

Proiect nr. 32/2012

**Mașini electrice de eficiență sporită,
prin utilizarea unor soluții tehnice avansate,
bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice
ale tolelor**

**(Electrical Machines with Increased Efficiency, by Using
Advanced Technical Solutions Based on the
Predetermination of the Magnetic Properties of Sheets)**

Acronim: MEF-MAG

Raport de sinteză

**Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor
electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe
baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial**

Termen: 15 decembrie 2012

**Director de proiect : Prof. dr.ing. Horia GAVRILĂ,
Universitatea Politehnica din București**

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.1

Compararea rezultatelor experimentale obținute pe mașini construite, cu recomandările standardelor internaționale

Au participat la realizarea activității echipele partenerilor:

P2: S.C. Electroprecizia Electrical Motors S.R.L.

P3: Universitatea “Transilvania” din Brașov

Raportul detaliat întocmit conține 271 pagini și este structurat în următoarele capitole:

I) Introducere

În introducere se face o trecere în revistă a prevederilor **standardului european IEC 60034-30** care redefinește clasele de randament pentru motoarele asincrone trifazate cu rotor de tip colivie. Se prezintă tabelar valorile nominale ale randamentului pentru categoriile de motoare IE2 și IE3.

Se precizează că motoarele de clasă IE3, de puteri mai mari de 7.5 kW, vor deveni obligatorii de la 1 ianuarie 2015, iar motoarele de clasă IE3, de puteri mai mici de 7.5 kW vor fi obligatorii de la 1 ianuarie 2017.

II) Randamentul și pierderile motoarelor asincrone cu rotor de tip colivie

În cadrul acestui capitol se prezintă categoriile de pierderi care apar în mașinile electrice precum și metodele de determinare a acestora.

Pierderile în mașinile electrice asincrone determină direct randamentul și încălzirea acestora și tocmai din acest motiv trebuie avute în vedere încă din faza de proiectare, având implicații directe în raportul calitate/preț pentru fiecare tip de mașină electrică.

Tipurile de pierderi ce apar sunt :

I) pierderi electromagnetice în conductoarele înfășurărilor P_{Cu} și în oțel P_{Fe}

II) pierderi mecanice produse prin ventilație și frecare în lagăre $P_m = P_v + P_{fr}$.

Pierderile totale în mașină sunt:

$$\Sigma P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{v+fr} + P_{supl}$$

Dacă se mărește sarcina, adică cuplul static la arborele motorului, suma pierderilor ($P_{Fe} + P_m + P_{supl}$) se micșorează în oarecare măsură, deoarece se reduce fluxul magnetic rezultat util și de asemenea se micșorează turația. Dar micșorarea pierderilor respective nu depășește de obicei 4 -8 %, de aceea aceste pierderi se consideră ca pierderi constante.

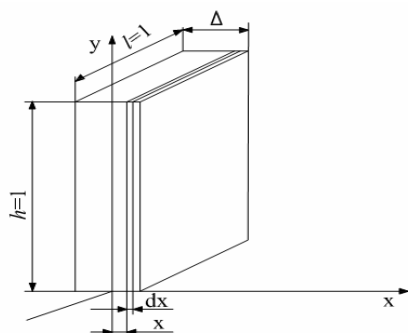
Pierderile în cupru, spre deosebire de pierderile în oțel (fier) variază mult cu sarcina și anume variază proporțional cu pătratul curentului.

Pierderile în fier (oțel) sunt determinate de variația câmpului magnetic în miezul feromagnetic al mașinii. Pentru o magnetizare variabilă în timp se dezvoltă pierderi, ca urmare a fenomenului de histerezis magnetic și a curenților turbionari induși. Pentru reducerea pierderilor ce apar datorită ciclului de histerezis magnetic tolele mașinii se execută din oțel electrotehnic aliat cu siliciu, iar în cazul reducerii pierderilor prin curenți turbionari se realizează izolarea tolelor.

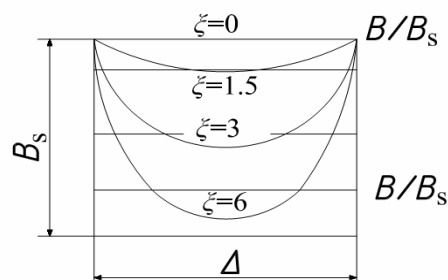
Sunt examinate următoarele categorii de pierderi:

a) Pierderile principale în oțel:

- pierderile prin histerezis;
- pierderile prin curenți turbionari.



a - dimensiunile care intervin în calcul



b - curba de distribuție a inducției magnetice în grosimea tolei

Element de toală de oțel în câmpul magnetic

b) Pierderile în oțelul dinților;

c) Pierderi în oțelul jugului;

d) Pierderile suplimentare la funcționarea în gol: pierderile suplimentare de suprafață produse de armonicile de crestare ale inducției magnetice; pierderile de pulsație în dinți.

e) Pierderile suplimentare în oțel la funcționarea în sarcină: pierderi de suprafață produse de armonicile de zonă ale tensiunii magnetice; pierderi de suprafață în rotor produse de armonicile de dentură ale tensiunii magnetice a statorului; pierderile de pulsație în dinții statorului produse de armonicile de dentură ale rotorului.

În final se specifică relația de calcul a randamentului motorului.

III) Prezentarea motoarelor aflate în fabricație la ELECTROPRECIZIA-ELECTRICAL MOTORS și compararea rezultatelor experimentale obținute pe mașini construite cu recomandările standardelor internaționale

Sunt prezentate următoarele 30 de motoare:

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. MAL 80, 0.75 kW-3000 rot/min | 16. MAL 100, 3 kW-1500 rot/min |
| 2. MAL 80, 1.1 kW-3000 rot/min | 17. MAL 112, 4 kW-1500 rot/min |
| 3. MAL 90S, 1.5 kW-3000 rot/min | 18. MAL 132S, 5.5 kW-1500 rot/min |
| 4. MAL 90L, 2.2 kW-3000 rot/min | 19. MAL 132M, 7.5 kW-1500 rot/min |
| 5. MAL 100, 3 kW-3000 rot/min | 20. MAL 160M, 11 kW-1500 rot/min |
| 6. MAL 112, 4 kW-3000 rot/min | 21. MAL 160L, 15kW-1500 rot/min |

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 7. MAL 132S, 5.5 kW-3000 rot/min | 22. MAL 90S, 0.75 kW-1000 rot/min |
| 8. MAL 132S, 7.5 kW-3000 rot/min | 23. MAL 90L, 1.1 kW-1000 rot/min |
| 9. MAL 160M, 11 kW-3000 rot/min | 24. MAL 100, 1.5 kW-1000 rot/min |
| 10. MAL 160M, 15kW-3000 rot/min | 25. MAL 112, 2.2 kW-1000 rot/min |
| 11. MAL 18.5 kW-3000 rot/min | 26. MAL 132S, 3 kW-1000 rot/min |
| 12. MAL 80, 0.75 kW-1500 rot/min | 27. MAL 132M, 4 kW-1000 rot/min |
| 13. MAL 90S, 1.1 kW-1500 rot/min | 28. MAL 132M, 5.5 kW-1000 rot/min |
| 14. MAL 90L, 1.5 kW-1500 rot/min | 29. MAL 160M, 7.5 kW-1000 rot/min |
| 15. MAL 100, 2.2 kW-1500 rot/min | 30. MAL 160L, 11 kW-1000 rot/min |

Pentru fiecare dintre cele 30 de motoare se prezintă:

- I) Buletinele de încercare (incluzând valoarea randamentului obținut) precum și măsurile necesare a fi luate pentru ca motoarele să se încadreze în categoria de randament IE3.
- II) Rezultatele calculului de reproiectare pentru încadrarea în clasa de eficiență randament premium, IE3

IV) Concluzii

Din analiza făcută în cadrul activității se desprind următoarele concluzii:

- I) Pierderile determină randamentul și încălzirea mașinii asincrone și reducerea lor va duce la mărirea randamentului și încadrarea în clasa de izolație F, folosită la toate motoarele studiate.
- II) Pentru încadrarea motoarelor în clasa IE3, randament premium, se va acționa pentru reducerea pierderilor în fier. Astfel, în locul tablei M800-65 se va folosi tablă M400-65. Tabla M800-65 are pierderile specifice totale maxime la 50 Hz și 1.5 T de 8 W/kg, iar tabla M400-65 are aceste pierderi de 4 W/kg, în aceleași condiții. Se vor executa toate motoarele IE2 din tablă de M400 și se va analiza valoarea randamentului obținut.
- III) Motoarele care sunt în clasa IE2 fără toleranță vor intra în clasa IE3 cu toleranță. Aceste motoare sunt: 1.1 kW-3000 rot/min, 1.5 kW-3000 rot/min; 2.2 kW-3000 rot/min; 3 kW-3000 rot/min; 4 kW-3000 rot/min; 4 kW-1500 rot/min.
- IV) Motoarele care sunt în clasa IE2 cu toleranță se vor apropia de clasa IE3, dar unele dintre ele vor necesita și o reproiectare pe o lungime de fier mai mare, alături de execuția din tablă M400. Aceste motoare sunt: 0.75kW-3000 rot/min, 5.5 kW-3000 rot/min; 7.5 kW-3000 rot/min; 11 kW-3000 rot/min, 15 kW-3000 rot/min; 0.75 kW-1500 rot/min; 1.1 kW-1500 rot/ min; 1.5 kW-1500 rot/min; 2.2 kW-1500 rot/min; 3 kW-1500 rot/min; 5.5 kW-1500 rot/min; 7.5 kW-1500 rot/min; 11 kW-1500 rot/min.
- V) Motoarele care nu sunt în toleranța lui IE2 vor necesita reproiectarea pe o lungime de fier mai mare și execuție din tablă de M400. Aceste motoare sunt: 18.5 kW-3000 rot/min; 15 kW-1500 rot/min; 0.75 kW-1000 rot/min; 5.5 kW-1000 rot/min; 11 kW-1000 rot/min.

