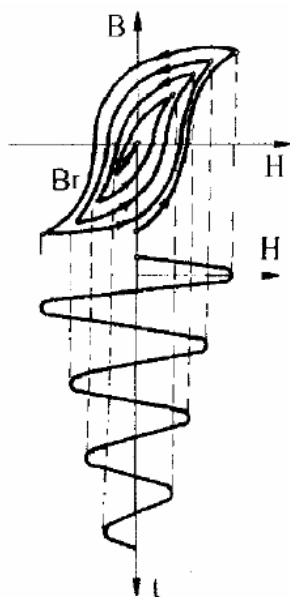


Fig. 33 Demagnetizare în c.a. descrescător

7. MAGNETOGRAFIEREA

Metoda magnetografică este o metodă de mare productivitate, pretabilă la automatizarea controlului pieselor în flux tehnologic, în special în cazul tevilor sudate.

Câmpul magnetic de dispersie de pe suprafața examinată se imprimă pe o bandă magnetică, explorată apoi de o sondă de potențial oscilantă de proximitate, care convertește câmpul de dispersie în semnale electrice vizualizate printr-un sistem adecvat dând posibilitatea unei evaluări cantitative. Față de defectoscopia cu pulberi, magnetografia prezintă trei mari avantaje:

- productivitate net superioară;
- posibilități largi de automatizare;
- adâncime de detectare mai mare (aproximativ dublă).

Comparativ cu defectoscopia cu sonde de potențial, prezintă avantajul unei insensibilități față de variații limitate ale permeabilității și ale formel suprafeței examinate. Cercetări sistematice au pus în evidență corespondența liniară dintre adâncimea discontinuității și amplitudinea semnalului înregistrat pe osciloscop, indiferent de poziția acesteia, ceea ce conferă metodei valente superioare în evaluarea și interpretarea cantitativă a defectelor.

Magnetizarea pieselor se realizează fie polar, în care caz câmpul este dirijat perpendicular pe cusătură dacă se controlează o îmbinare sudată, fie transversal, cu ajutorul unei bobine, sau prin trecerea curentului, în care caz câmpul este dirijat pe direcția secțiunii longitudinale a îmbinării (normal la suprafața piesei). Se folosește magnetizarea în curent continuu sau în curent pulsant, deoarece câmpurile alternative anulează imprimarea.

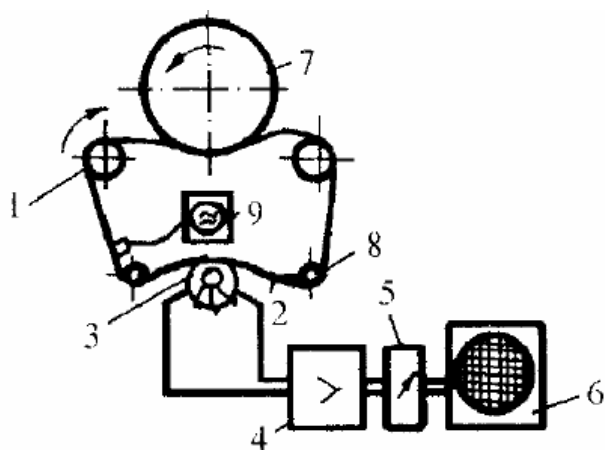


Fig. 34 Schema de funcționare a instalației de magnetografiere

Schema bloc a unui aparat de magnetografiere este prezentată în figura 34. Ea conține sistemul de antrenare (1) a benzii magnetice (2), sonda oscilantă de apropiere (3), sincronizată cu viteza de deplasare a benzii, amplificatorul (4), filtrul (5) și oscilograful (6). Pentru menținerea unui contact permanent între banda (2) și piesa controlată (7), instalația dispune de un dispozitiv de întindere cu role (8), iar pentru stergerea benzii de un generator sau bobină de soc prevăzută cu cap de demagnetizare (9). Banda magnetică trebuie să fie elastică în vederea unei întinse rulări pe suprafața testată, rezistentă la uzură și la variații de temperatură, iar particulele magnetice trebuie să fie dispuse omogen pe suprafață și să asigure reproducerea liniară a câmpului de dispersie.

