

STUDIUL COMPLEX AL TOLELOR DE FIER SILICIU CU GRĂUNȚI ORIENTAȚI (GO)

Gheorghe PĂLTÂNEA, Veronica MANESCU

Universitatea "Politehnica" din București, Spl. Independenței 313, 060042, București;

paltanea03@yahoo.com

Abstract. În acest articol am încercat să prezentăm o analiză a proprietăților și a procesului de fabricație a tolelor din Fe-Si Go

1 Caracteristici generale

Diversitatea compozițiilor oțelurilor din care sunt realizate tolele cu grăunți neorientați dispare în cazul tolelor cu grăunți orientați, deoarece toate tolele ce se găsesc la ora actuală pe piață au aceeași compoziție de bază: o soluție solidă de Fe-Si de concentrație 3 % fără aluminiu. Tolele cu conținut mai mare de siliciu sunt mai performante, dar mai scumpe.

Caracterul specific al acestor tole constă în structura lor cristalină. Toate cristalele cubice centrate ce compun tola (sunt de talie mare, diametrul lor este mai mare de 1 cm) sunt orientate în aceeași direcție. Această orientare se numește structura Goss sau (110)[001] (notația Miller) (figura 1). Direcția de laminare este conținută în planul tolei, fiind vecină cu latura cubului fiind totodată și direcția de ușoară magnetizare. Se remarcă în aceste tole o structură de domenii magnetice foarte avantajoasă constituită din domenii regulate în formă de benzi paralele magnetizate alternativ, separate prin pereți de 180° . Tolele cu grăunți orientați au magnetizația orientată pe direcția de laminare, iar pierderile de energie sunt reduse. Pe direcția perpendiculară pe direcția de laminare (direcția transversală) caracteristicile magnetice ale tolelor GO sunt inferioare celor corespunzătoare tolelor NO cu o compoziție asemănătoare [1, 2].

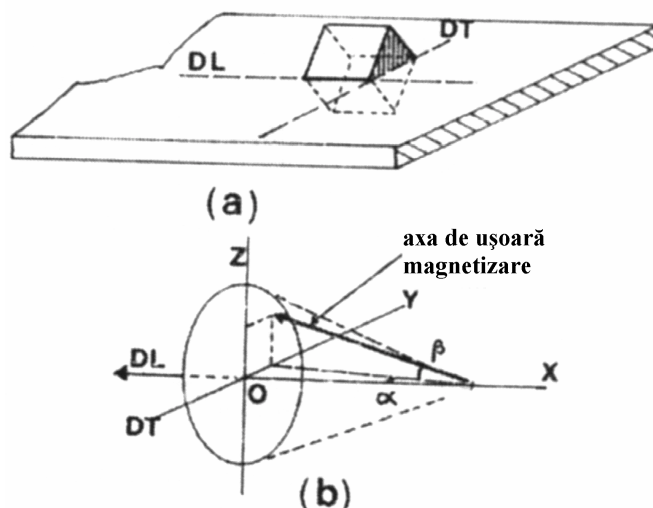


Fig. 1: Orientarea unui grăunte într-o tolă GO.
DL – direcția de laminare; DT – direcția transversală.

2 Metode de fabricare.

Recristalizarea secundară constituie o etapă importantă în fabricarea acestor materiale. Se obține o matrice alcătuită din cristale foarte mici (cu diametre de ordinul $10 \div 20 \mu\text{m}$) și unele din aceste cristale cresc foarte repede în detrimentul vecinilor lor. Volumul unui cristal mărit este de ordinul mm^3 , dar un singur cristal joacă rolul de germene, acesta având o structură Goss ideală. Germenele este înconjurat de grăunți primari cu o structură specifică. Această vecinătate conferă o mobilitate mare conexiunilor cu grăunții.