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapă I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.2

Modele de structură și proprietăți magnetice ale tolelor cu grăunți neorientați, inclusiv a celor tensionate local. Analiza proceselor tehnologice aplicate tolelor care induc tensiuni mecanice locale

Au participat la realizarea activității echipele partenerilor:

CO; Universitatea Politehnica din București

P1: INCD Inginerie Electrică - Cercetări Avansate, ICPE-CA

P3: Universitatea "Transilvania" din Brașov

I.2.1 Modele de structură și proprietăți magnetice ale tolelor cu grăunți neorientați, inclusiv a celor tensionate local

În cazul materialelor magnetice cristaline anizotropia cea mai pronunțată este de cea de tip magnetocristalin. Aceasta este o proprietate importantă a materialelor feromagnetice și reprezintă dependența entalpiei libere de unghiul dintre direcția de magnetizare spontană și anumite axe (direcțiile de ușoară magnetizare). În tolele FeSi NO pe lângă anizotropia magnetocristalină se întâlnește și o anizotropie magnetoelastică, datorată magnetostricțiunii ce apare în timpul funcționării dispozitivelor, construite din acest tip de material.

În multe cazuri caracterizarea tolelor FeSi NO este limitată la direcția de laminare, dar modelarea acestor materiale necesită cunoașterea ciclului de histerezis și a proprietăților magnetice și pe alte direcții. Măsurătorile standard furnizează o medie a caracteristicilor magnetice, măsurate atât pe direcția de laminare (RD) cât și pe o direcție perpendiculară pe aceasta (TD). Tolele FeSi NO prezintă o structură a grăunților cristalini slab anizotropă, având direcția de ușoară magnetizare paralelă cu direcția de laminare și direcția de magnetizare dificilă perpendiculară pe direcția de laminare.

În scopul evidențierii anizotropiei magnetocristaline s-a ales un lot de patru tole FeSi NO M400-65A, tăiate la 0° , 30° , 60° , 90° față de axa de ușoară magnetizare. Măsurătorile au fost realizate cu un tester unitolă de uz industrial, la o inducție magnetică $B = 1,5$ T, valoare întâlnită curent în funcționarea mașinilor electrice. S-a optat pentru frecvența industrială $f = 50$ Hz și pentru alte două valori 5 Hz și 100 Hz. În Fig. 2.1.1 s-au reprezentat diagramele polare ale intensității câmpului magnetic H în funcție de unghiul de tăiere ϕ la inducție magnetică B constantă, pentru frecvențele de 5 Hz și 50 Hz. Se observă că axa de ușoară magnetizare rămâne situată la 0° cu direcția de laminare la frecvențe diferite, iar axa dificilă își conservă direcția la 90° , modificându-se numai valorile intensității câmpului magnetic H .

În Fig. 2.1.2 sunt reprezentate diagramele polare măsurate la frecvența de 50 Hz și de 100 Hz, la inducții diferite. Se observă că la frecvențele de 50 Hz și 100 Hz cele două diagrame au o alură asemănătoare la inducția magnetică $B = 1,5$ T. Deși este un dispozitiv industrial, testerul unitolă permite determinarea cu precizie a poziției axelor de ușoară și de dificilă magnetizare cu nivelul inducției magnetice.

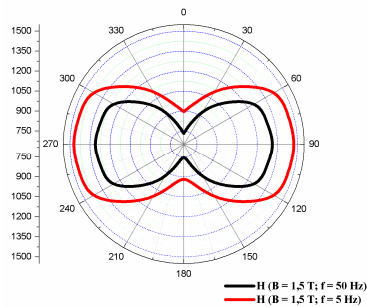


Fig. 2.1.1. Comparație între diagramele polare la inducția magnetică de $B = 1,5$ T pentru frecvențele de 5 Hz și 50 Hz.

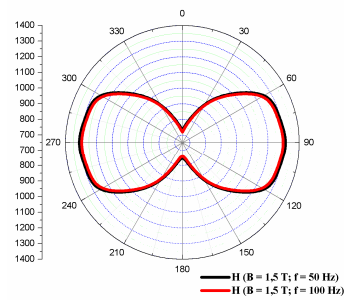


Fig. 2.1.2. Comparație între diagramele polare la inducția magnetică de $B = 1,5$ T pentru frecvențele de 50 Hz și 100 Hz.

Tratamentele metalurgice succesive la care sunt supuse tolele FeSi NO și prezența impurităților conduc la o orientare preferențială a grăunților, iar o consecință directă a acestui fapt este o anizotropie a pierderilor de energie de până la 20%. A fost analizată și evoluția pierderilor de energie cu frecvența, în funcție de unghiul de tăiere a eșantionului în raport cu direcția de laminare. Se cunoaște că pierderile prin histerezis sunt generate de punctele de instabilitate din material și pot fi analizate prin intermediul mecanismelor de coercitivitate. Pierderile clasice de energie sunt datorate curenților turbionari, materialul fiind de obicei considerat un mediu omogen. Dar o consecință directă a existenței domeniilor magnetice este pierderea de energie anomală, foarte dificil de determinat.

În Fig. 2.1.3 se prezintă variația pierderilor de energie totale cu frecvența. Se constată că cele mai scăzute valori ale pierderilor se obțin pentru tola tăiată la 0° , iar cele mai ridicate pentru tola tăiată la 90° . În cazul pierderilor în exces și al celor prin histerezis (Fig. 2.1.4), comportamentul anizotrop al tolelor FeSi NO se păstrează.

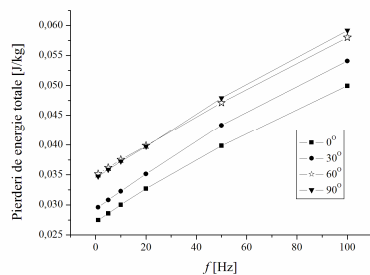


Fig. 2.1.3. Pierderile specifice de energie totale în cazul tolelor FeSi NO, tăiate la diferite unghiuri în raport cu direcția de laminare la $J_p = 1$ T.

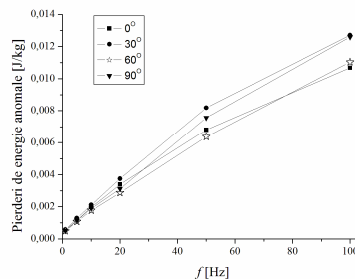


Fig. 2.1.4. Pierderile specifice de energie în exces în cazul tolelor FeSi NO, tăiate la diferite unghiuri în raport cu direcția de laminare la $J_p = 1$ T.

Modelul statistic de estimare a pierderilor de energie se bazează pe teoria statistică a pierderilor și poate fi aplicat într-o formă simplificată pentru predicția pierderilor de energie în tole FeSi NO, în cazul unei inducții magnetice sinusoidale. Se impune ca frecvența de lucru să fie suficient de mică pentru a asigura pătrunderea uniformă a fluxului magnetic în material.

Pentru a aplica acest model în cazul tolelor din oțel electrotehnic neorientat s-au făcut măsurători în cazul a două eșantioane FeSi NO M800-65A, tăiate paralel cu direcția de laminare și perpendicular pe aceasta, pentru două valori ale polarizației magnetice de vârf J_p de 0,5 T și 1 T, variind frecvența între 5 Hz și 200 Hz.

Dacă \tilde{n}_0 este numărul limită de obiecte magnetice active simultan când frecvența de măsură f tinde la 0, în cazul unui câmp aplicat de valoare V_0 , se pot calcula pierderile de energie în exces:

$$W_{\text{exc}} = 2J_p (\sqrt{4V_0 H_w + (\tilde{n}_0 V_0)^2} - \tilde{n}_0 V_0), \quad (1)$$

iar apoi pierderile de energie totale (H_w – intensitatea câmpului magnetic în exces obținută în cazul în care întregul flux magnetic ar fi concentrat într-un singur perete 180°).

Modelul statistic de estimare a pierderilor de energie reprezintă o metodă foarte bună pentru precizarea pierderilor de energie în exces în tolele FeSi NO.

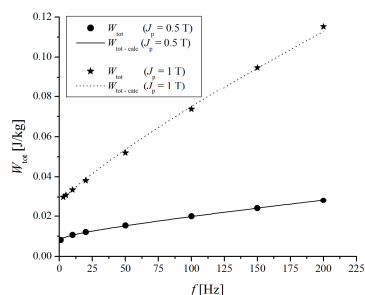


Fig. 2.1.5. Pierderile de energie totale măsurate și estimate cu modelul statistic, în cazul tolei tăiate paralel cu direcția de laminare.

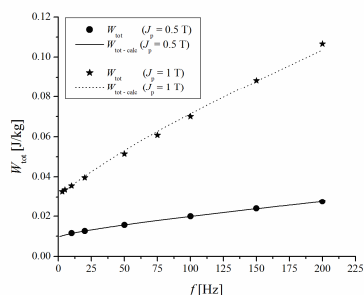


Fig. 2.1.6. Pierderile de energie totale măsurate și estimate cu modelul statistic, în cazul tolei tăiate perpendicular pe direcția de laminare.

