

EFFECTUL TEHNOLOGIILOR DE DEBITARE A TOLELOR ELECTROTEHNICE ASUPRA PIERDERILOR DE ENERGIE ÎN MAȘINILE ELECTRICE

¹ Horia GAVRILĂ, Veronica PĂLTÂNEA², Gheorghe PĂLTÂNEA²,
Eros PĂTROI³, Ioan PETER⁴,

¹Membru corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România,
²Universitatea „Politehnica“ din București, ³INCDIE-ICPE C.A., București,
⁴ELECTROPRECIZIA Electrical Motors S.R.L., Săcele

Rezumat: Creșterea eficienței motoarelor de curent alternativ, în special prin scăderea pierderilor de energie disipate, reprezintă o necesitate stringentă pe plan internațional, având efecte importante nu numai la utilizatorii finali, dar și asupra emisiilor de hidrocarburi asociate arderii combustibilului primar pentru a produce energie electrică în centrale electrice. Creșterea eficienței motoarelor de curent alternativ poate fi în general făcută prin scăderea pierderilor de energie în miezurile magnetice ale mașinilor electrice. Aliajele FeSi cu grăunți neorientați (NO) sunt materiale magnetice cu o textură de grăunți aproape izotrop distribuită, utilizate în construcția mașinilor electrice de medie și mare putere. Proiectarea circuitelor magnetice în vederea realizării unor mașini electrice cu o eficiență mai mare de 95% este imperios necesară atât în scopul economisirii energiei, dar și pentru evitarea supraîncălzirii dispozitivelor și a reducerii duratei de viață a acestora. În articol sunt testate tole industriale FeSi NO M400-65A, tăiate pe dimensiunile standardizate 280×30 mm². Proprietățile magnetice ale tolelor, în special pierderile specifice de energie, au fost determinate prin metoda testerului unitolă în cazul a trei polarizații magnetice de vârf J_p de 500 mT, 1000 mT și 1500 mT. A fost făcută și o caracterizare în frecvență de la 3 Hz la 200 Hz. Au fost investigate tole tăiate prin diverse procedee: ștanțare mecanică, cu laser, jet de apă și electroeroziune, pentru a pune în evidență procedeele cele mai convenabile din punctul de vedere al influenței lor asupra proprietăților magnetice și al eficienței economice.

Cuvinte cheie: mașini electrice, tole FeSi NO, pierderi de energie.

Abstract. The increasing of the a.c. motors efficiency is a stringent necessity in Europe, with important effects on the final users' expenditures and on the decreasing of the emissions associated by the burning of the primary fuel to produce electrical energy. The increasing of the a.c. motors efficiency may be obtained mainly by decreasing the energy losses in magnetic cores. Non-oriented silicon iron (NO Fe-Si) alloys are soft magnetic materials used in the construction of medium and high power rotating machines. To obtain an efficiency higher than 95%, it is necessary to promote a new design of their magnetic circuits or other cutting technologies. There was tested an industrial type of NO Fe-Si alloys, M400-65A. The magnetic properties of the samples were measured using an uniaxial single sheet tester (SST) at different magnetic polarizations in a range of frequencies from 3 Hz to 200 Hz. The sheet cutting technologies, involved in this study, are mechanical, laser, waterjetting and electroerosion cutting.

Keywords: electrical machines, non-oriented silicon iron sheets, energy losses.

1. Mașini electrice de eficiență sporită

Motoarele electrice convertesc energia electrică în energie mecanică printr-un sistem electromecanic. Cea mai mare parte din energia electrică utilizată de sistemul electromecanic este

consumată de motorul electric, o cantitate foarte mică fiind folosită pentru funcțiile de control sau alte circuite auxiliare. Motoarele electrice și sistemele pe care le acționează reprezintă cel mai mare consumator de energie electrică, utilizând o cantitate dublă de energie electrică în comparație cu iluminatul electric sau instalațiile de încălzire electrică, următorii mari consumatori pe plan mondial. Se estimează că sistemele electromecanice utilizează astăzi între 43% și 46% din totalul energiei electrice produsă la nivel mondial (fig. 1), în urma acestui proces rezultând aproximativ 6040 milioane de tone de emisii de CO₂.

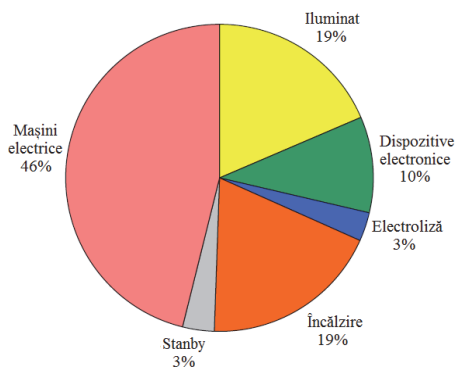


Fig. 1. Cererea globală de energie electrică pentru diferite categorii de consumatori finali [1].

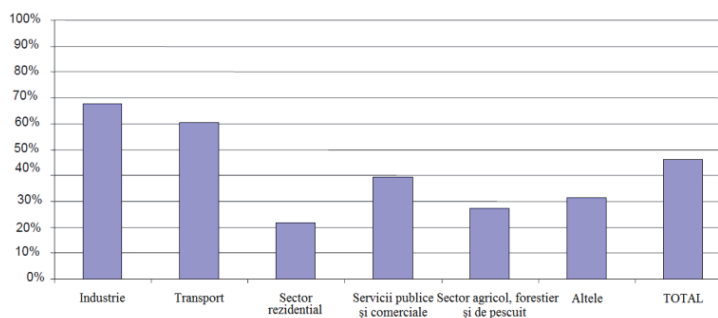


Fig. 2. Consumul mașinilor electrice la nivel mondial în diferite sectoare de activitate [1, 2].