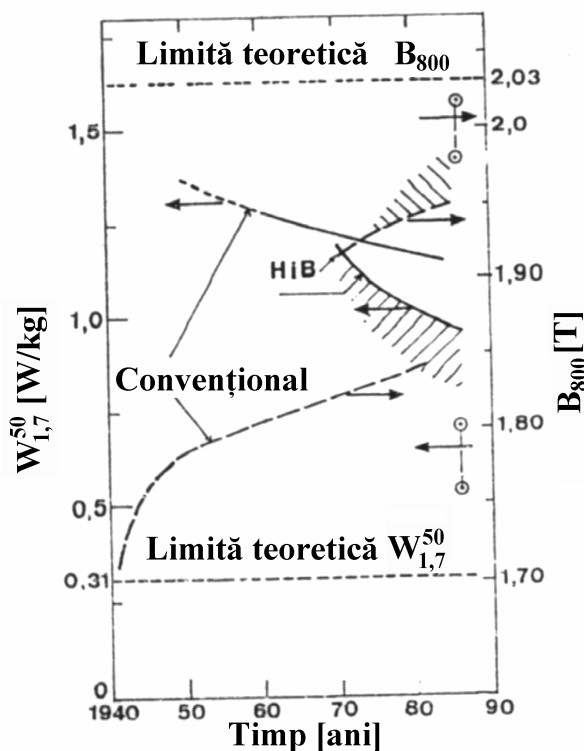


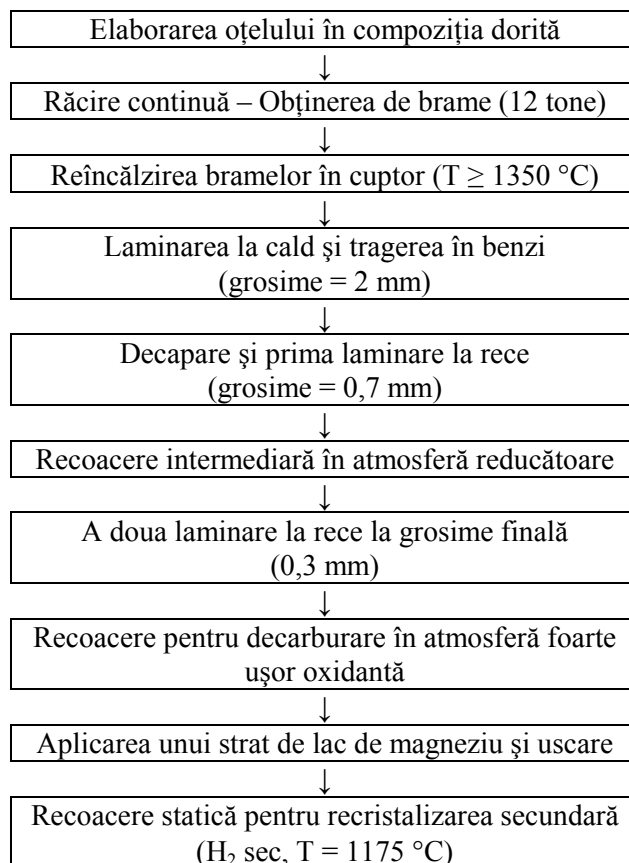
Fig. 2: Progresul tehnologic pentru tolele Fe-Si GO [4, 5].

Prepararea materialului începe în oțelărie prin introducerea în aliaj a unei impurități numită inhibitor de recristalizare primară (de exemplu sulfură de mangan, sau nitrură de aluminiu folosită în cazul tolelor de mare permeabilitate) în concentrație de câteva părți pe milion. Unul din rolurile inhibitorului este de a bloca creșterea grăunților primari. Energia stocată în grăunții primari este energia motoare a recristalizării secundare. Toate impuritățile și în particular carbonul concură pentru a obține o structură Goss bună. Recristalizarea secundară nu poate interveni după deblocarea creșterii grăunților la temperatură înaltă.

După răcire, inhibitorul capătă o formă fizică convenabilă. Eșantionul suportă un tratament termic la temperatură foarte înaltă înaintea laminării sale la cald. Operația de laminare la cald reprezintă o etapă importantă a ciclului de fabricație. Ea determină textura primară a materialului ce condiționează obținerea unei bune texturi Goss. După obținerea stării de recristalizare se elimină impuritățile și inhibitorului, deoarece acestea pot avea efecte nedorite în cea ce privește proprietățile magnetice ale materialului influențând deplasarea pereților de domenii [1].

Două familii de tole GO sunt disponibile pe piață: tolele clasice și tolele de înaltă permeabilitate cu performanțe mai bune. Marile etape de fabricare ale tolelor clasice sunt considerate cunoscute și sunt evidențiate în tabelul de mai jos. În scopul optimizării acestor etape s-a variat tipul impurităților introduse precum și modalitățile de tratament obținându-se tole de calitate diferite[2].