I.2.2. Analiza proceselor tehnologice aplicate tolelor care induc tensiuni mecanice locale (ștanță, jet apa, fir și laser)

a. Ștanțarea

Procesul de ștanțare generează tensiuni interne și poate afecta valoarea pierderilor de energie în materialele prelucrate “fully process”. La mașinile de mare putere apare un efect mult mai puternic asupra pierderilor magnetice, datorită asamblării și stivuirii tolelor sub formă de miez magnetic. Prin deformare plastică, datorată ștanțării rezultă o creștere a durității mecanice a aliajului. Această creștere este cauzată de dislocările în structura cristalină a materialului. Toate materialele care nu au o temperatură de topire foarte mare pot fi supuse procesului de ștanțare. În industrie, pentru realizarea tolelor pentru miezurile magnetice, se folosesc o serie întreagă de operații de ștanțare: retezarea, decuparea, șlițuirea și perforarea.

Tabla electrotehnică și în special cea texturată își schimbă caracteristicile magnetice ca urmare a proceselor tehnologice de tăiere sau ștanțare. Prin deformare plastică la rece metalul devine mai dur, fenomen ce se numește ecruisare (durificare prin deformare). Pe toată zona de tăiere materialul este puternic ecruisat. Capacitatea de ecruisare se apreciază după coeficientul de ecruisare, care reprezintă panta curbei reale tensiune – deformație. Aceasta se mai numește modul de plasticitate și este influențat și de tipul de rețea cristalină. Deformarea plastică a unui agregat policristalin este influențată de limitele dintre grăunți. În acest sens are o mare importanță temperatura la care se realizează deformarea. La deformări produse la temperaturi normale (*la rece*), limitele dintre grăunți măresc coeficientul de ecruisare și limita de curgere. Faptul că materialele policristaline au coeficientul de ecruisare mai mare decât monocristalele arată că limitele dintre grăunți constituie obstacole în calea dislocațiilor, care nu pot trece dintr-un grăunte în altul. Chiar în cazul unor măsurători magnetice de o foarte bună calitate și bine localizate, nu se dețin informații semnificative cu privire la efectul ștanțării asupra proprietăților magnetice ale tolelor FeSi cu grăunți neorientați.

Tăierea mecanică determină și modificarea formei eșantionului. O recoacere de detensionare, aplicată după debitare, ajută la recuperarea proprietăților magnetice, dar nu rezolvă problema modificării profilului. Distorsiunile de formă a eșantionului depind de

calitatea instrumentelor de tăiere și de distanța dintre cuțit și matriță. Cea mai dificilă problemă practică o constituie existența bavurilor. O bavură ascuțită poate deteriora stratul izolator al tolei. Dacă bavura penetrează izolația tolei, pierderile prin curenți turbionari cresc considerabil, datorită creării unui circuit electric între tolele vecine, cu izolația strapunsă, ceea ce duce la o încălzire excesivă a miezului magnetic, lucru negativ în funcționarea mașinilor.

b. Debitarea laser

Tăierea cu laser se caracterizează printr-o viteză de debitare relativ mare. Atunci când setările dispozitivului sunt adecvate, se obține o calitate bună a marginii tăiate. Totuși, această metodă induce tensiuni reziduale termice la marginea tăiată, ceea ce este cu siguranță un dezavantaj considerabil. Un alt dezavantaj al tăierii cu laser este costul ridicat al procedurii. Metoda este aplicabilă în cazul producției de serie mică și a prototipurilor. Tăierea cu laser a materialelor metalice necesită intensități ale fasciculului laser, mai mari de 10^6 W/cm^2 , care se realizează prin focalizarea razei laser cu ajutorul unor sisteme de oglinzi și de lentile.

Laserul cu dioxid de carbon este cel care poate fi folosit la tăierea tablelor. Studiul procesului de debitare prin tăiere cu laser trebuie să țină cont de procesele care se produc în material la debitare. Debitarea realizându-se la temperaturi înalte prin topire, vaporizare sau sublimare, trebuie studiate procesele care au loc datorită acestor temperaturi în materialul de prelucrat. La locul tăierii se produce recristalizarea materialului, care poate duce la creșterea pierderilor. Experimentele au testat diverse viteze de tăiere și procedee, concluzia fiind că tăierea cu laser influențează negativ proprietățile magnetice. Tăierea cu laser poate fi astfel o metodă de tăiere, dar nu poate duce la îmbunătățirea eficienței mașinilor electrice, atâta timp cât nu este însoțită de un proces care să elimine partea afectată de tăiere.

c. Tăierea cu fir (electroeroziunea)

În urma aplicării electroeroziunii rezultă un eșantion netensionat mecanic. În ciuda acestui avantaj, procesul este lent, fapt ce îi limitează aplicabilitatea. Principiul electroeroziunii implică topirea și vaporizarea materialului în zona unei descărcări electrice în arc. Pentru a realiza prelucrarea se folosește un electrod care produce descărcări în arc între el și piesa de prelucrat. Prin mișcarea electrodului și controlul timpului de descărcare se poate realiza debitarea unui material metalic. Procesele care se produc modifică și în acest caz structura cristalină în imediata apropiere a locului în care s-a realizat electroeroziunea.

d. Tăierea cu jet de apă

În urma debitării cu jet de apă se constată o bună calitate a tăieturii, dar necesitatea unui echipament special și viteza de tăiere relativ scăzută fac ca această metodă să fie rar folosită în prezent. La o primă vedere, procedeul poate fi folosit cu succes pentru debitarea tablelor pentru circuite magnetice. El nu produce o modificare la nivel microstructural a materialului tăiat. Încălzirea este redusă, datorită jetului de apă. Procesul de tăiere este influențat de calitatea particulelor abrazive (dimensiunile și duritatea acestora) și de viteza jetului de apă (duza și pompa de presiune). Problema care apare aici este oxidarea și eventual corodarea materialului, dacă nu se produc operații de uscare și protejare anticorozivă a suprafeței imediat după tăiere. Încă nu au fost studiate proprietățile magnetice după o tăierea cu jet de apă, motiv pentru care acest procedeu a fost luat în considerare în acest studiu.

Raportul detaliat întocmit conține 22 pagini.

NOTĂ: Partenerii CO și P1 au redactat împreună secțiunea I.2.1 a raportului, iar partenerii CO și P3 au redactat împreună secțiunea I.2.2.

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.3

Măsurări magnetice globale și locale pe specimene de probă

Au participat la realizarea activității echipele partenerilor:

CO; Universitatea Politehnica din București

P1: INCD Inginerie Electrică - Cercetări Avansate, ICPE-CA

P3: Universitatea “Transilvania” din Brașov

I.3.1. Măsurări magnetice globale

Experiența echipelor implicate în proiect a arătat că măsurarea proprietăților magnetice cu Testerul Unitolă (Single Sheet Tester – SST) sunt mai fiabile decât cele realizate cu aparatele Epstein disponibile la parteneri.

Măsurătorile globale au fost realizate în principal la coordonatorul proiectului (CO: Universitatea Politehnica București) și la Partenerul P1 (ICPE-CA), cu concursul partenerului P3 (Universitatea Transilvania Brașov), iar măsurătorile locale Partenerul P1 (ICPE-CA).

A. Măsurători efectuate cu Testerul Unitolă

Măsurătorile s-au realizat cu un Tester Brockhaus Messtechnik, pentru o polarizație magnetică sinusoidală, în conformitate cu regulile DIN 50 462. Testarea la care au fost supuse tolele a constat în variația polarizației magnetice $J = 50, 100, 200, 500, 1000, 1200, 1500$ mT, la frecvențele $f = 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200$ Hz.

S-a optat pentru realizarea separării pierderilor de energie în scopul identificării soluțiilor de reducere a fiecărei dintre componentele acestor pierderi. Acest procedeu reprezintă un sistem avansat de caracterizare a tolelor FeSi NO și constă în determinarea următoarelor componente: pierderile de energie datorate curenților turbionari (W_{cl}); pierderile de energie prin histerezis (W_h); pierderile în exces (W_{exc}) datorate microcurenților turbionari ce apar la deplasarea pereților de domenii. Reprezentările pierderilor în funcție de frecvență s-au realizat pentru următoarele valori ale polarizației magnetice $J = 500, 1000, 1500$ mT.

Măsurătorile s-au făcut pe eșantioane tăiate prin patru procedee diferite – ștanțare, fir (electroeroziune), laser și jet de apă – în vederea identificării procedeeului care ar permite obținerea unor tole care să păstreze cele mai bune proprietăți magnetice în urma prelucrării.

Tabel 1. Dimensiuni și proprietăți eșantioane testate.