Până în anul 2030, în absența adoptării unor măsuri adecvate de creștere a eficienței energetice, consumul de energie al motoarelor electrice va crește la 13360 TWh pe an, iar emisiile de CO₂ la 8570 Mt pe an. La nivelul anului 2011 se estimează un cost de 565 miliarde USD pe an pentru energia electrică utilizată în sistemele electromecanice, costuri care s-ar putea ridica în anul 2030 la aproape 900 miliarde de USD.

Motoarele electrice de curent alternativ sunt un mare consumator de energie electrică: aproximativ 65% din totalul de energie electrică este convertită în energie mecanică în toate domeniile industriale (ventilatoare, pompe, compresoare, mașini-unelte, ascensoare etc.). Potrivit statisticilor realizate de Agenția Internațională de Energie (IEA) [1], în anul 2006 consumul global de energie electrică în sectorul industrial a fost la nivel mondial de 4988 TWh, ceea ce reprezintă 64% din energia totală consumată de sistemele electromecanice, respectiv 69% din cea consumată în sectorul industrial. Spre comparație, consumul de energie electrică în sectorul rezidențial a fost de 948 TWh, adică 13% din toată energia electrică a sistemelor electromecanice, respectiv 22% din energia electrică a sectorului (fig. 2).

Pentru a reduce costul de fabricație a motoarelor electrice până în prezent s-a optat pentru scăderea cantității de materiale active (oțel electrotehnic, cupru, aluminiu) folosite la fabricarea mașinilor, dar acest lucru a prejudiciat eficiența energetică și factorul lor de putere. În prezent creșterea eficienței motoarelor de curent alternativ prin reducerea pierderilor de putere a devenit o necesitate stringentă, în România ca și în Europa. Reducerea pierderilor de energie produce importante efecte benefice asupra cheltuielilor finale ale utilizatorilor ca și în privința reducerii emisiilor poluante asociate cu arderea combustibilului primar pentru generarea de energie în centralele electrice. Creșterea eficienței motoarelor de curent alternativ se poate realiza mai ales prin reducerea pierderilor de energie din miezul lor magnetic.

Eficiența motoarelor electrice depinde de puterea lor nominală și de încadrarea lor în anumite clase de eficiență energetică. În cazul motoarelor de putere mică, gabaritul constituie cel mai important factor în determinarea eficienței, dar în cazul motoarelor de mare putere este mai

importantă clasa de eficiență din care acestea fac parte. În anul 2008, Comisia Internațională de Electrotehnică a introdus un nou sistem de clasificare a eficienței, prin care s-au definit, conform standardului IEC 60034-30 [2], următoarele clase :

- eficiența standard IE1 (similară în operare la frecvența industrială de 50 Hz cu Eff2);
- eficiența înaltă IE2 (similară în operare la frecvența industrială de 50 Hz cu Eff1);
- eficiența premium IE3 și
- eficiența super premium IE4 (IEC 60034-31 [3]).

În anul 2009 Uniunea Europeană a adoptat legislația pentru definirea standardelor de performanță ale motoarelor electrice, ca măsură de punere în aplicare a directivei privind proiectarea ecologică. Pătrunderea pe piață a diferitelor clase de eficiență variază considerabil de la țară la țară. Ponderea clasei de eficiență IE3 a ajuns la 20% în Statele Unite, dar este practic zero în Uniunea Europeană. În figura 3 este ilustrat modul în care variază eficiența energetică a unui motor cu 4 poli, în funcție de putere nominală și clasă de eficiență.

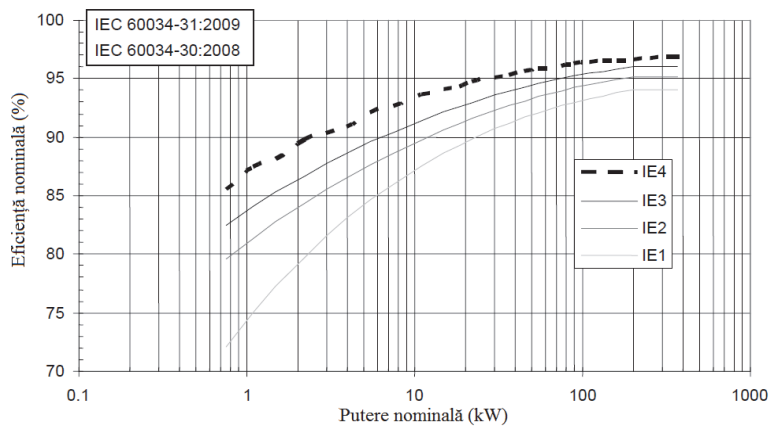


Fig. 3. Clasele de eficiență în cazul unui motor electric cu 4 poli, 50 Hz [1].

Pierderile de energie într-un motor de curent alternativ pot fi rezumate astfel [3]:

- pierderile de energie din stator, influențate în proporție de (30÷50)% de design-ul conductoarelor și al materialului folosit;
- pierderile de energie din rotor, influențate în proporție de (20÷25)% de design-ul conductoarelor și de material;
- pierderile de energie în miezul feromagnetic, influențate în proporție de (20÷25)% de calitatea materialului magnetic;
- pierderile de energie suplimentare, influențate în proporție de (5÷15)% de producția primară și metodele de proiectare;
- frecare și bobinaj, influențate în proporție de (5÷15)% de proiectarea ventilatoarelor și a altor componente adiacente.