Pentru reținerea câmpului de dispersie de pe bandă, sonda efectuează o mișcare de oscilație (translație) sau o mișcare de rotație combinată sincron cu o mișcare de translație, de baleiere a lărimii benzii, astfel încât citirea să se realizeze printr-o mișcare în zig-zag. Semnalele captate de sondă și amplificate corespunzător, sunt trecute unui filtru de frecvență, eventual acordat pe tipuri și mărimi de discontinuități și transmise sistemului de redare. Pentru redare se întrebuintează un oscilograf sau un înregistrator multicanal. La osciloscop devierea spotului luminos pe verticală este

proportională cu tensiunea transmisă de sondă, iar lățimea ecranului proportională cu lățimea benzii. Înregistratorul multicanal transpune grafic variațiile câmpului magnetic de pe bandă, sincron cu miscarile sondei de contact, obținându-se în cazul unui număr suficient de canale o imagine plastică a zonei examinate cu posibilități de decelare operativă a poziției și mărimii discontinuității. Pentru localizarea exactă azimutul poziției de pornire a controlului trebuie să fie marcat pe bandă.

Instalațiile pentru controlul semiautomat al tevelor sudate sunt prevăzute și cu dispozitive de marcare cu vopsea a zonelor cu defecte neadmise. Pentru facilitarea unui contact intim cu suprafața îmbinării sudate, banda magnetică se fixează pe un suport din cauciuc ce îi conferă rezistența mecanică necesară și face să se evite formarea cutelor, de unde se pot reține semnale false.

Experimentări efectuate de [37] au evidențiat o sensibilitate diferentiată a metodei față de discontinuități în funcție de valoarea permeabilității. Astfel, pentru valori mici ale permeabilității ($\mu = 2 \div 10$), fluxul de dispersie nu variază semnificativ cu lățimea discontinuității. La valori ridicate ale permeabilității ($\mu = 20 \div 500$), dimpotrivă, fluxul de dispersie dintr-o discontinuitate lată este foarte mic în comparație cu cel provenit de la o discontinuitate foarte îngustă. De aceea, câmpul de magnetizare trebuie ales în așa fel încât permeabilitatea să nu scadă sub 20. De aici decurge și necesitatea de corelare a granulației benzii magnetice cu limitele sensibilității de detectare.

8. CORPURI DE REGLARE A CÂMPULUI MAGNETIC

În paragrafele precedente s-a pus în evidență faptul că alegerea curentului de magnetizare în vederea obținerii efectelor scontate în cursul examinării piesei cu pulberi magnetice reprezintă o problemă cu multe variabile și incertitudini. De aceea, dincolo de tehnicile de măsurare, s-a recurs la mijloace simple dar eficiente, care să permită reglarea intensității câmpului, respectiv corectarea acesteia direct pe suprafața piesei.

Unul din mijloacele menționate se referă la corpul de reglare prezentat în figura 35, după [44].