Tip Tolă	Direcție tăiere	Densitate [g/cm ³]	Rezistivitate electrică [Ω/m]	Masa [g]	Lungime [mm]	Lățime [mm]	Grosime [mm]	Tip debitare
M400-65A	RD	7,25	$47,7 \cdot 10^{-8}$	45,44	300	30	0,65	Ștanțare
	TD			45,46	299	30		
M800-65A	RD	7,42	$30,8 \cdot 10^{-8}$	44,73	300	30	0,65	
	TD			44,09	300	30		
M400-65A	RD	7,25	$47,7 \cdot 10^{-8}$	43,80	290	30	0,65	Laser
M800-65A	RD	7,42	$30,8 \cdot 10^{-8}$	44,63	300	30	0,65	

M400-65A	RD	7,25	$47,7 \cdot 10^{-8}$	41,94	300	30	0,65	Jet de apă
M800-65A	RD	7,42	$30,8 \cdot 10^{-8}$	44,53	300	30	0,65	
M400-65A	RD	7,25	$47,7 \cdot 10^{-8}$	41,56	300	30	0,65	Electroeroziune
M800-65A	RD	7,42	$30,8 \cdot 10^{-8}$	45,27	300	30	0,65	

Tabel 2. Comparare valori pierderi totale de energie la $J = 1000$ mT în cazul tolei M400-65A RD.

f [Hz]	W_{tot} [J/kg] Șantare	W_{tot} [J/kg] Laser	W_{tot} [J/kg] Jet de apă	W_{tot} [J/kg] Electroeroziune
5	0,0186	0,0228	0,01521	0,0168
10	0,0206	0,0251	0,0169	0,0188
20	0,02465	0,02865	0,0203	0,02215
50	0,03646	0,03908	0,0299	0,03184
100	0,05507	0,05593	0,04422	0,04691
150	0,07259	0,07235	0,05721	0,06109
200	0,08931	0,08838	0,06937	0,0751

Tabel 3. Comparare valori pierderi totale de energie la $J = 1000$ mT în cazul tolei M800-65A RD.

f [Hz]	W_{tot} [J/kg] Șantare	W_{tot} [J/kg] Laser	W_{tot} [J/kg] Jet de apă	W_{tot} [J/kg] Electroeroziune
5	0,0412	0,0412	0,03704	0,03688
10	0,0428	0,0432	0,0396	0,0395
20	0,0477	0,04805	0,04475	0,04475
50	0,06146	0,06224	0,05826	0,0589
100	0,08234	0,08478	0,07822	0,07997
150	0,10105	0,10547	0,09581	0,09871
200	0,11717	0,123	0,11219	0,11738

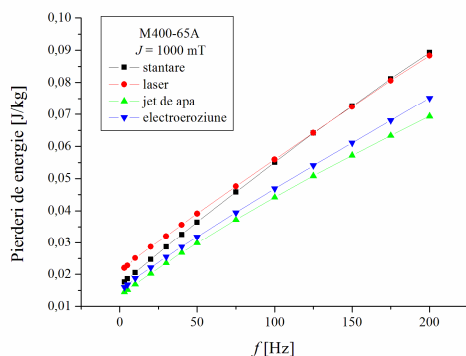


Fig. 3.1. Compararea pierderilor de energie totale obținute pentru o polarizație magnetică $J_s = 1000$ mT în funcție de cele patru procedee de debitare a tolelor M400-65A.

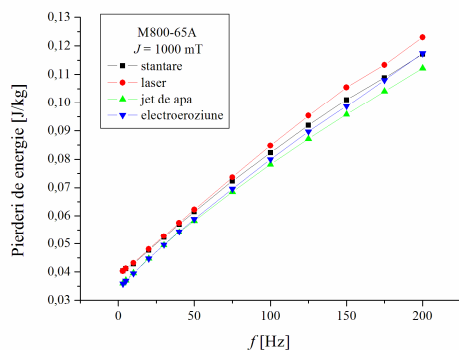


Fig. 3.2. Compararea pierderilor de energie totale obținute pentru o polarizație magnetică $J_s = 1000$ mT în funcție de cele patru procedee de debitare a tolelor M800-65A.

Tabel 4. Comparare valori pierderi totale de energie la $J = 1500$ mT în cazul tolei M400-65A RD.

f [Hz]	W_{tot} [J/kg] Șantare	W_{tot} [J/kg] Laser	W_{tot} [J/kg] Jet de apă	W_{tot} [J/kg] Electroeroziune
5	0,0434	0,05	0,038	0,0406
10	0,0482	0,0544	0,0421	0,0444
20	0,0569	0,062	0,04915	0,05165
50	0,08216	0,08608	0,07064	0,07242
100	0,12105	0,12346	0,10419	0,10419
150	0,15826	0,16024	0,1369	0,13486
200	0,1951	0,19692	0,16939	0,16525

Tabel 5. Comparare valori pierderi totale de energie la $J = 1500$ mT în cazul tolei M800-65A RD.

f [Hz]	W_{tot} [J/kg] Șantare	W_{tot} [J/kg] Laser	W_{tot} [J/kg] Jet de apă	W_{tot} [J/kg] Electroeroziune
5	0,084	0,0822	0,077	0,0754
10	0,0895	0,0875	0,0831	0,0812
20	0,0998	0,0977	0,0943	0,09235
50	0,13064	0,12816	0,12648	0,12422
100	0,17958	0,1762	0,17704	0,17353
150	0,22823	0,22277	0,22687	0,22189
200	0,27758	0,26886	0,27622	0,26974

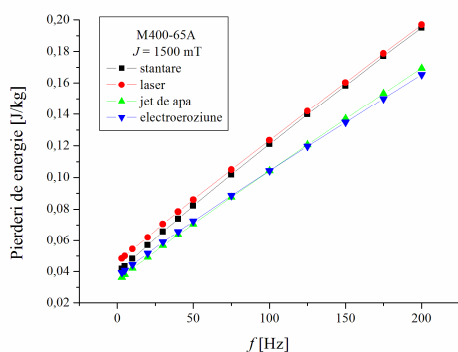


Fig. 3.3. Compararea pierderilor de energie totale obținute pentru o polarizație magnetică $J_s = 1500$ mT în funcție de cele patru procedee de debitare a tolelor M400-65A.

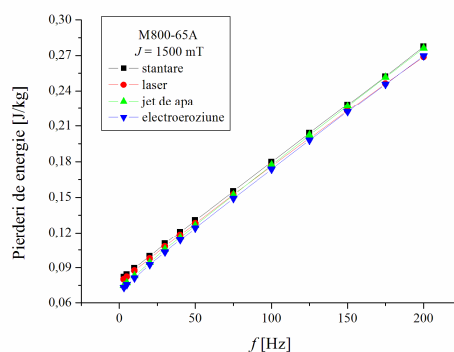


Fig. 3.4. Compararea pierderilor de energie totale obținute pentru o polarizație magnetică $J_s = 1500$ mT în funcție de cele patru procedee de debitare a tolelor M800-65A.

B. Măsurători magnetice globale efectuate cu cadrul Epstein

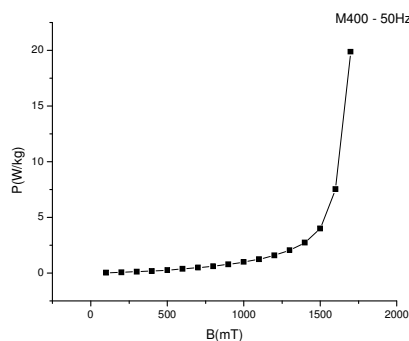


Fig 3.5. Reprezentare grafică pierderi vs. Inducție la 50 Hz

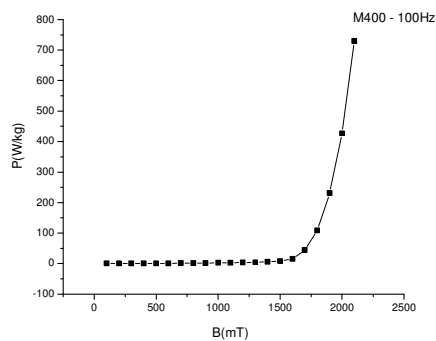


Fig 3.6. Reprezentare grafică pierderi vs. Inducție la 100 Hz

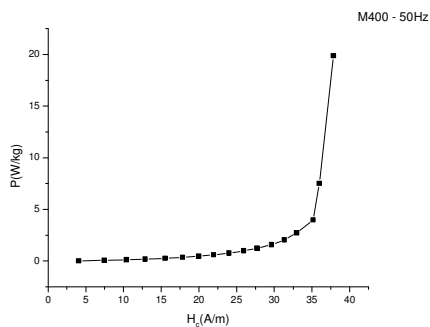


Fig 3.7. Reprezentare grafică pierderi vs. câmp la 50 Hz

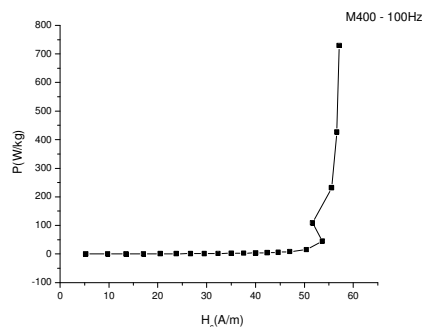


Fig 3.8. Reprezentare grafică pierderi vs. câmp la 100 Hz

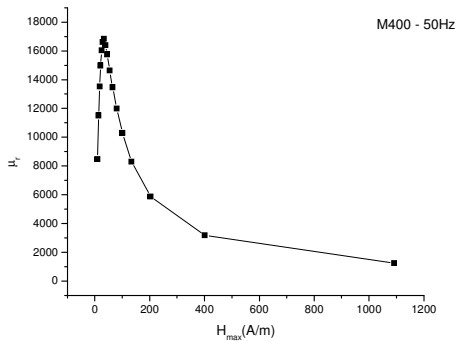


Fig 3.9. Representare grafica permeabilitate vs. câmp la 50 Hz

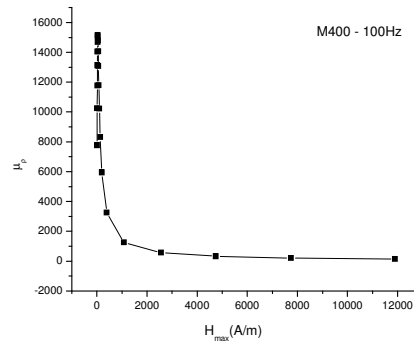


Fig 3.10. Representare grafica permeabilitate vs. câmp la 100 Hz

Măsurarea proprietăților magnetice globale s-a efectuat și în circuit magnetic închis, utilizând un cadru Epstein. Eșantioanele supuse măsurătorilor magnetice globale au fost debitate sub formă de tole cu dimensiunile $30 \times 300 \text{ mm}^2$, dipuse în pachet de 16 bucăți.