2. TOLE FeSi CU GRĂUNȚI NEORIENTAȚI (NO)

Tolele FeSi cu grăunți neorientați (NO) sunt materiale magnetice moi, cu o textură de grăunți aproximativ izotropă, utilizate în construcția miezului magnetic al mașinilor electrice de medie și înaltă putere. Pentru obținerea unui randament al mașinilor de peste 95% – atât pentru a economisi energie, dar și pentru a evita supraîncălzirea și reducerea duratei de viață a mașinii – este necesară

revizuirea tehnologiei de fabricație și a concepției de proiectare a circuitelor magnetice. Îmbunătățirea calității tablei electrotehnice poate fi realizată prin controlul unui număr de parametri structurali: impurități, granulometrie (dimensiunea grăuntelui) și textura cristalografică, starea suprafeței, tensionări reziduale sau aplicate din exterior. Tolele FeSi sunt realizate conform standardelor IEC 60404-8-2 și 60404-8-4; ele sunt fabricate în diferite calități, diferind prin cantitatea de siliciu din aliaj. Procentul de siliciu în aliaj poate varia de la 1 la 3,7%, iar aluminiul este folosit pentru a preveni îmbătrânirea materialului (0,2 ÷ 0,8)%. Pentru a crește rezistivitatea tolei se adaugă, de obicei, cantități mici de mangan (0,1 ÷ 0,3)% [4, 5].

Printr-o alegere corespunzătoare a compoziției și a unor tratamente metalurgice și termice adecvate [6], se pot obține aliaje FeSi NO cu proprietăți magnetice superioare. Trebuie totuși luate în considerare și alte câteva proprietăți: stabilitatea termică și structurală, sensibilitatea la tensionări mecanice a parametrilor magnetici, proprietățile mecanice, prelucrabilitatea și conductivitatea termică. Un aliaj FeSi NO adecvat fabricării de mașini electrice va rezulta dintr-o evaluare cost-beneficiu a tuturor acestor proprietăți.

Procesul de magnetizare într-un material magnetic moale are loc prin intermediul a două mecanisme: mișcarea pereților de domenii magnetice și rotația uniformă sau neuniformă a magnetizației în interiorul domeniilor. Magnetizarea prin mecanismul rotației magnetizației presupune însă valori ridicate ale intensității câmpului magnetic, de ordinul a 10^3 A/m, astfel încât procesul predominant de magnetizare în aliajele FeSi NO constă în deplasarea pereților de domenii magnetice; rotația vectorului magnetizație se produce doar la valori ale inducției magnetice apropiate de saturație [4]. Într-un material real, cu defecte și impurități, există forțe de fixare care se opun deplasării pereților de domenii magnetice. Pentru deplasarea unui perete interdomenial 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 histerezis magnetic.

3. Tehnologiile de debitare a tolelor FeSi NO

Procesul de ștanțare generează tensiuni interne localizate și poate afecta valoarea pierderilor de energie în materialele prelucrate „fully process”. La mașinile de mare putere este de așteptat ca efectul asupra pierderilor magnetice să fie mult mai important, datorită asamblării și stivuirii tolelor pentru a forma miezul magnetic. Deformarea plastică datorată ștanțării aliajului duce la o creștere a durității sale mecanice, datorită dislocărilor din structura cristalină a materialului. Toate materialele metalice a căror temperatură de topire nu este foarte mare pot fi supuse procesului de ștanțare [7, 8].

În industrie, pentru realizarea tolelor pentru miezurile magnetice, se folosesc o serie întregă de operații de ștanțare: retezarea, decuparea, șlițuirea și perforarea.

În procesul de ștanțare se observă trei faze caracteristice: faza inițială, de deformare elastică (fig. 4,a), faza intermediară, a deformațiilor plastice (fig. 4,b) și faza de desprindere a materialului, denumită faza de forfecare (fig. 4,c). În timpul fazei elastice, metalul este solicitat la compresie și încovoiere, iar în zona muchiei tăietoare a părții fixe, în deschiderea plăcii tăietoare, se produce local o ușoară deformare plastică. Faza deformațiilor plastice apare după ce poansonul pătrunde pe o anumită adâncime în materialul de ștanțat. În spațiul dintre poanson și placa tăietoare, materialul este intens solicitat la tracțiune și încovoiere. Deformarea elastică apare la atingerea tablelor de către cuțițe, iar deformarea plastică atunci când cuțițele pătrund la o adâncime $h_c = (0,1 \dots 0,4)s$, unde s este grosimea tablelor. Spre sfârșitul acestei faze, tensiunile din apropierea muchiilor tăietoare ating valorile maxime de rezistență la forfecare, iar în metal sunt create condiții pentru apariția microfisurilor de forfecare [9,

10, 11]. Pe măsură ce poansonul înaintează în material, ca urmare a creșterii tensiunilor zonale, apare forfecarea, care începe din momentul apariției micro- și mai ales a macrofisurilor în zona învecinată muchiilor tăietoare. Forfecarea se produce atunci când poansonul pătrunde în piesă pe o grosime $h_p = (0,15 \dots 0,7)s$. Fisurile se propagă în straturile adânci ale metalului cu o viteză mai mare decât cea de pătrundere a poansonului, producând ruperea materialului înainte ca poansonul să străbată întreaga grosime a tablei.