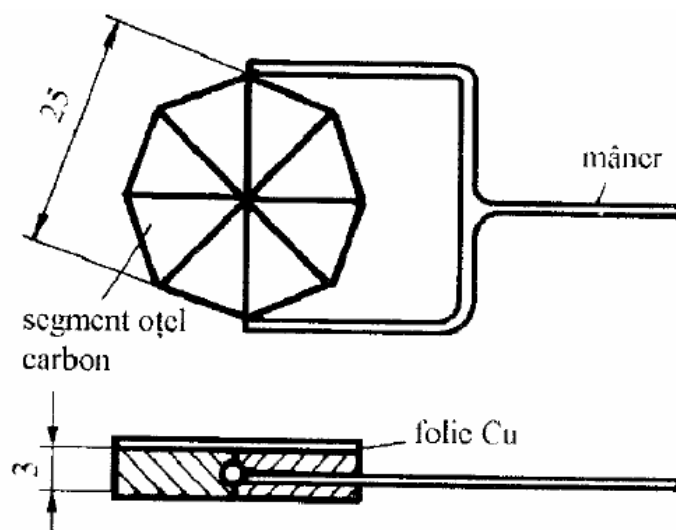


Fig. 35 Corp de reglare a câmpului magnetic de tip AS7M

El este format din 8 segmente de oțel moale având compoziția chimică pe cât posibil apropiată de a piesei controlate, izolate între ele cu metal neferos și acoperite cu folie de cupru de 0,25 mm grosime. Izolația dintre segmente joacă rolul discontinuităților din material (fisuri, nepătrunderi). Corpul se aplică pe piesă în diferite poziții, reglându-se intensitatea curentului până la formarea unui câmp de dispersie cu contrast corespunzător pe suprafața foliei de cupru în dreptul uneia dintre discontinuități. Astfel, corpul de reglare poate fi folosit și pentru stabilirea orientării câmpului

magnetic. În acest scop, prin rotirea corpului, se urmărește interstițiul pe care se formează câmpul de dispersie cel mai intens; liniile de câmp sunt orientate perpendicular pe interstițiul respectiv.

O construcție îmbunătățită este prezentată, după Berthold [2], în figura 36.

Corpul de reglare este format dintr-o piesă cilindrică din oțel maale (1), sectorizată prin două canale diametrice perpendiculare și o pialită (2), prevăzută cu folie subtire de cupru (3), care poate fi apropiată sau îndepărtată de piesa cilindrică prin rotire.

Condițiile de magnetizare (intensitatea curentului, granulația și concentrația sus pensiei), se reglează astfel încât să se obțină indicații cât mai bune de la distanțe maxime între folia piulitei și piesa cilindrică prin care se închide fluxul magnetic.

În vederea obținerii unei concluzii ridicate a controlului, se impune ca direcția liniilor de câmp să fie perpendiculară pe direcția discontinuității. În cazul în care nu se cunoaște aprioric direcția discontinuității, piesa se magnetizează în cel puțin două direcții perpendiculare.

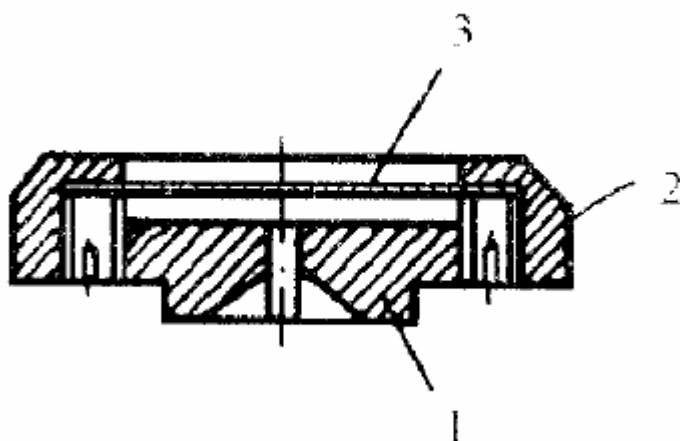


Fig. M Corp de reglare a câmpului magnetic de tip Up Berthold

9. EXAMINAREA CÂMPULUI MAGNETIC DE DISPERSIE

9.1. Pregătirea suprafeței

Mobilitatea particulelor magnetice la suprafața piesei este influențată de o serie de factori printre care rugozitatea suprafeței, stratul de oxid, peliculele de grăsimi și apă. Sursele de contaminare pot provoca indicații false îngreunând interpretarea rezultatului controlului. Înainte de parcurgerea operațiilor de control toate sursele de contaminare vor fi îndepărtate prin prelucrare, respectiv îndepărtare mecanică, urmată de spălarea cu detergent. Straturile de protecție electrochimică sau de vopsea nu influențează practic sensibilitatea de examinare.