C. Comparații și concluzii

Din măsurătorile efectuate rezultă că aliajul M400-65A prezintă pierderi de energie mai reduse decât aliajul M800-65A la toate polarizațiile magnetice investigate. Procedul de debitare cu jet de apă duce la obținerea unor tole electrotehnice cu pierderi de energie mici, deoarece tensionările în zona de tăiere sunt minime, dar el necesită un timp de lucru sensibil mai îndelungat.

Pierderile s-au încadrat în prevederile standardului SREN 10106:2008. Anizotropia tolelor este sub 5%, conformă cu prevederile standardului SREN 10106:2008.

I.3.2. Măsurări magnetice locale

Dacă în cazul caracterizărilor la nivel global există standarde, pentru caracterizarea locală trebuie utilizate tehnici de observare ultramoderne, care însă nu prezintă direct valorile magnetice, fiind numai calitative. Avem în vedere că în etapa viitoare, utilizând aceste tehnici extrem de complexe, să ajungem, prin prelucrare de imagini, la o analiză semicantitativă și la realizarea de dispozitive care să poată efectua măsurători cantitative.

Din cele două sorturi de tablă electrotehnică au fost debitate 16 tole/sort și un număr de 2 ștraifuri cu dimensiunile de $30 \times 300 \text{ mm}^2$ pentru caracterizarea magnetică. În figurile 3.11 – 3.14 se observă dinții rotorici ai toleii pentru un motor de gabarit 280 mm și turație de 1000 de rotații/min debitate prin cele patru procedee tehnologice descrise.

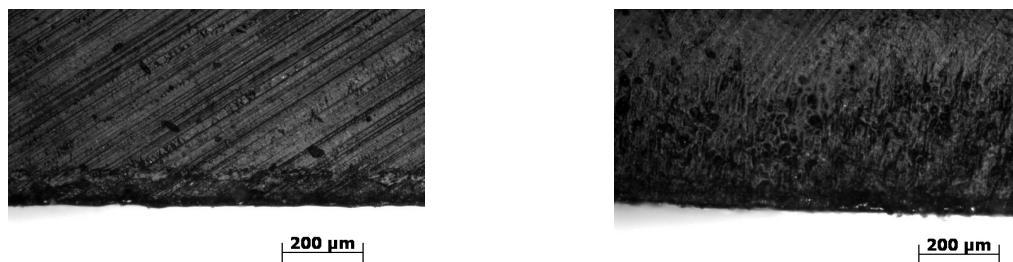


Figura 3.11. Imagini microscopice la marginea dintelui rotorici pentru tolele M400-65A (stânga) și M800-65A (dreapta) debitate prin ștanțare.

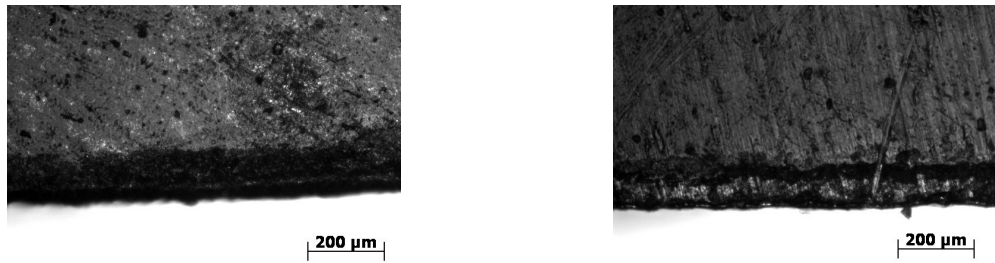


Figura 3.12. Imagini microscopice la marginea dintelui rotoric pentru tolele M400-65A (stânga) și M800-65A (dreapta) debitate prin tăiere laser.



Figura 3.13. Imagini microscopice la marginea dintelui rotoric pentru tolele M400-65A (stânga) și M800-65A (dreapta) debitate cu jet de apă.

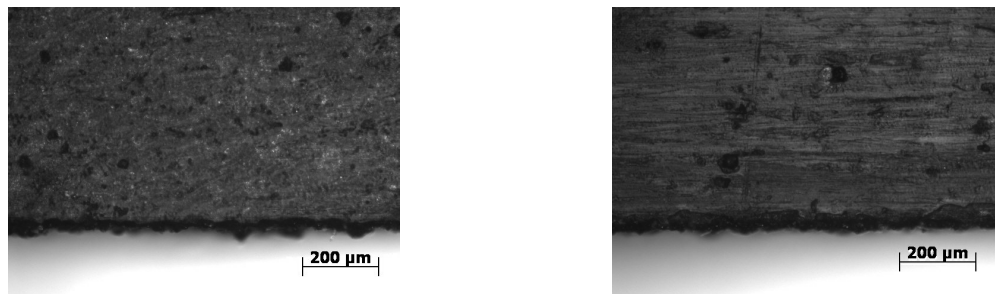


Figura 3.14. Imagini microscopice la marginea dintelui rotoric pentru tolele M400-65A (stânga) și M800-65A (dreapta) debitate prin electroeroziune.

Observarea proprietăților magnetice locale s-a făcut prin microscopie de forță magnetică, utilizând platforma AFM-STM Ntegra Aura. Imaginile de domenii magnetice au fost realizate utilizând vârfuri de SiN cu acoperire de Co (circa 30 nm) magnetizate în prealabil.

În figurile 3.15 și 3.16 sunt prezentate imagini MFM de domenii magnetice pe cele două sorturi. Eșantioanele, de 30 x 30 mm, au fost debitate prin tăiere cu fir. Se observă că domeniile au dimensiuni diferite, fiind mai reduse spre capetele probei. Se observă astfel o rafinare a structurii magnetice către capete.

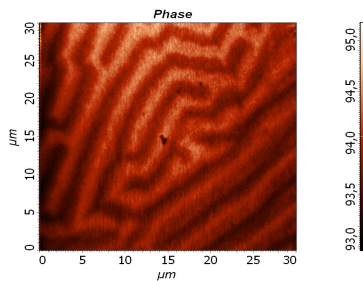


Fig 3.15. Imagine MFM pentru M400-65A.

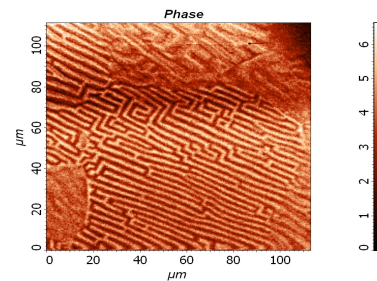


Fig 3.16. Imagine MFM pentru M800-65A.

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.4

Elaborarea de specimene cu diferite geometrii pentru tolele folosite la motoarele electrice de clasă IE3

Activitatea a fost realizată de partenerul P2, S.C. Electroprecizia Electrical Motors S.R.L.

1. În conformitate cu planul de realizare a proiectului au fost executate specimene din două calități de bandă magnetică din oțel cu grăunți neorientați laminate la rece M800-65 și M400-65, conform SR EN 10106. În acest scop s-au comandat de la Erdemir S.R.L. Târgoviște, 600 kg de bandă M800-65 de lățime 242 mm; 100 kg de lățime 300mm; 600 kg de bandă magnetică M400-65 de lățime 242 mm; 100 kg de lățime 300 mm.

2. Pentru realizarea speciemenelor s-a comandat la Electroprecizia-Tools Production S.R.L. Săcele o ștanță, care să execute eșantioane de dimensiunile 30 mm x 300 mm, necesare pentru a le putea folosi, pentru măsurători pe cadrul Epstein. S-a stabilit ca în cadrul acestui proiect să fie realizate 2 motoare, clasa IE3, în gabaritul 160, de turație 1000 rot/min, de puteri 7.5 kW și 11 kW care vor deveni obligatorii de la 1 ianuarie 2015. Tolele actuale, din care se fac aceste motoare, se execută prin ștanțare.

3. Elaborarea speciemenelor: Cu ștanța de gab. 160 s-au ștanțat din benzile magnetice de lățime 242 mm, de M800-65 și M400-65, tole cu geometria actuală. Specimenele 1, 10, 50 și ultimul au fost prelevate după ștanțare și au fost trimise la ICPE-CA București. Cu ștanța pentru cadrul Epstein, din tabla de lățime 300 mm M800-65 și M400-65 s-au executat câte 50 de specimene în lungul laminării, perpendicular pe direcția laminării și la un unghi de 19 grade față de direcția laminării. Din banda de lățime 300 mm, s-au mai executate câte trei specimene de lungime 1200 mm din M800-65 și M400-65. Acestea au fost tăiate (cu foarfeca) pentru a fi studiate și alte procedee de tăiere a tolelor. S-au mai executat prin ștanțare, din tabla M400-65, câte 1500 tole, din gabaritele 80, 90, 100, 112, 132, din care urmează a se alege 10 tole stator și 10 tole rotor.

4. Expedierea tolelor. Toate speciemenele pregătite au fost predate delegației comune UPB – ICPE-CA, care a participat la 5.11.2012, la sediul Electroprecizia S.A. la o ședință comună de lucru. Aceste specimene au fost necesare partenerilor din proiect implicați în activitatea A1.3 privind efectuarea măsurărilor.