Tabla electrotehnică și în special cea texturată își schimbă caracteristicile magnetice ca urmare a proceselor tehnologice de tăiere sau ștanțare. În timpul procesului de deformare plastică materialul absoarbe energie, ceea ce se manifestă prin creșterea numărului de dislocații. Acest fenomen este prezent în procesul de debitare al tolelor utilizate în construcția circuitului magnetic al mașinilor electrice, ducând la deteriorarea proprietăților magnetice ale aliajului. Pentru recuperarea acestor proprietăți se aplică un tratament termic de recoacere, care poate fi de două tipuri: recoacere pentru eliminarea tensionărilor mecanice și recoacere de recristalizare [12, 13, 14].

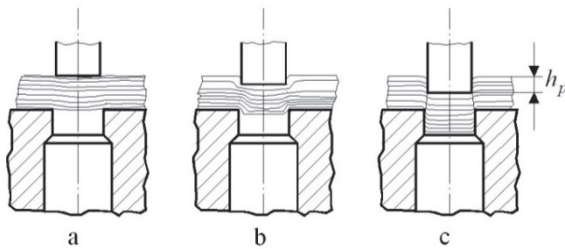


Fig. 4. Procesul de ștanțare.

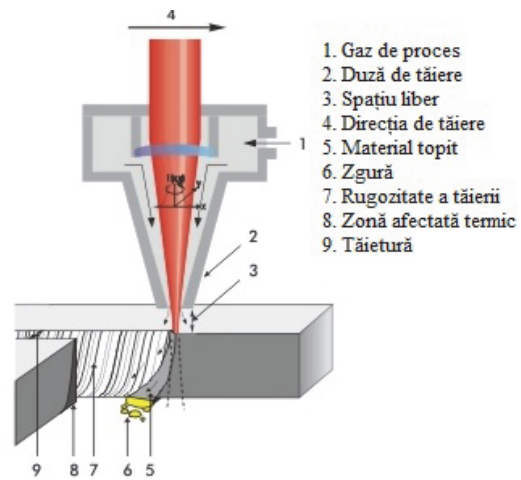


Fig. 5. Tăierea cu laser [15].

Tăierea cu laser (Fig. 5) se caracterizează printr-o viteză de debitare relativ ridicată. Prin setări adecvate ale dispozitivului se poate obține o calitate bună a marginii tăiate. Tăierea cu laser este flexibilă și permite trecerea de la o geometrie a tolelor la alta cu modificări minore ale echipamentului de tăiere. Totuși, această metodă induce tensiuni reziduale termice. Analize cu raze X [4, 5] au dovedit existența unei tensiuni mecanice reziduale de aproximativ 300 MPa la marginea tăiată, ceea ce constituie un mare dezavantaj. Un alt dezavantaj al tăierii cu laser este costul ridicat al operațiunii. Ținând cont de toate aceste elemente, metoda este aplicabilă în cazul producției de serie mică și a prototipurilor. Tăierea cu laser a materialelor metalice necesită intensități ale fasciculului laser de peste 10^6 W/cm^2 , care se pot realiza numai prin focalizarea razei laser cu ajutorul unor sisteme de oglinzi și lentile. Îndepărtarea termică a materialului, care se manifestă în adâncime, produce o tăiere în material atunci când se aplică o mișcare de avans [15].

În funcție de acțiunea fasciculului laser asupra materialului se disting: tăierea laser prin fuziune – dacă la debitarea cu laser, materialul de îndepărtat este topit; tăiere cu flamă – dacă materialul este ars; tăiere laser prin sublimare – dacă materialul de îndepărtat este vaporizat. Materialul ce trebuie îndepărtat, topit, ars sau vaporizat în punctul focal al razei laser, este îndepărtat din zona tăieturii printr-un curent de gaz emis de o duză coaxială cu axa optică. Gazul de tăiere are și rol de protecție a elementelor optice de focalizare a razei laser, care ar putea fi deteriorate de lichidul metallic încins.

La locul tăierii se produce recristalizarea materialului, care duce în final la creșterea pierderilor. Experimentele au testat diverse viteze de tăiere și procedee, dar concluzia generală este că tăierea cu laser deteriorează proprietățile magnetice ale materialului. Tăierea cu laser nu poate fi luată astfel în considerare ca metodă de îmbunătățire a eficienței mașinilor electrice, atâta timp cât nu este însoțită de un proces care să elimine partea afectată de tăierea cu laser.

În urma **debitării cu jet de apă** (Fig. 6) s-a constatat o bună calitate a tăieturii [13], dar necesitatea unui echipament special și viteza de tăiere relativ scăzută fac ca această metodă să fie rar folosită în prezent.

Se deosebesc două tipuri de debitări cu jet de apă: simplu, folosit în industria chimică, alimentară la materiale moi și la filme subțiri; cu particule abrazive. Jetul hidroabraziv este un fluid compus din trei faze: o fază lichidă, reprezentată de jetul de apă; o fază solidă, reprezentată de particulele abrazive; o fază gazoasă, reprezentată de aerul ce însoțește particulele abrazive la introducerea lor în jetul de apă (această componentă este specifică introducerii particulelor abrazive în jetul de apă: prin injecție de particule abrazive și aer).