Între rugozitate pe de o parte, capacitatea de detectare și reproductibilitatea examinării există o relație de dependență directă. Sensibilitatea cea mai bună de detecție o reprezintă suprafețele plane lustruite, putând ajunge la dimensiuni microscopice. În condiții obișnuite rugozitatea necesară și suficientă pentru un control de rutină este $R_3 < 16 \mu\text{m}$, ceea ce corespunde unei suprafețe finisate. Aceasta este suficientă pentru relevarea unor indicații de discontinuitate de aproximativ 1 mm.

În vederea măririi contrastului, înainte de aplicarea pulberii se practică freevent vopsirea suprafeței de controlat cu vopsea albă de nitrolac, diluată în proporție de 3 : 1, ceea ce asigură o uscare rapidă.

9.2. Condiții de examinare

Examinarea pieselor se realizează în lumină albă difuză, care asigură o iluminare ($<D/S$, Cd/m²), de minim 500 lx± În cazul folosirii pulberilor fluorescente se utilizează lumina ultravioletă în spații slab iluminate, sub 50 lx.

Radiatiile ultraviolete se obțin cu ajutorul unei lămpi cu vapori de mercur.

Densitatea luminoasă este proporțională cu intensitatea radiației măsurată în W/m Intensitatea minimă de iluminare trebuie să fie 2 5 W/m², iar dacă lampa este prevăzută cu lupă, ea trebuie să depășească 50 W/m Spectrul filtrat emis de lămpi u.v. este cuprins între 310 - 420 nm. Pigmentul fluorescent este excitat la o lungime de undă de 365 nm și emite o culoare verde gălbuie în domeniul 520 - 580 nm.

Eliminarea factorilor subiectivi umani la examinarea suprafeței controlate și la interpretarea discontinuităților impune respectarea următoarelor reguli referitoare la condițiile de control și de observare vizuală:

- timpul de adaptare la controlul cu pulberi fluorescente în încăperi întunecate trebuie să fie de cel puțin 10 minute;
- distanța de examinare se recomandă să fie de $0,4 \div 0,5$ m;
- cel puțin un ochi trebuie să asigure o vedere normală în câmp apropiat apreciată la valoarea 1,0 cu ajutorul ortotipului și o valoare de minimum 0,8 în câmp mijlociu ($0,4 \div 5$ m) și îndepărtat;
- anomalii de distingere a culorii determinate la anomaloscop trebuie să se încadreze în limitele 1,4 2 Ac 2 0,7;
- capacitatea de adaptare la întuneric, capacitatea de menținere a acuității vizuale fără oboseală prematură, precum și sensibilitatea la strălucire trebuie să se situeze la nivele normale.

9.3. Evaluarea indicatilor de discontinuitate

Indicatiile de fisuri deschise la suprafață prezintă un contrast ridicat cu contur continuu, neregulat, eventual chiar ramificat. Fisurile și nepătrunderile interne apar difuze cu indicații mai largi și intermitente. Suflurile și chiar incluziunile nemetalice plasate mai la suprafață se relevă prin indicații scurte, discontinue, uneori grupate și orientate în sensul fibrajului de laminare sau forjare.

Fisurile produse prin tratament termic conduc la indicații liniare puternic conturate, localizate de regulă în dreptul muchiilor și trecerilor de secțiune. Caracteristic pentru ele este și configurația ramificată.

Fisurile induse prin operații de rectificare-polizare apar sub formă grupată și segmentată, sau sub formă de rețele interconectate.

Fisurile de oboseală apar sub forma unor linii bine conturate în general drepte.

Cele de oboseală termică sunt scurte și mai fine, datorită adâncimilor mai mici.