Au fost predate: 50 buc eșantioane de 30 mm x 300 mm ștanțate în lungul laminării din tablă M800-65; 50 buc eșantioane de 30 mm x 300 mm ștanțate în lungul laminării din tablă M400-65; 50 buc eșantioane de 30 mm x 300 mm ștanțate perpendicular pe direcția laminării din tablă M800-65; 50 buc eșantioane de 30 mm x 300 mm ștanțate perpendicular pe direcția laminării din tablă M400-65; 50 buc eșantioane de 30 mm x 300 mm ștanțate sub un unghi de 19 grade fata de direcția laminării din tablă M800-65; 50 buc eșantioane de 30mmx300mm ștanțate sub un unghi de 19 grade fata de direcția laminării din tablă M400-65; 3 eșantioane de dimensiuni 300 mm x 1200 mm, din tablă M800-65; 3 eșantioane de dimensiuni 300 mm x 1200 mm, din tablă M400-65; 10 buc. tole de gab.160, turația 1000 rot/min, executate din tablă M800-65; 10 buc. tole de gab.160, turația 1000rot/min, executate din tablă M400-65.

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.5

Studiul efectului prelucrărilor mecanice asupra structurii, compoziției și întinderii zonelor tolelor afectate de prelucrările efectuate

Au participat la realizarea activității echipele partenerilor:

CO; Universitatea Politehnica din București

P1: INCD Inginerie Electrică - Cercetări Avansate, ICPE-CA

I.5.1. Textura metalografică

Oțelurile electrotehnice au fost printre produsele din oțel care beneficiază de cele mai multe optimizări ale texturii pentru îmbunătățirea proprietăților magnetice, însă, cu toate acestea, accentul tehnologiei de prelucrare a fost pus în principal pe controlul granulației. Optimizarea dimensiunii grăunților s-a realizat prin controlul compoziției chimice și prin optimizarea variabilelor de prelucrare în timpul fiecărui pas de prelucrare. În schimb, controlul texturii a beneficiat de mult mai puțină atenție, ceea ce face să existe o posibilitate neexplorată de îmbunătățire a proprietăților magnetice ale tablelor din oțel cu grăunți neorientați (NO) printr-un control corespunzător al texturii. O combinație de analize metalografice și ale texturii cu măsurarea proprietăților magnetice pe probe tratate termic prin procese de recoacere, permit cele mai importante etape de evoluție la nivelul microstructurii și texturii. Textura necesară a tolelor NO poate fi obținută numai prin controlul conținutului de aliere și de microelemente, precum și de dispersia precipitatelor și incluziunilor, care influențează toate procesele de recristalizare și creștere a grăunților.

Proprietățile magnetice ale oțelurilor electrotehnice NO sunt influențate de dimensiunea grăunților și de textura cristalografică. Tehnologiile actuale utilizate pentru a controla dimensiunea grăunților din oțelurile electrotehnice se apropie de limitele lor. Cu toate acestea, există încă metode de îmbunătățire a proprietăților magnetice prin controlul texturii. Folosirea unor tratamente de recoacere reprezintă una dintre etapele de prelucrare cele mai eficiente pentru modificarea texturii.

I.5.2. Efectul tratamentului de recoacere asupra proprietăților magnetice ale oțelului electrotehnic cu grăunți neorientați

Recoacerea este o măsură importantă pentru îmbunătățirea proprietăților magnetice și textura oțelurilor electrotehnice cu grăunți neorientați. Astfel, în benzile laminate la cald se realizează grăunți grosieri și uniformi și se reduce numărul de limitele dintre grăunți. De asemenea, scade cu ușurință numărul de grăunți (111), care nuclează de-a lungul limitelor dintre grăunți, în timp ce grăunții (100) și (110) cresc, îmbunătățindu-se astfel proprietățile magnetice ale oțelului, în special B₅₀₀₀.

Astfel, benzi laminate la cald, de oțel cu grăunți neorientați au fost tratate la 900°C timp de 5 min., în atmosferă de azot. Comparația a fost făcută între probele tratate și cele netratate, după ce acestea au fost laminate la rece și recoapte. Metalografia celor două probe (0,5% Si) este redată în figura 5.1.

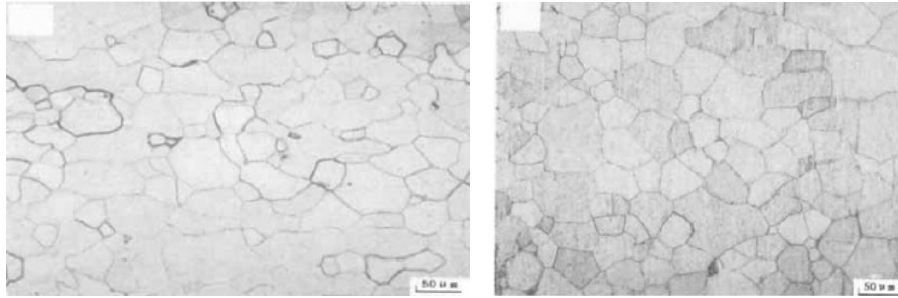


Fig. 5.1. Metalografia (mărire 200 x) a oțelului electrotehnic NO 0.5% Si:
 (a) Proba TT de recoacere; (b) Proba nesupusă TT de recoacere.

I.5.3. Efectul temperaturii de recoacere asupra proprietăților magnetice

Proprietățile magnetice slabe ale tolelor laminare se datorează unor tensiuni interne mari, defectelor de cristal și grăunților alungiți; pentru a înlătura aceste neajunsuri, este necesar un tratament de recoacere în producție. Dimensiunea de grăunțe în proba cu grăunți grosieri este inițial mai mare decât în proba cu grăunți fini. Acest lucru se explică prin faptul că dimensiunea inițială a grăunților recritalizați scade datorită unei creșteri mult mai rapide a ratei de nucleație decât rata de creștere.

Figura 5.2. Efectul temperaturii de recoacere asupra inducției magnetice.

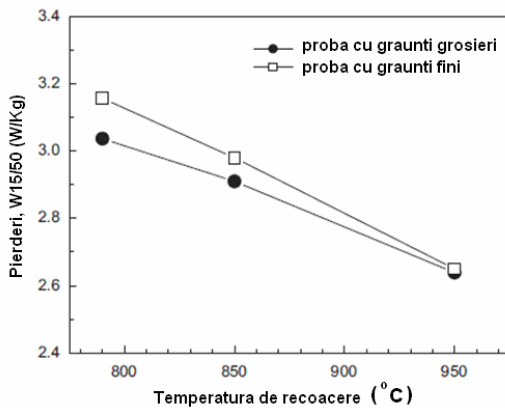
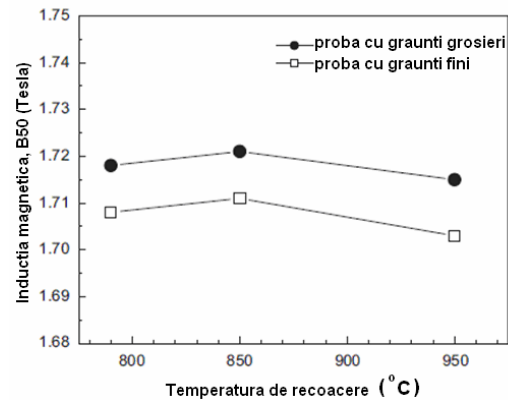


Figura 5.3. Efectul temperaturii de recoacere asupra pierderilor [12]

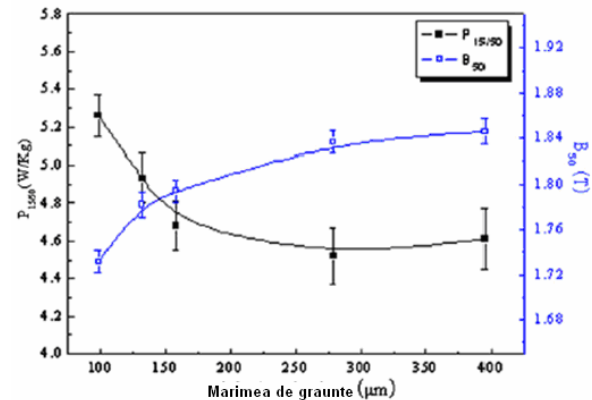


Figura 5.4. Proprietățile magnetice al unei tole cu grăunți neorientați după o recoacere la 950°C.

Cu toate acestea, în cazul tratamentului de recoacere la 950°C, diferențele de mărime de grăunțe sunt neglijabile. Efectul temperaturii asupra inducției magnetice în ambele cazuri este reprezentat în figura 5.2.

Figura 5.3 prezintă efectul temperaturii de recoacere asupra pierderilor în ambele tipuri de specimene (grăunți grosieri și fini). Pierderile scad pe măsura creșterii temperaturii de recoacere, fiind influențate de mărimea grăunților și textură (figura 5.4).

Dimensiunea optimă de grăunțe este în jur de 100-200 μm. În FeSi NO, prezența impurităților este direct legată de pierderile prin histerezis, care constituie aproape 75% din totalul pierderilor. Prin urmare, prezența impurităților are un rol crucial pentru performanțele magnetice (Fig. 5.5).

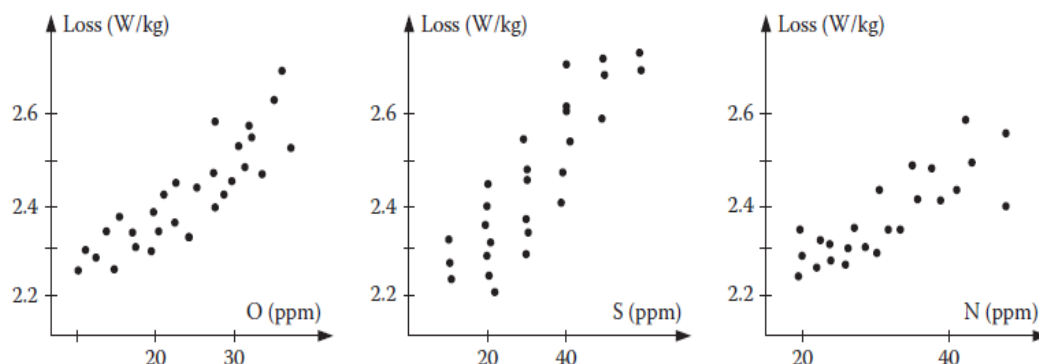


Figura 5.5. Efectul impurităților asupra pierderilor totale.