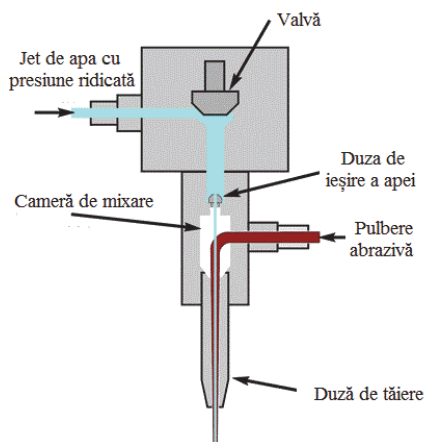


Fig. 6. Tăiere cu jet abraziv de apă.

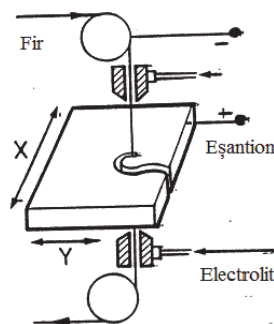


Fig. 7. Debitare prin electroeroziune.

La o primă vedere, acest procedeu poate fi folosit cu succes în debitarea tablelor pentru circuite magnetice. În adevăr, procedeul nu produce o modificare la nivel microstructural a materialului tăiat, iar încălzirea este redusă, datorită temperaturii jetului de apă. Procesul de tăiere depinde 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.

În urma aplicării **electroeroziunii** rezultă un eșantion netensionat mecanic, dar, în pofida acestui mare avantaj, procesul este lent, fapt ce îi limitează aplicabilitatea.

Principiul electroeroziunii implică topirea și vaporizarea materialului în zona unei descărcări electrice în arc. Pentru acest proces se folosește un electrod care produce descărcări în arc între el și piesa de prelucrat (Fig. 7). Prin mișcarea electrodului și controlul timpului de descărcare se poate realiza debitarea oricărui material metalic. Procesele care se produc modifică și în acest caz structura cristalină în imediata apropiere a locului în care s-a realizat electroeroziunea.

Mașinile de electroeroziune cu fir folosesc o sârmă (electrod) pentru a tăia un contur dorit (programat) într-o piesă metalică. Se obțin precizii deosebite folosind mașinile de electroeroziune cu fir în tăierea matrițelor sau poansoanelor, putând fi obținute ajustaje foarte precise doar prin tăiere.

4. SEPARAREA PIERDERILOR DE ENERGIE ÎN TOLELE FeSi NO

Separarea pierderilor de energie [16] reprezintă un sistem avansat de caracterizare a tolelor FeSi NO și constă în determinarea următoarelor componente:

- pierderile de energie datorate (macro)curenților turbionari (W_F);
- pierderile de energie prin histerezis (W_h);
- pierderile în exces (W_{exc}), datorate curenților turbionari ce apar la deplasarea pereților de domenii.

Această analiză se poate face numai în cazul în care se studiază comportarea materialului într-o plajă de frecvențe. În aproximarea frecvențelor joase, conform teoriei lui Bertotti [17, 18] pierderile prin curenți turbionari se calculează cu ajutorul formulei

$$W_F = \frac{\pi^2}{6} \frac{\sigma J_{max}^2 d^2}{\tau} f \quad (1)$$

unde: J_{max} este valoarea de vârf a polarizației magnetice; τ – densitatea materialului; d – grosimea tolei; σ – conductivitatea materialului.

Se calculează suma pierderilor de energie în exces și prin histerezis W_{dif} ca diferență [19, 20, 21]:

$$W_{dif} = W_{exc} + W_h = W_{total} - W_F \quad (2)$$

Prin extrapolarea la zero a dependenței $W_h + W_{exc}$ în funcție de radicalul frecvenței se obține valoarea lui W_h [17, 22]. Pierderile prin histerezis, generate de instabilitățile locale, pot fi analizate prin mecanismele de coercitivitate. În cazul pierderilor prin macrocurenți turbionari, geometria probei este esențială, materialul fiind considerat un mediu omogen.

O consecință directă a structurii de domenii magnetice a materialului sunt pierderile în exces, foarte dificil de determinat, datorită mării varietăți de structuri de domenii magnetice. Se preferă în general ca valoarea acestor pierderi de energie să fie determinată prin metode matematice.

În figura 8 sunt prezentate câteva exemple de separare a pierderilor de energie în cazul $J_{max} = 1000$ mT și $J_{max} = 1500$ mT, măsurate și calculate în cazul tolelor M400-65A, tăiate paralel cu direcția de laminare prin ștanțare mecanică.

Proprietățile de material și dimensiunile tolelor FeSi NO M400-65A sunt listate în tabelul 1.