Fisurile produse sub acțiunea mediului coroziv sunt mai largi și legate de zone cu pete de coroziune. Fisurile produse în urma fenomenului de coroziune fisurantă sub tensiune se caracterizează prin ramificații intense.

În cazul fisurării sub cordon tipice îmbinărilor sudate, indicațiile sunt late, difuze și dificil de interpretat.

Golurile furnizează indicații liniare orientate după direcția de laminare sau de extrudare. Retasurile aflate în apropierea suprafeței furnizează indicații difuze.

Incluziunile nemetalice având o permeabilitate magnetică diferită sunt evidențiate sub formă de indicații liniare alungite și aliniate pe direcții de prelucrare.

Suprapunerea furnizează indicații bine conturate, care se confundă cu cele obținute de la fisuri.

Defectele subsuperficiale conduc la indicații late și difuze, caracteristicile acestor indicații fiind în legătură cu tipul discontinuității și cu adâncimea.

Indicațiile f(dse de defect au următoarele surse principale de producere:

- magnetizarea excesivă, ceea ce conduce la formarea artificială a depozitelor de pulbere magnetică; fenomenul se produce în special în dreptul modificărilor de secțiune, zone de altfel susceptibile de fisurare în urma tratamentelor termice;
- modificări structurale semnificative, mai ales cele de călire, plasate într-o zonă strict limitată caracteristică zonei influențată termic a unei îmbinări sudate;
- prezența unor zone de segregatii în care sirurile - benzile prezintă o permeabilitate redusă;
- ecrisările superficiale, datorită modificărilor structurale cu diferențieri în permeabilitate;
- creștăturile marginale, craterele, precum și solzii cordoanelor de sudura care retin în general particulele magnetice ca și fisurile superficiale sau defectele subsuperficiale;
- zona limitrofă îmbinării sudate sau placării cu oțeluri austenitice formează un câmp de dispersie ca urmare a gradientilor de permeabilitate magnetică.

9A Conservarea imaginii

Locurile defecte se notează, fixează și se fotografiază pentru a putea servi ca document de control. Defectograme cu vizibilitate bună se obțin cu ajutorul amprentelor imprimate pe hârtie de celofan umectată. Fixarea pe piesă a pulberii magnetice se realizează cu selac pulverizat fin peste zonele care conțin indicații de discontinuități.

O altă metodă constă în folosirea unei folii transparente adezive, care se aplică pe suprafața controlată și se presează uniform. Depozitele de pulberi magnetice aderă la folie. După desprindere, folia se aplică pe o foaie de hârtie poroasă pe care se imprimă câmpul de dispersie format la suprafața piesei.

În ultimii ani se dezvoltă intens metoda replicilor active din cauciuc siliconic magnetic autopolimerizant. Folosirea ei aduce un dublu avantaj, acela de producere în timp real a câmpului de dispersie și acela de conservare a imaginii defectogramei.

