# CERCETĂRI PRIVIND CARACTERIZAREA OȚELURILOR SILICIOASE CU GRĂUNȚI ORIENTAȚI UTILIZATE ÎN ELECTROTEHNICĂ

Conf. dr. ing. **Ana DONIGA,** Prof. dr. ing. **Elisabeta VASILESCU**

Universitatea „Dunărea de Jos“ din Galați

**REZUMAT.Lucrarea prezintă rezultatele cercetărilor de laborator privind textura cristalografică a oțelurilor cu 3% Si, iar apoi influența ei asupra nivelului pierderilor magnetice în garficul final. Având în vedere faptul că proprietățile magnetice ale otelurilor silicioase depind de textura cristalografică, şi anume de (110)[100] – textura Goss – au fost urmărite dezvoltarea acestei texturi pe întregul flux tehnologic (laminare la cald, laminare la rece, recristalizare prin recoacere primară şi secundară), precum şi corelația cu valorile pierderilor magnetice în graficul final. Aceste experimente au fost făcute, de asemenea, luând în considerare influența particulelor fazei secundare care acționează în calitate de „inhibitori“ în oțelurile silicioase.**

**Cuvinte cheie:** textură cristalografică, pierderi magnetice, oțeluri silicioase, recoacere secundară.

**ABSTRACT. The paper presents the results of the laboratory researches on the crystallographic texture in 3% Si steels and then influence on the level of magnetic losses in the final sheet. Having in mind that the magnetic properties of the silicon steels depend on the crystallographic texture, namely the (110)[100] – the Goss texture – the development of this texture on the whole technological flow (hot rolling, cold rolling, primary and secondary recristallization annealing) and the correlation with the values of the magnetic losses in the final sheet have been pursued. These experiments have been made also taking into account the influence of the secondary phase particles acting as „inhibitors” in the silicon steels.**

**Keywords:** crystallographic texture, magnetic losses, silicon steels, secondary annealing.

## 1. INTRODUCERE

Oțelurile electrotehnice cu grăunți orientați sunt aliaje feromagnetice caracterizate prin valori ridicate ale inducției şi permeabilității magnetice, forță coercitivă redusă, pierderi reduse prin histerezis şi curenți turbionari. Cercetările realizate de către M.P. Goss [1], şi apoi de către M.Littman [2] au dovedit, pentru prima dată, o strânsă corelație între caracteristicile magnetice ale tablelor de transformator şi o anumită orientare cristalografică, de unde numele de oțel cu grăunți orientați.

Dezvoltarea orientării cristalografice de tipul (110)[100] sau „textura Goss“, într-un oțel cu cca 3% Si determină o scădere importantă a pierderilor în miezul transformatoarelor, ajungând până la 0,6…0,7 W / kg în tablele din oțel realizate prin tehnologiile clasice [3], aşa cum se prezintă în tabelul 1.

*Tabelul 1*

**Caracteristicile tablelor din oțel cu grăunți orientați**

| Marca oțel | Grosime tablă [mm] | C [%] | Textura Goss [%] | Piederi în miez la 50 Hz B = 1,5 T | Permeabilitate magnetică | Proveniența |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MOH | 0,28 | 0,002 | 89, 9 | 0,67 | 1970 | Nippon Steel |
| M2H | 0,28 | 0,005 | 85,0 | 0,76 | 1910 | |
| M4G | 0,28 | 0,002 | 83,7 | 0,76 | 1887 | Thysen Steel |
| M5G | 0,28 | 0,009 | 82,7 | 0,87 | 1850 | Germania |
| M3 | 0,28 | 0,002 | 81,4 | 0,84 | 1820 | România |
| M5 | 0,28 | 0,005 | 78,75 | 0,92 | 1790 | România |
| M6 | 0,28 | 0,005 | 72,3 | 1,03 | 1750 | România |
| M7 | 0,28 | 0,027 | 60,2 | 1,04 | 1680 | România |

*Tabelul 2*

**Compoziția chimică a oțelurilor studiate**

| Nr. sarjă | Compoziția chimică [%] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | S | P | Al | Nb |
| 1N | 0,004 | 3,04 | 0,08 | 0,015 | 0,009 | 0,002 | 0,09 |
| 2A | 0,004 | 3,02 | 0,07 | 0,020 | 0,013 | 0,07 | - |
| 3S | 0,003 | 3,04 | 0,07 | 0,022 | 0,009 | 0,01 | - |