I.5.4. Concluzii privind efectul prelucrărilor mecanice asupra structurii, compoziției și întinderii zonelor tolelor afectate de prelucrările efectuate

În urma studiului efectului prelucrărilor mecanice asupra structurii, compoziției și întinderii zonelor tolelor afectate de prelucrările efectuate, s-au constatat următoarele:

- prelucrarea mecanică influențează negativ pierderile în oțelurile electrotehnice;
- tăierea la rece (ștanțarea) duce la mărirea pierderilor în materialul magnetic, datorită fenomenului de ecruisare. Pentru procedeele care folosesc tăierea la cald, structura cristalină în apropierea zonei de tăiere este influențată negativ, prin recristalizări forțate;
- pentru eliminarea zonelor afectate poate fi luată în considerare rectificarea, care poate elimina aceste zone folosind abraziunea, procedeu ce afectează în foarte mică măsură proprietățile materialului;
- tăierea cu laser sau cu fir pot constitui procedee alternative de luat în considerare de producători pentru debitarea tablelor electrotehnice;
- procedura folosind jetul hidroabraziv a demonstrat că, deși timpul de tăiere este redus (comparabil cu tăierea cu laser), ea conduce la o oxidare accelerată a tablei și induce tensiuni foarte mari, asociate cu existența bavurilor care au fost observate;
- din analizele de caracterizare compozițională se observă că sorturile de tablă produse de ELDEMIR SRL Târgoviște au în componență o cantitate mai mică de 3% Si. Imaginile BSE pentru cele două sorturi de tablă pun în evidență omogenitatea chimică a acestora.

Proiect nr. 32/2012 : Mașini electrice de eficiență sporită, prin utilizarea unor soluții tehnice avansate, bazate pe predeterminarea proprietăților magnetice ale tolelor (MEF-MAG)

Etapa I: Predeterminarea performanțelor mașinilor electrice din punctul de vedere al pierderilor magnetice pe baza recomandărilor cunoscute pe plan mondial

Activitatea I.6

Corelarea cu procesele de magnetizare: deplasarea pereților Bloch, rotația magnetizației, competiția dintre procesele reversibile și cele ireversibile

Au participat la realizarea activității echipele partenerilor:

CO: Universitatea Politehnica din București

P1: INCD Inginerie Electrică - Cercetări Avansate, ICPE-CA

I.6.1. Influența structurii de domenii magnetice asupra pierderilor de energie

Tolele FeSi cu grăunți neorientați (NO) sunt materiale magnetice moi, cu o textură de grăunți aproximativ izotropă, utilizate în construcția de mașini electrice de medie și înaltă putere, la care circuitele magnetice trebuie proiectate astfel încât să se realizeze un randament de peste 95%, nu doar pentru a economisi energie, ci și pentru a evita supraîncălzirea și reducerea duratei de viață a mașinii. Îmbunătățirea calității tablei electrotehnice se poate realiza prin controlul unui număr de parametri structurali: impurități, starea suprafeței, granulometrie (dimensiunea grăuntelui) și textura cristalografică, tensionări reziduale și aplicate extern. Tolele FeSi sunt realizate în mod corespunzător cu standardele IEC 60404-8-2 și 60404-8-4. Printr-o alegere corespunzătoare a compoziției și a unor tratamente metalurgice și termice adecvate, se pot obține aliaje FeSi NO cu proprietăți magnetice superioare. Trebuie însă luate în considerare și alte proprietăți: stabilitatea termică și structurală, sensibilitatea la tensionări mecanice a parametrilor magnetici, proprietățile mecanice, prelucrabilitatea și conductivitatea termică.

Structura de domenii magnetice a unui material magnetic este rezultatul competiției între diferitele componente ale energiei libere totale a sistemului. Energia de interacție forțează momentele magnetice de spin să se alinieze pe direcția câmpului magnetic aplicat; energia de schimb obligă aceste momente să rămână aliniate paralel; energia de anizotropie favorizează alinierea momentelor magnetice în lungul axelor de ușoară magnetizare, iar energia magnetostatică favorizează configurațiile fără distribuții de poli magnetici liberi. Structura de domenii magnetice este compromisul unui optim energetic, care minimizează suma între diferitele tipuri de energii. În frontiera dintre două domenii vecine (peretele interdomenial), cu o lățime de câteva distanțe atomice, se produce o variație a energiei de schimb, ca urmare a tranziției treptate a momentelor magnetice de la o orientare la alta. Un perete de domenii 180° ocupă în fier 250 de distanțe atomice.

Într-un material ideal domeniile sunt aliniate paralel cu câmpul extern aplicat, iar pereții de domenii magnetice se deplasează lin. În materialele reale însă, așa cum sunt tolele FeSi NO, magnetizațiile domeniilor sunt orientate aleatoriu, iar pereții de domenii sunt fixați de diferite tipuri de neregularități prezente în rețeaua cristalină. Procesul de magnetizare într-un material magnetic moale are loc prin intermediul a două mecanisme: mișcarea pereților de domenii magnetice și rotația magnetizației în interiorul domeniilor. Pentru realizarea proce-

selor de magnetizare prin mecanismul de rotație a magnetizației sunt necesare valori ridicate ale intensității câmpului magnetic, aproximativ 10^3 A/m, astfel încât procesul predominant de magnetizare în aliajele FeSi NO este cel al deplasării pereților de domenii magnetice, rotația vectorului magnetizație aparând doar la valori ale inducției magnetice apropiate de saturație. Într-un material real, cu defecte și impurități, există forțe de fixare care se opun deplasării pereților de domenii magnetice. Pentru deplasarea unui perete de domeniu, fixat într-o impuritate, este necesară creșterea intensității câmpului magnetic aplicat, care se regăsește în valoarea câmpului magnetic coercitiv. Energia necesară procesului de magnetizare a unei tole FeSi NO este consumată și conduce la apariția fenomenului de histerzis magnetic.

În cazul aliajelor FeSi NO de tip M400-65A și M800-65A, s-au determinat pierderile de energie totale (Activitatea I.3), în cazul celor patru procedee de debitare a tolelor (ștanțare, laser, jet de apă, electroeroziune) și a fost realizată separarea acestora pe cele trei componente: W_h , W_{cl} și W_{exc} . S-a optat pentru prezentarea datelor în cazul unei valori a polarizației magnetice de vârf $J = 1500$ mT, valoare furnizată și de producătorii de tablă electrotehnică și frecvență în funcționarea mașinilor electrice. În Fig. 6.1 și 6.2 sunt prezentate pierderile de energie în exces și prin histerzis cu frecvența.

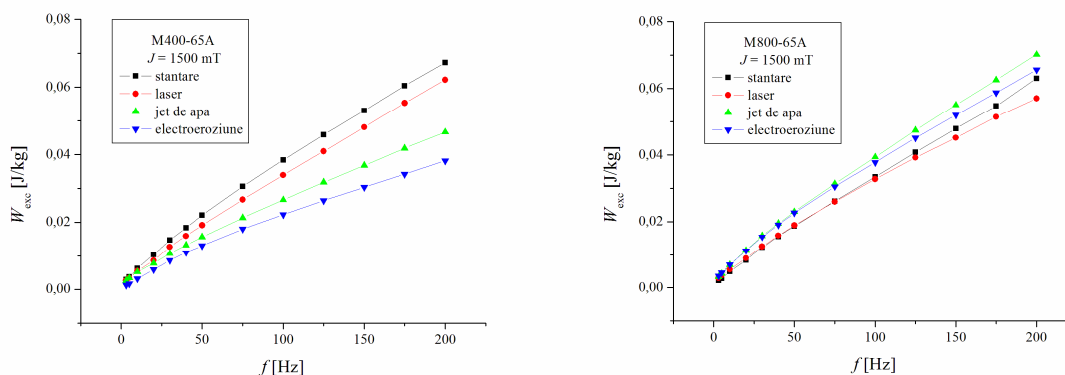


Fig. 6.1. Pierderile de energie în exces în cazul celor patru procedee de tăiere a tolelor la o valoare a polarizației magnetice $J = 1500$ mT pentru tola M400-65A (dreapta), respectiv tola M800-65A (stânga).

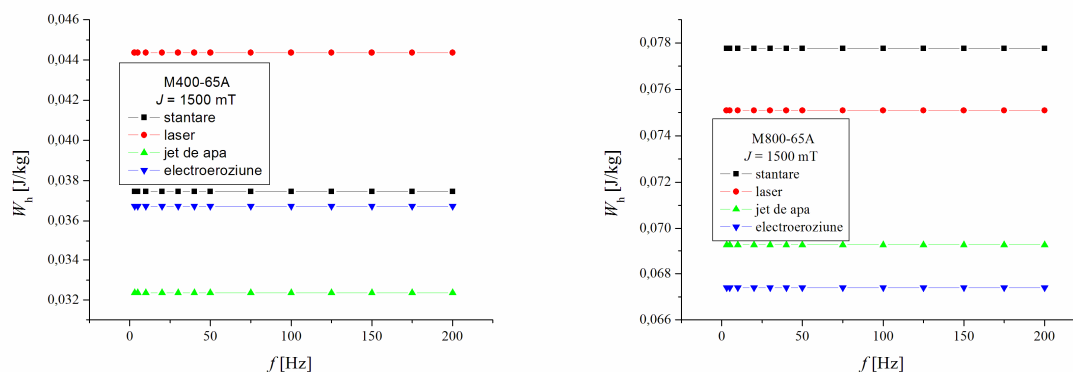


Fig. 6.2. Pierderile de energie prin histerzis în cazul celor patru procedee de tăiere a tolelor la o valoare a polarizației magnetice $J = 1500$ mT pentru tola M400-65A (dreapta), respectiv tola M800-65A (stânga).