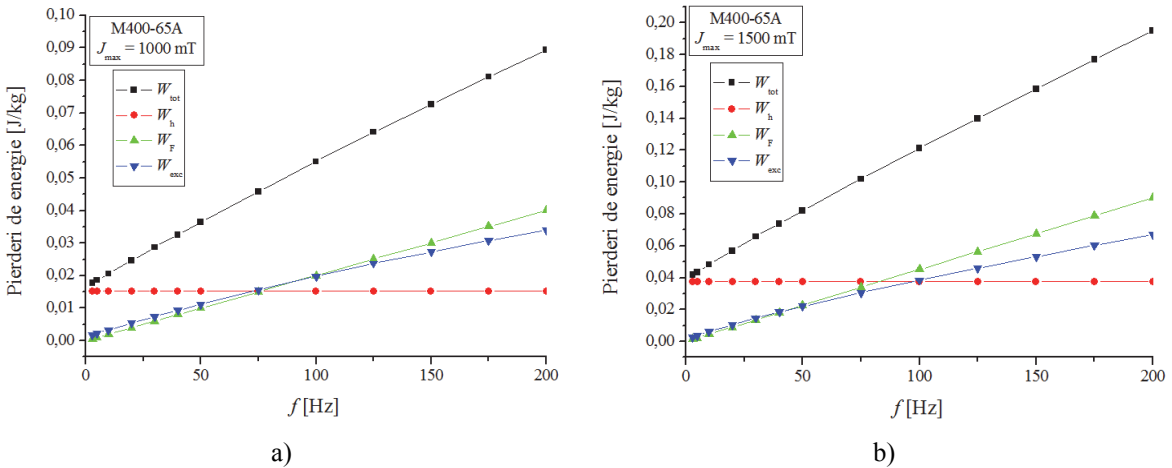


Fig. 8. Separarea pierderilor de energie pentru:
a – $J_p = 1000$ mT; b – $J_p = 1500$ mT.

Dimensiuni și proprietăți eşantioane testate

Tip Tolă	Direcție tăiere	Densitate [g/cm ³]	Rezistivitate electrică [Ω/m]	Masa [g]	Lungime [mm]	Lățime [mm]	Grosime [mm]
M400-65A	RD	7,25	47,7·10 ⁻⁸	45,44	300	30	0,65

Măsurătorile magnetice s-au realizat utilizând un Tester Unitolă – Brockhaus Messtechnik, în cazul unei polarizații magnetice sinusoidale, în conformitate cu regulile DIN 50 462. Tensiunea secundară trebuie de asemenea să fie sinusoidală. Sistemul de bobine de măsură nu constituie un transformator liniar. O buclă de control pentru semnalul primar impune forma semnalului secundar. Algoritmul de control verifică forma tensiunii secundare și controlează puterea amplificatorului astfel încât tensiunea secundară să fie sinusoidală. Tensiunea nominală este furnizată de un generator de unde sinusoidale controlat digital de cristale de mare stabilitate. În acest mod se poate atinge o frecvență foarte înaltă și o amplitudine stabilă. Amplitudinea și frecvența sunt ajustate la valori optime de procesorul intern prin conectare la un calculator.

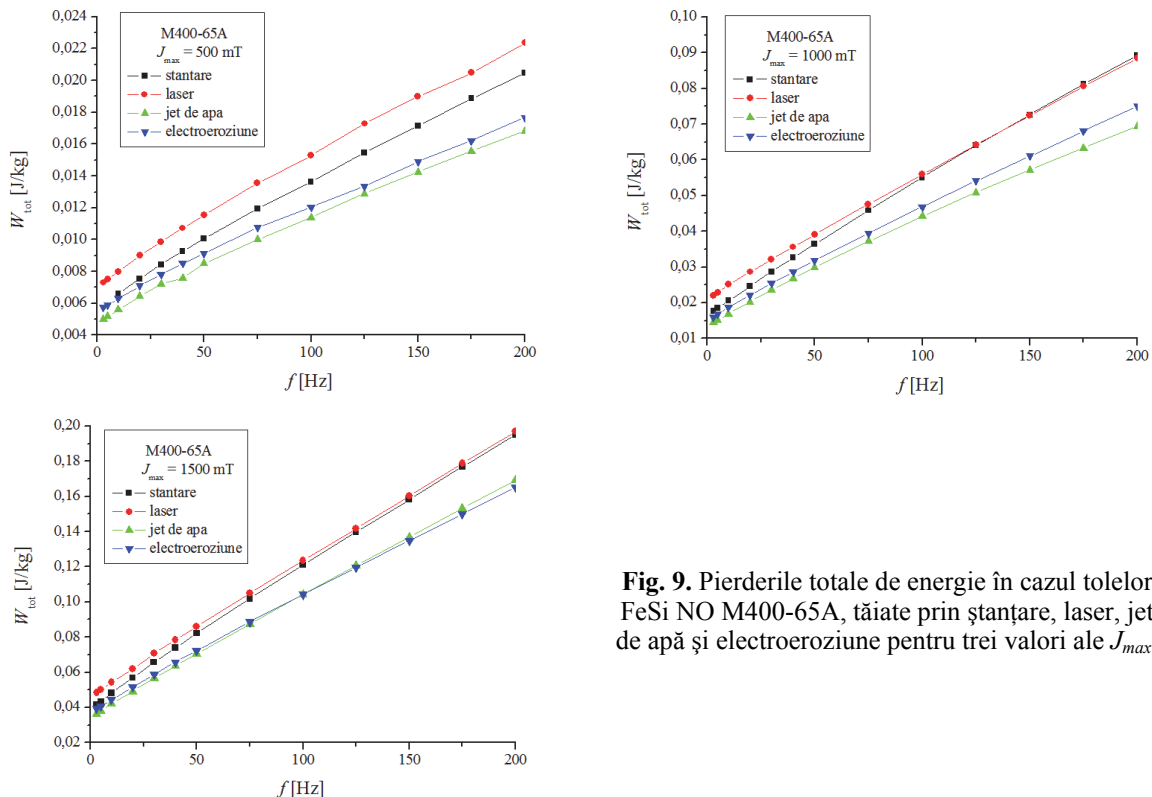


Fig. 9. Pierderile totale de energie în cazul tolelor FeSi NO M400-65A, tăiate prin ștanțare, laser, cu jet de apă și electroeroziune pentru trei valori ale J_{max} .