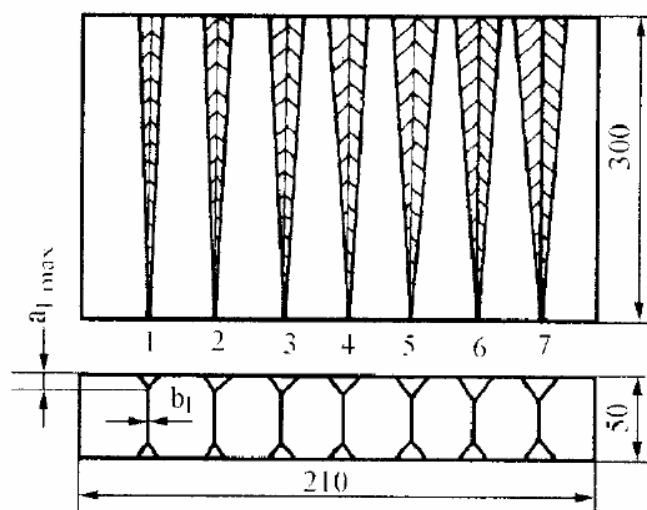
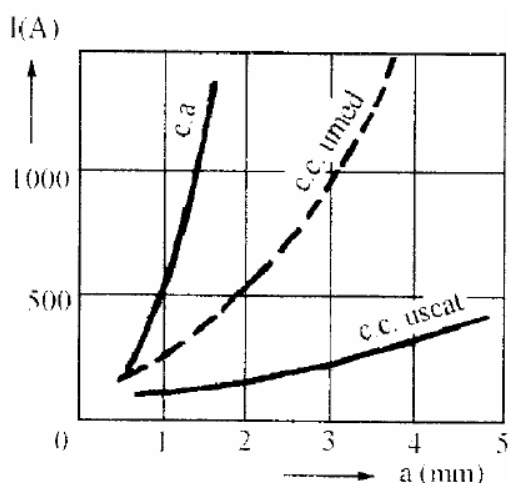
Cauciucul siliconic se aplică într-o peliculă lichidă. Sub acțiunea câmpului magnetic, care trebuie menținut în timpul luării replicii, particulele magnetice proprii migrează spre discontinuități. Prin polimerizare "imaginea" este incluzionată în pelicula de cauciuc solid conservându-se.

Una din metodele moderne de conservare a imaginii este metoda de înregistrare video. Și de prelucrare automată a imaginii cu ajutorul computerului. Descrierea se găsește la paragraful 10 din capitolul 2.

10. ADÂNCIMEA DE DETECTARE ȘI SENSIBILITATEA EXAMINĂRII

Adâncimea de detectare la controlul cu pulberi magnetice este influențată de următorii factori:

- procedeul de magnetizare și mai ales felul curentului de magnetizare, curent continuu, curent pulsant sau curent alternant și intensitatea câmpului;
- freeventa curentului;
- procedeul de aplicare a pulberii magnetice, uscat sau umed;
- tipul defectului.



Asa cum s-a arătat, adâncimea de pătrundere a câmpului este maximă în cazul magnetizării în curent continuu (c.c.) sau în curent pulsant monofazat. Acest lucru este pus în evidență prin diagrama din figura 37, reprezentând variația adâncimii de penetrare a la detectarea discontinuităților volumice cu curentul de magnetizare L . Se observă că pentru a asigura aceeași adâncime de penetrare, intensitatea de magnetizare în curent alternativ, trebuie să fie cu aproape un ordin de mărime superior curentului necesar magnetizării în curent continuu. Se pune în evidență, pe de altă parte că în cazul magnetizării în curent alternativ, capacitatea maximă de detectare în profunzime este limitată la nivele ale intensității curentului de cea. $1000 \div 1500$ A. În cazul magnetizării în curent continuu, un rol deosebit îl joacă procedeul de aplicare a pulberii. După cum rezultă din figura 37 sensibilitatea maximă la variația intensității curentului de magnetizare o prezintă procedeul uscat. Rezultate superioare din punct de vedere al decelabilității se obțin prin folosirea pulberilor fluorescente, în concentrație de 1 g/l, în special al celor uscate fluorescente, în concentrație de 10 g/l.

Sensibilitatea de detectare se detenuină cu ajutorul unei piese de forma celei prezentate în figura 38, formata din 8 plăci de oțel carbon nealiat, având rosturile prelucrate înclinat de la un capăt la altul de la adâncimea $a = 0$ de o parte până la adâncimea $a =$ de cealaltă parte. Rosturile astfel formate au fost sudate, asigurându-se cu distanțiere interstii de lățime b constantă pe toată lungimea probei, dar diferite de la rost la rost $b_1 \dots b_7$. Supraînălțarea cusăturilor a fost îndepărtată ulterior prin aschiere, astfel încât pe corpul de probă s-au format 7 rânduri de nepătrunderi de diferite lățimi b și de adâncime a variabilă, tabelul 7. Prin magnetizarea corpului se determină adâncimea de detectare a nepătrunderii în funcție de deschiderea (lățimea) interstiiilor.