Tabelul 1: Principiul de fabricare a tolelor magnetice clasice cu grăunți orientați.



↓
Spălare și recoacere de fosfatare. Netezire

3 Izolația tolelor cu grăunți orientați.

Tolele cu grăunți orientați sunt destinate în principal construcției de miezuri de transformatoare care sunt plasate și funcționează în băi de ulei mineral ce asigură izolarea și răcirea aparatului. Izolarea adecvată a acestor tole trebuie să rămână perfect neutră și chimic stabilă față de acest mediu.

Pentru tolele clasice se utilizează o acoperire izolantă cu un silicat de magneziu numit forsterită (Mg_2SiO_4) ce este ulterior supus unei fosfatări. Deoarece este fabricat pe cale chimică la temperaturi înalte în timpul ultimei etape din procesul de fabricație, stratul izolant este foarte subțire ($2 \div 5 \mu m$).

Stratul izolant poate exercita tensionări mecanice asupra rețelei cristaline de Fe-Si datorită coeficienților de dilatație termică diferiți. Pentru cazul aplicării stratului izolant pe o lamelă monocristalină de metal, în planul (110), un calcul de elasticitate arată că rezultanta tensiunilor ce apar este echivalentă cu o tracțiune exercitată după direcția [001] a planului (110), ceea ce afectează proprietățile anizotrope ale suportului monocristalin. Valorile modulului lui Young în lungul direcțiilor [100] și [110] sunt de 120, respectiv 216 GPa. Rezultanta acestor tensionări joacă un rol benefic asupra repartițiilor de domenii și contribuie la ameliorarea proprietăților magnetice ale aliajului. Din nefericire tolele sunt policristaline, iar această îmbunătățire a proprietăților magnetice dispare atunci când orientarea cristalelor se abate, chiar și foarte puțin, de la orientarea Goss ideală.

În practică o bună acoperire izolantă determină o scădere a pierderilor prin exercitarea unor tensionări magnetoelastice doar în cazul tolelor mai bine texturate. Pentru cazul unei densități a stratului izolator obișnuită, apăsarea echivalentă asupra rețelei cristaline este de aproximativ 6 MPa. Acesta implică o reducere semnificativă a mărimii domeniilor magnetice și o scădere a pierderilor de putere cu aproape 10 % [3].

4 Tole cu grăunți orientați de înaltă permeabilitate

În anii '70 a fost introdusă o nouă tehnologie de fabricare a tolelor magnetice prin se puteau obține benzi cu o textură mult mai bună decât cea a tolelor clasice (figura 3). Această diminuarea a mărimii grăunțelor de domenii nu a adus o scădere importantă a pierderilor de putere.

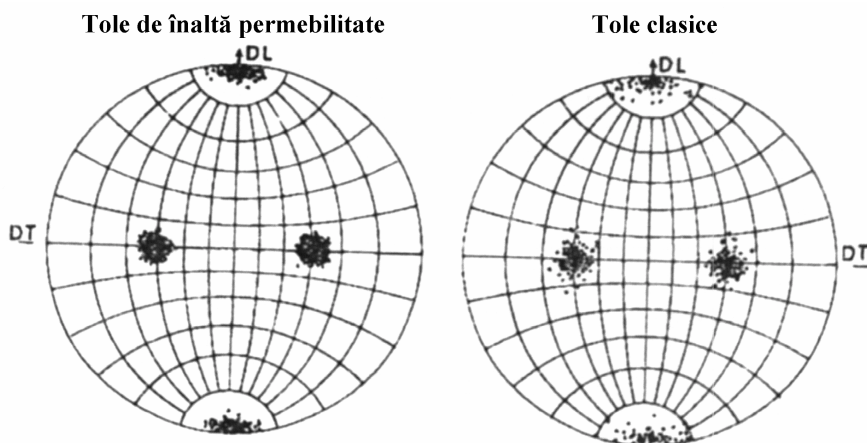


Fig. 3: Imaginea polilor (100) pentru două tole GO. Dispersia orientării polilor (100) este foarte diferită în cazul celor două texturi, abaterea de la orientarea ideală fiind inferioară limitei de 15°.

Ulterior s-au descoperit noi tratamente suplimentare ce se pot aplica pe suprafața tolei în etapa finală de fabricare. Aceste tratamente au rolul de a măări numărul centrelor de nucleație a pereților Bloch fără a limita mobilitatea acestora. Pentru acesta se realizează defecte superficiale la limita dintre rețeaua cristalină și stratul izolator, distribuite regulat în linii distanțate cu $5 \div 10$ mm perpendiculare pe direcția de laminare. Acest procedeu este cunoscut ca „scratching”.