O consecință a mișcării pereților de domenii este existența microcurenților turbionari. Pierderile corespunzătoare lor nu depind semnificativ de geometria eșantionului și pot fi reduse prin scăderea vitezei de deplasare a peretelui și prin creșterea rezistivității materialului. În cazul aliajului M400-65A cele mai scăzute pierderi în exces s-au obținut în urma debitării prin electroeroziune, iar la aliajul M800-65A în urma aplicării procesului de tăiere cu laser.

Din cauza deplasării pereților de domenii, chiar și în câmpuri cuasistatice pot să apară curenți turbionari de foarte scurtă durată (10^{-9} s), generând efectul Barkhausen, care sunt la originea pierderilor prin histerezis, W_h și nu depind de frecvență. Pierderile prin histerezis reprezintă componenta cea mai importantă a pierderilor de energie totale în aliajele FeSi NO. În cazul aliajului M400-65A cele mai scăzute pierderi prin histerezis s-au obținut în urma debitării materialului cu jet de apă, iar în cea ce privește aliajul M800-65A cele mai reduse valori s-au obținut în urma aplicării procesului de tăiere prin electroeroziune.

Minimizarea pierderilor de energie se poate obține prin reducerea grosimii de laminare a tolei, a conductivității materialului și prin controlul adecvat al microstructurii, realizat în timpul prelucrării metalurgice printr-o mai bună verificare a diferiților parametri structurali (impurități, dimensiunea grăunților, defecte, textura cristalografică). Pierderile de energie prin macrocurenți turbionari sunt mai reduse în cazul aliajului M400-65A datorită valorilor mai mari ale rezistivității electrice ($\rho_{M400} = 47,7 \times 10^{-8} \Omega/m$), respectiv valorilor mai mici ale densității ($\tau_{M400} = 7,25 \text{ g/m}^3$), comparativ cu cele determinate pentru aliajul M800-65A ($\rho_{M800} = 30,8 \times 10^{-8} \Omega/m$, $\tau_{M800} = 7,42 \text{ g/m}^3$).

Funcționarea mașinilor electrice are loc la frecvența industrială $f = 50$ Hz. În Fig. 6.3 este evidențiată variația pierderilor de energie totale în funcție de polarizația magnetică în cazul tolei M400-65A, pentru cele patru procedee de debitare a tolelor, la această frecvență.

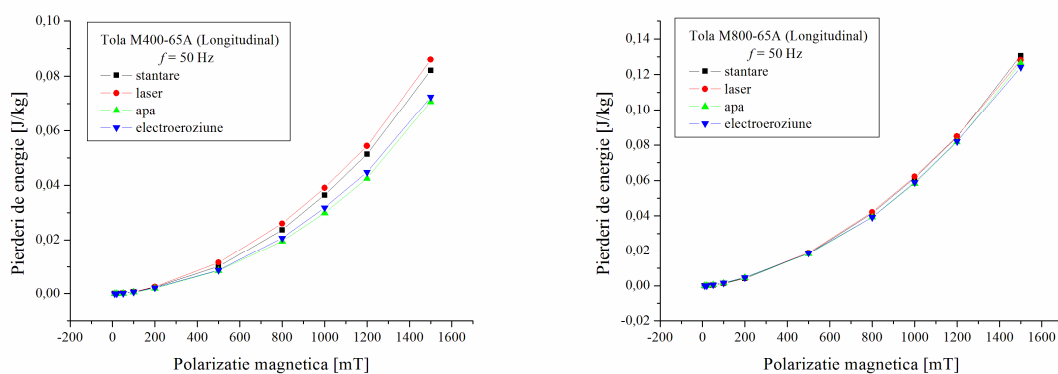


Fig. 6.3. Variația pierderilor de energie totale pentru eșantionul M400-65A (dreapta), respectiv M800-65A (stânga) la frecvența industrială $f = 50$ Hz.

Se observă că influența tehnologiei de tăiere este mai evidentă în cazul aliajului M400-65A, iar debitarea cu jet de apă determină obținerea unor tole cu cele mai reduse pierderi de energie. Dat fiind costul excesiv al metodelor de debitare a eșantioanelor cu laser și jet de apă și timpul îndelungat necesar tăierii prin electroeroziune, pare că procedeul tehnologic de ștanțare a tolelor mașinilor electrice rămâne pentru moment de neînlocuit. De asemenea producătorul de mașini electrice a optat pentru oțelul electrotehnic neorientat M400-65A, care prezintă pierderile de energie cele mai mici la frecvența industrială.

I.6.2. Corelarea cu procesele de magnetizare: deplasarea pereților Bloch, rotația magnetizației, con competiția dintre procesele reversibile și cele ireversibile

Rolul microstructurii magnetice variază semnificativ de la o aplicație a materialelor magnetice la alta. În cazul miezurilor mașinilor electrice, structura de domenii magnetice și pereții de domenii sunt foarte importante. Deplasarea pereților de domenii este cea care asigură valoarea ridicată a permeabilității magnetice. Neregularitățile magnetice microstructu-

rale ale acestor materiale reprezintă originea unor pierderi suplimentare și conduc la apariția zgomotului acustic și electric în aceste dispozitive. Aplicațiile industriale (mașinile electrice, în special) se bazează pe o permeabilitate magnetică de valoare ridicată a acestor materiale, uneori de 10^6 ori mai mari decât permeabilitatea magnetică a vidului. În principiu, rotația vectorului magnetizație poate conduce la valori mari ale permeabilității magnetice, dacă anizotropia au valori redusă, iar distribuția câmpurilor de anizotropie este uniformă. Însă este foarte dificil să se prepare un material astfel încât deplasările pereților de domenii magnetice să fie suprimate până la un punct în care rotația vectorului magnetizație devine importantă.

Deplasările pereților de domenii magnetice sunt mult mai puțin favorizate la frecvență înaltă în comparație cu rotația magnetizației, din cauza pierderilor anormale, datorate micro-curenților turbionari. În domeniul frecvențelor ridicate pierderile prin curenți turbionari devin importante, astfel încât este de preferat utilizarea unei tole de grosime cât mai mică. În cazul în care microstructura materialului poate fi îmbunătățită, în sensul existenței unei structuri de domenii regulate, se poate obține o mai bună performanță a acestor dispozitive.

În construcția mașinilor electrice se folosesc tole FeSi NO, cu cristale cu simetrie cubică. Utilizarea acestui tip de material, cu anizotropie magnetocristalină scăzută, este justificat de faptul că fluxul magnetic în mașina rotativă își modifică în permanență direcția.

Structura de domenii magnetice în FeSi NO este foarte complexă pentru marea majoritate a grăunților cristalini, existând domenii magnetice de închidere a fluxului magnetic la suprafața eșantionului. Reorientarea permanentă a structurilor arborescente de închidere a fluxului se opune deplasării pereților domeniilor magnetice principale și determină apariția pierderilor prin histerezis. În cazul unei observații *in situ* a structurii de domenii magnetice se constată atât deplasarea discontinuă a pereților, distribuiți neregulat, cât și existența punctelor de fixare a pereților. Una din cauzele fixării pereților este reducerea energiei magnetostatice a precipitatelor, în jurul cărora pereții se deplasează pe linii curbe.

O posibilă configurație de domenii magnetice, stabilă din punct de vedere energetic, compatibilă cu aceste domenii lance de închidere a fluxului magnetic și cu punctele de fixare a domeniilor magnetice este structura de quasi-domenii bandă, capabile să transporte fluxul după direcția lor. În acest caz există trei direcții de magnetizare ușoară pentru o valoare dată a vectorului magnetizație, utilizat în teoria fazelor (transformarea $\alpha \rightarrow \gamma$ și transformarea $\gamma \rightarrow \delta$).

Domeniile bandă de închidere cu orientări opuse ale vectorului magnetizație sunt separate de prima bandă prin pereți 180° . În mod uzual în FeSi NO există grade suplimentare de libertate, ce pot conduce la modificări ale structurii de domenii. Unele segmente ale pereților quasi-domeniilor 180° pot fi înlocuite cu pereți 90° . De asemenea magnetizația netă în quasi-domenii nu trebuie să se orienteze după direcția magnetizației globale, dar poate lua direcția anizotropiei locale, indusă prin tensionare, în grăunți și în jurul acestora. Interacțiile magnetostriective dintre componentele quasi-domeniilor pot conduce la quasi-domenii cu două componente în defavoarea celor cu trei componente, fapt ce condiționează o direcție de magnetizare deviată de la direcția magnetizației nete.

Procesul de magnetizare principal în tolele FeSi NO constă în deplasarea pereților 180° , lucru pus în evidență de dependența pierderilor de energie de dimensiunea grăunțului.

În timp ce pierderile prin histerezis scad o dată cu creșterea dimensiunii grăunțului, deoarece structurile de frontiere de grăunte ocupă un volum din ce în ce mai redus, pierderile dinamice cresc cu dimensiunea grăunțului, ceea ce duce la o dimensiune optimă a grăunțului. În mod evident structura tip quasi-domenii se presupune a fi extinsă în grăunții de dimensiune mare, ceea ce justifică creșterea pierderilor anormale.