Tabelul 7

Dimensiunea (mm)	Rândul						
	1	2	3	4	5	6	7
Lățimea (deschiderea) rostului b	0	0,13	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0
Adâncimea maximă a_{max}	4,4	4,8	5,6	8,0	10,7	14,5	18,7

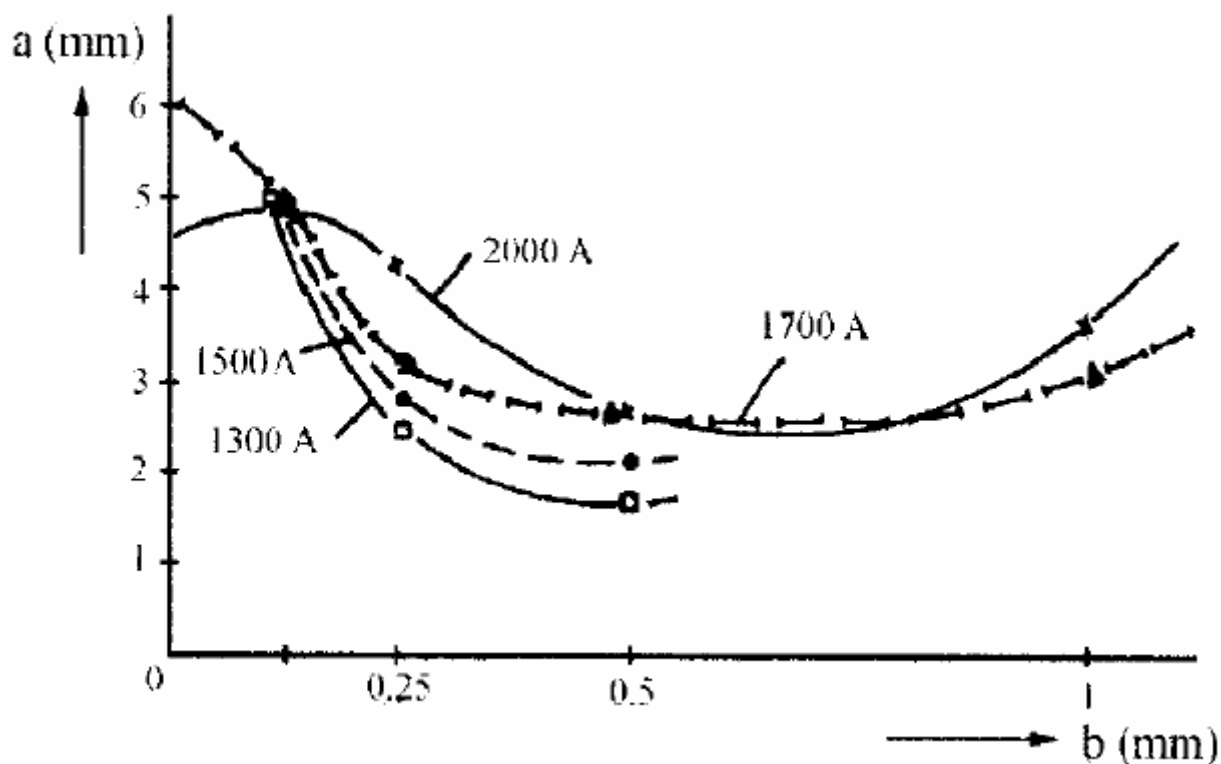


Fig 39 Dependența adâncimii de detectare β mctie de lăimea rostului stabilită pentru pulberea de magnetită în suspensie

În diagrama din figura 39 se exemplifică dependența $a = f(b)$ obținută la experimentarea unei pulberi magnetice de Fe_3O_4 în suspensie, având granulația de $10 \div 30 \mu\text{m}$, folosindu-se ca parametru intensitatea de magnetizare, [30]. Datele complete obținute în urma experimentării unui număr de 12 sortimente de pulberi magnetice de diferite proveniențe sunt ilustrate în figura 40. Dependentele $a = f(I)$ au fost ridicate pe lățimi de rosturi $b = \text{const}$, aflate în intervalul $0,25 + 4 \text{ mm}$, [30].