Tehnologia industrială utilizată pentru crearea acestor linii folosește un fascicul laser pulsatoriu ce produce o fiziune punctuală a stratului izolator ce se recrystalizează instantaneu și determină apariția unor tensionări locale. Alte metode ce prezintă rezultate similare constă în utilizarea unui fascicul de electroni sau a tratamentelor mecanice.

5 Caracteristicile tolelor comerciale.

Caracteristicile magnetice pentru tole cu grăunți orientați sunt măsurate pe o direcție paralelă cu axa de laminare, pentru o inducție magnetică sinusiudală la frecvență industrială (50 Hz) și amplitudine de 1,7 T.

Pentru măsurători cu un cadru Epstein tolele după debitare sunt recoapte pentru $1 \div 2$ ore la 800 °C în atmosferă de argon și răcite foarte lent. În cazul utilizării unui tester unitolă acest tratament nu este neapărat necesar astfel încât caracterizarea tolelor tratate special prin tensionare locală se poate realiza numai cu acest aparat.

Tabelul 2: Caracteristicile tolelor Fe-Si GO.

	Grosime nominală [mm]	Pierderi specifice la 1,7 T, 50 Hz [W/kg]	Putere aparentă specifică [VA/kg]	Inducția magnetică la 800 A/m [T]
Tole clasice	0,35	1,50	3,0	1,75
	0,30	1,25	2,7	1,84
	0,23	1,07	2,6	1,84
Tole de înaltă permeabilitate	0,30	1,05	1,4	1,92
	0,27	1,03	1,4	1,92
	0,23 (tensionate)	0,85	1,4	1,90

Tolele foarte subțiri de grosime 0,23 mm au pierderile specifice foarte reduse, dar utilizarea industrială a tolelor de mare permeabilitate tensionate este limitată. Tolele cu grăunți orientați clasice de grosime $0,27 \div 0,3$ mm sunt cele mai utilizate. Curba de primă magnetizare a acestor materiale este prezentată în figura de mai jos.

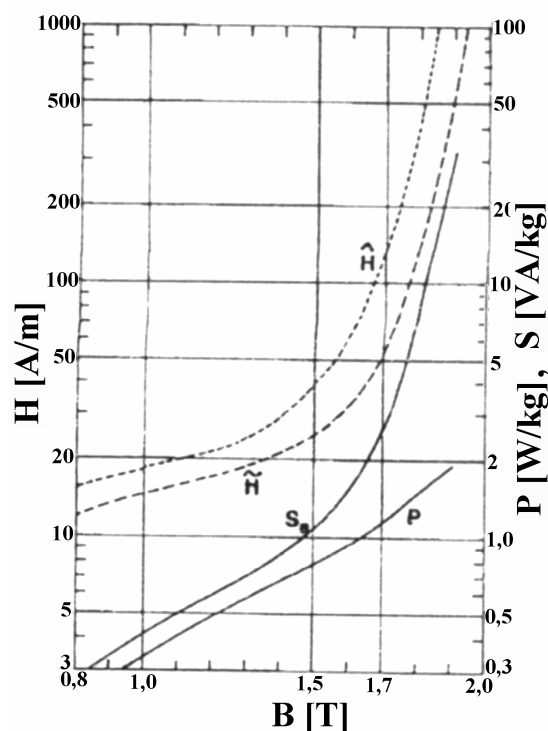


Fig. 4: Proprietățile magnetice ale unei tole 130 – 27 – S, de grosime 0,27 mm, la 50 Hz [1].

Se utilizează tole GO pe direcția de laminare, deoarece abaterile de la direcția de ușoară magnetizare conduc la scăderea permeabilității magnetice și la creșterea pierderilor de energie. Caracteristicile prezentate în figura 5 sunt obținute plecând de la benzi Epstein decupate în două categorii de tole de grosime 0,35 mm cu diferite texturi. Se remarcă că tolele cu cea mai bună textură sunt foarte performante dacă sunt utilizate pe direcția de laminare și mediocre dacă sunt utilizate pe direcția transversală.