5. INFLUENȚA TEHNOLOGIEI DE TĂIERE ÎN COMPORTAMENTUL PIERDERILOR DE ENERGIE

S-a aplicat procedeul separării pierderilor de energie în cazul unor tole FeSi NO M400-65A debitate prin patru procedee tehnologice diferite: ștanțare, laser, cu jet de apă și electroeroziune. Rezultatele determinărilor sunt prezentate în figurile următoare privind pierderile totale (Fig. 9), pierderile prin histerzis (fig. 10) și pierderile în exces (fig. 11).

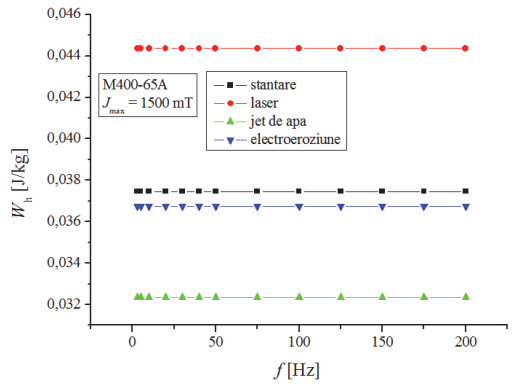
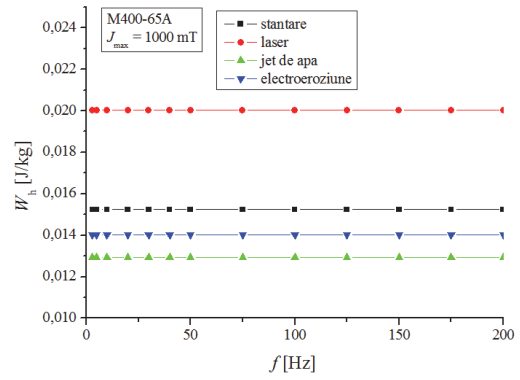
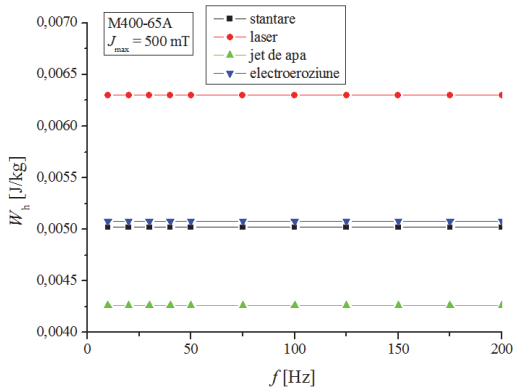


Fig. 10. Pierderile de energie prin histerzis în cazul tolelor FeSi NO M400-65A, tăiate prin ștanțare, laser, jet de apă și electroeroziune pentru trei valori ale J_{max} .

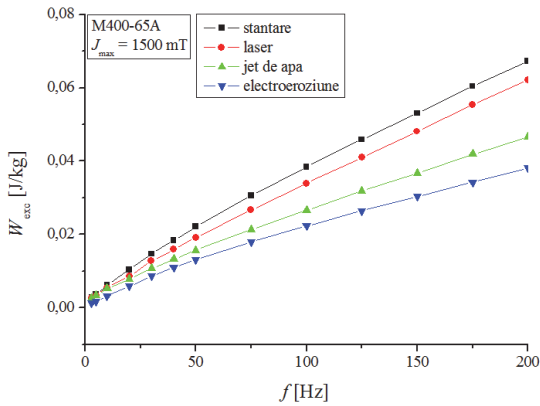
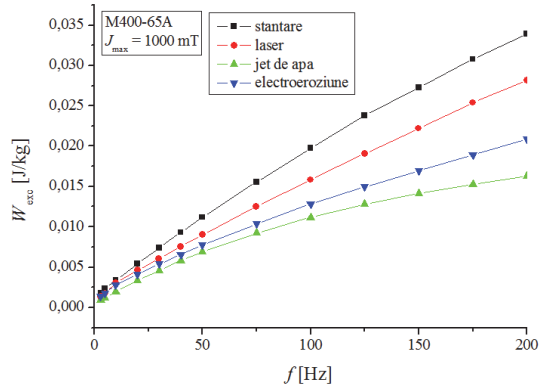
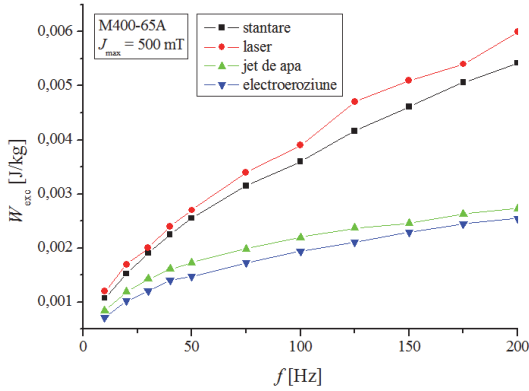


Fig. 11. Pierderile de energie prin exces în cazul tolelor FeSi NO M400-65A, tăiate prin ștanțare, laser, jet de apă și electroeroziune pentru trei valori ale J_{max} .

În privința pierderilor totale s-a constatat că cele mai bune rezultate (pierderi de energie minime) se obțin în cazul tăierii cu jet de apă, calitativ apropiate fiind și cele care corespund tăierii eșantioanelor prin electroeroziune. Diferența dintre acestea fiind cu atât mai redusă cu cât polarizația magnetică de excitație este mai mare până la suprapunere în cazul polarizației $J_{max} = 1500$ mT.