Aceste rezultate permit să se tragă următoarele concluzii:

- sensibilitatea de detectare a defectelor plane prin metoda cu pulberi magnetice este de ordinul $0,1 \dots 0,5 \text{ mm}$, fiind influențată și de natura pulberii;
- sensibilitatea maximă se obține în cazul fisurilor și nepatrunderilor foarte înguste, unde se asigură chiar contactul suprafețelor (lățime zero); la lățimi de peste 4 mm câmpul de dispersie dispăre;
- adâncimea maximă detectabilă a defectelor este de $4 - 8 \text{ mm}$;
- în general nu se poate face o legătură între curentul de magnetizare și mobilitatea pulberii;
- cea mai mobilă este pulberea fluorescentă și suspensia $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$, cu forme aciculare;
- cea mai lentă este pulberea de magnetită;
- capacitatea maximă de detectare în profunzime (penetrabilitatea) este limitată la nivele ale intensității curentului de magnetizare de cca. $1000 - 2000 \text{ A}$; unele pulberi sunt împrăscate la curenți de magnetizare de peste 1700 A .

Performanțele maxime, în domeniul decelabilității discontinuităților se situează, după [55], în cazul unui control condus cu un câmp de magnetizare optim, folosind pulberi magnetice de granulație fină, fluorescente, și mijloace optice de examinare adecvate, la nivelul unor discontinuități cu o deschidere (lățime) de până la $0,001 \text{ mm}$, până la adâncimea de $0,010 \text{ mm}$.

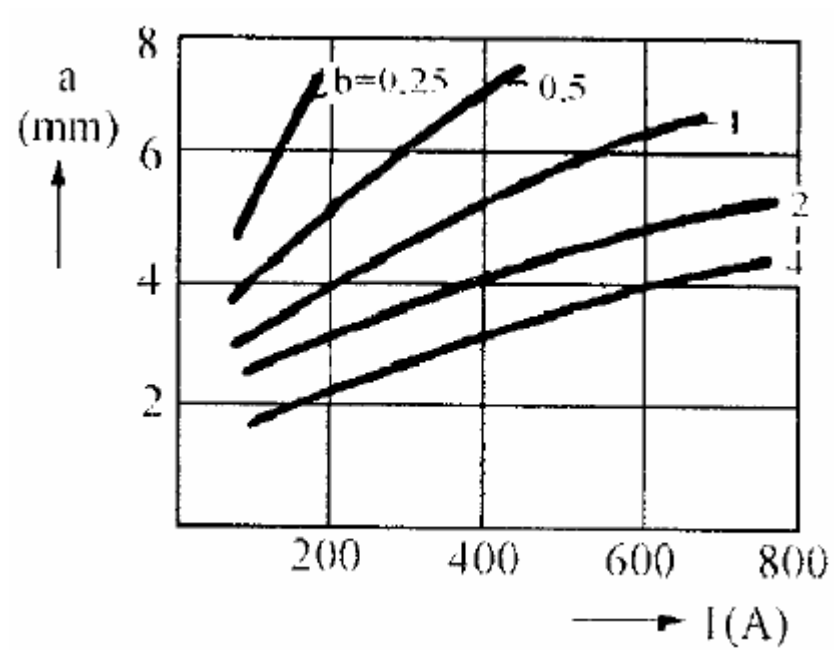


Fig. 40 Corelafii experimentale - adâncime de detectare în funcție de intensitatea curentului de magnetizare - pentru diferite valori ale deschiderii discontinuității