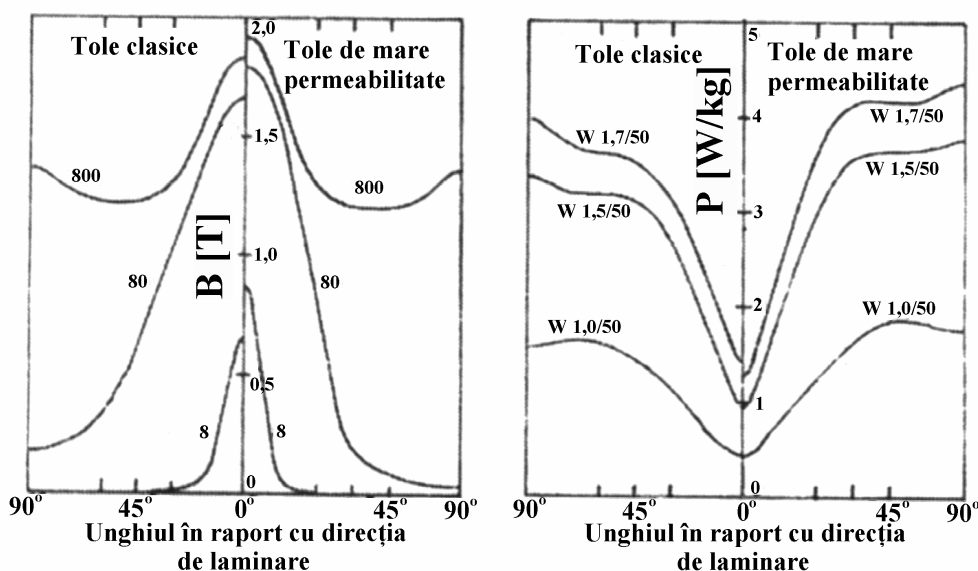


Fig. 5: Inducția magnetică obținută pentru 3 valori ale câmpului de excitație și pierderile la 50 Hz pentru 3 valori ale inducției măsurate cu un cadru Epstein cu benzi de diferite orientări și din două tipuri de tole [6].

6 Concluzii

Studiile efectuate pe structura Goss vizează obținerea unei structuri ideale constuită din domenii lungi cu pereți 180° paraleli cu direcția de laminare. Problema reducerii pierderilor de energie magnetică se confundă în cazul tolelor GO cu problema optimizării texturii magnetice. Reducerea pierderilor dinamice și a pierderilor prin histerezis depășește problema eliminării obstacolelor de natură frânantă cum ar fi deplasarea pereților de domenii magnetice precum și modificarea dimensiunilor domeniilor magnetice. După eliminarea impurităților și a tensiunilor interne fixarea pereților de domenii magnetice se bazează pe efecte de natură magnetostatică.

Metalurgiștii fac eforturi susținute pentru a ameliora orientarea grăunților. Experiența arată că apare o slabă dezorientare a axei de ușoară magnetizare în planul tolei. În cazul în care unghiul de dezorientare nu depășește 2° , reducerea energiei magnetostatice se realizează prin micșorarea lărgimii domeniilor 180° evitându-se apariția domeniilor în formă de lance. S-a constatat că nu este însă suficient să se obțină grăunți prea mari, cea mai avantajoasă structură este cea cu grăunți de dimensiune 0,5 mm, dar reducerea pierderilor prin histerezis este însă compensată de creșterea pierderilor dinamice rezultate prin mărirea dimensiunii grăunților.

Referințe:

- [1] P. Brissonneau, *Magnetisme et matériaux magnetiques pour l'électrotechnique*, Editura Hermes, Paris, 1997.
- [2] R-M. Bozorth, *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand CY Ed., 1951.
- [3] LJ Dijkstra, *Non ferromagnetic precipitate in a ferromagnetic matrix*, Chap. X, Magnetisme and Metallurgy, Academic Press, NY, 1969.
- [4] N. Takahashi, *Production of very low core loss G.O. silicon Steel*, IEEE Trans. Mag., MAG-22, Nr. 5, 1986, p. 490.
- [5] T. Nozawa, *Studies of domain refining of G.O. silicon steel*, SMM7 Conf. Proceedings, Wolfson Centre for Magnetic Technology Cardiff, Sept. 1985, p. 131.
- [6] S. Taguchi, T. Yamamoto, A. Sakakura, IEEE Trans. Mag., MAG-10, 1974, p. 123