Rezultate mai slabe s-au obținut în cazul ștanțării mecanice, respectiv al debitării cu laser. Din nou diferența dintre acestea tinde a se anula la inducțiile magnetice de 1000 mT și 1500 mT (fig. 9).

Pierderile prin histerezis depind de mecanismele de coercitivitate din material, de incluziuni și de clivaje. La toate valorile polarizației magnetice de excitație pierderile prin histerezis reprezintă aproximativ jumătate din pierderile totale măsurate (fig. 10). Ca urmare, ponderea pierderilor prin histerezis se reduce o dată cu creșterea polarizației magnetice, observație utilă în cazul în care, datorită neliniarității circuitelor magnetice, apar frecvențe de ordin superior ale câmpului de excitație.

În privința pierderilor în exces, datorate microcurenților turbionari formați în vecinătatea imediată a pereților și neregularităților structurii cristaline, se observă că la toate inducțiile de lucru și în toată gama de frecvențe ștanțarea mecanică și prelucrarea cu laser conduc la pierderi de energie mai ridicate (la prelucrarea cu laser la polarizație magnetică sub 1000 mT), în vreme ce rezultatele cele mai bune se obțin în cazul prelucrării cu jet de apă și prin electroeroziune.

6. CONCLUZII

În definitivarea opțiunilor pentru prelucrarea tolelor pentru miezul magnetic al unei mașini electrice trebuie luate în considerare în egală măsură, în afara proprietăților magnetice materialului – și în mod special a pierderilor de energie – și considerentele privind evoluția microstructurii materialului în zona de tăiere, care pot eventual impune operațiuni de recondiționare, dar și considerentele de natură economică (costul instalației, viteza de prelucrare etc.).

Privind global aceste considerente ștanțarea mecanică și prelucrarea prin electroeroziune reprezintă procedeele insistent recomandate, opțiunea finală revenind producătorului.

Bibliografie

- [1] IEA (International Energy Agency) statistics (2006), available at: www.iea.org/stats.
- [2] IEC (International Electrotechnical Commission) (2007), Rotating Electrical Machines – Part 30: Efficiency Classes of Single Speed Three Phase Cage Induction Motors – Committee Draft for Vote, August, 6003430 Edn.1 (2/1464/CDV), available at: www.iec.ch.
- [3] IEC (2009), Guide for the Selection and Application of Energy Efficient Motors Including Variable Speed Applications (Draft), 6003431, Geneva, available at: www.iec.ch.
- [4] Fausto Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, Elsevier Academic Press, 2004.
- [5] H. Gavrilă, H. Chiriac et al., *Magnetism tehnic și aplicat*, Editura Academiei, Române, Bucharest, 2000.
- [6] G. Păltânea, V. Păltânea, I. Nemoianu, *Magnetic Properties of Non-Oriented Silicon Iron Sheets in Case of External Applied Thermal Treatments*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., vol. 55, 2010, pp. 357–364.
- [7] S. Wu, A. Lu, H. Zhao, H. Fang, F. Tang, *Micromechanism of residual stress reduction by low frequency alternating magnetic field treatment*, Materials Science and Engineering A, vol. 328, 2002, pp. 133-136.
- [8] R.W. Cahn, P. Haasen, *Physical metallurgy*, translated to Russian, vol. 3, “Металлургия”, Moscow, 1987.
- [9] ***, www.steel-n.com
- [10] AK Steel Corporation, “Selection of electrical steels for magnetic cores”, Product Data Bulletin, www.aksteel.com.
- [11] AK Steel Corporation, “Nonoriented electrical steels”, Product Data Bulletin, www.aksteel.com.

-
- [12] T. Yanez, *Innovative production methods for high silicon-steel*, PhD thesis, Universiteit Gent, 2002.
- [13] A. Schoppa, J. Schneider and J.-O. Roth, *Influence of the cutting process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels*, JMMM, vol. 215-216, 2000, pp. 100-102.
- [14] T. Nakata, M. Nakano, K. Kawahara, *Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel*, IEEE Trans. on Magn., vol. 7, 1992, pp. 453-457.
- [15] P. Baudouin, *Effect of Laser and Mechanical Cutting on the Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steels*, PhD thesis, 2002.
- [16] G. Păltânea, V. Mănescu, *Total power loss in silicon-iron sheets, Advanced topics in electrical engineering*, ISBN 973-7728-31-9, București, Noiembrie, 2004.
- [17] G. Bertotti: *Hysteresis in magnetism*. Elsevier Academic Press, 1998.
- [18] G. Bertotti, *General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials*, IEEE Trans. Magn, Vol. 24, 1988, pp. 621- 630.
- [19] J. B. Goodenough, *Summary of Losses in Magnetic Materials*, IEEE Trans. Magn, Vol. 38, 2002, pp. 3398 – 3408.
- [20] F. Fiorillo, *Advances in Fe – Si properties and their interpretation*, J. Magn. Magn.. Mater, pp. 1996, 428 – 431.
- [21] G. Paltanea, V. Paltanea and H. Gavrilă: Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. et Energ. Vol. 58, 2013, p. 53.
- [22] G. Bertotti, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Chapter: Magnetic Losses, Elsevier Science Ltd., ISBN: 0-08-0431526, 2001.

Recunoaștere

Prezenta lucrare este parte componentă a cercetărilor efectuate în cadrul Proiectului PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-0373, CNDI – UEFISCDI.