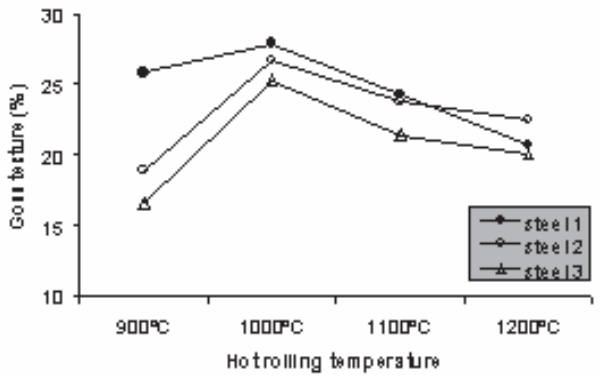



**Fig. 2.** Dezvoltarea texturii Goss în banda laminată la cald.

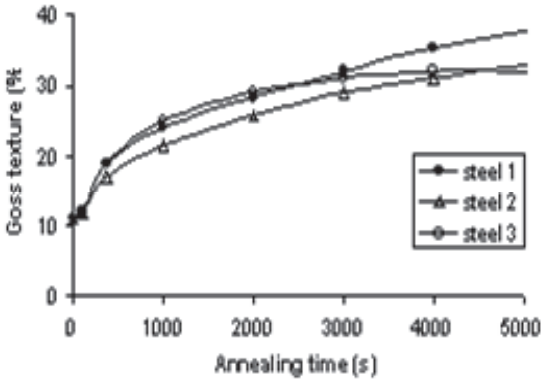



**Fig. 3.** Formarea texturii Goss după prima recoacere de recristalizare.

Textura cristalografică este influențată, la rândul său, de mai mulți parametri, şi anume: compoziția chimică a oțelului, gradul de deformare la cald şi la rece şi condițiile de tratament termic. Având în vedere toate aceste aspecte, în cadrul lucrării a fost efectuată o serie de experimentări de laborator pentru a urmări, pe de o parte, evoluția texturii Goss în timpul etapelor principale ale tehnologiei de fabricație a tablelor de oțel cu 3% Si şi, pe de altă parte, influența texturii Goss asupra caracteristicilor magnetice ale tablelor finale.

## 2. REGIMURI DE LUCRU

**Au fost studiate trei şarje de oțel silicios având compoziția chimică prezentată în tabelul 2**

Compoziția chimică a celor trei oțeluri este uşor diferită prin elementele de microaliere introduse pentru a obține precipitate de faze secundare cu rol de inhibitor care au rolul de a controla dimensiunea grăunților cristalini până în faza finală a procesului tehnologic. Astfel, în oțelul 1N microaliat cu niobiu se formează inhibitori de tipul NbN şi NbC iar în oțelul 2A – microaliat cu aluminiu, inhibitori de tipul AlN. În oțelul 3, inhibitorii au fost tipul MnS. Primele doua şarje au fost elaborate experimental în laborator. A treia şarjă a fost elaborată în condiții industriale, fiind aleasă pentru comparație cu condițiile de laborator.[4] Experimentările au fost efectuate în condiții de laborator şi au urmat etapele principale ale tehnologiei de fabricație:

– laminare la cald pentru obținerea unei anumite grosimi;

– laminare la rece pentru a obține o grosime intermediară, urmată de o recoacere de recristalizare;

– a doua laminare la rece pentru a obține dimensiunile finale, urmată de o recoacere secundară finală.

În toate etapele a fost determinat procentul de textură Goss din tablă realizând şi o corelație cu proprietățile magnetice.

## 3. REZULTATE ŞI DISCUȚII

Cercetările efectuate de-a lungul timpului pe table de oțel silicios a subliniat faptul că textura Goss (110) [100] se formează pentru prima dată, în tabla laminată la cald, la ca 1/10 din grosime, transmisă apoi prin efectul de „memoria texturii" până în tabla finală, pe parcursul întregului ciclu de laminare la cald, laminare la rece şi tratamente termice. [5]

În semifabricatul laminat la cald principalul parametru care influențează formarea texturii Goss este temperatura de laminare (fig. 2).

În general se constată o creştere a componentei de textură Goss până la o temperatură de $1000^0$C, apoi o scădere spre 1100 – $1200^0$C. Oțelul cu Nb prezintă un procent de textură Goss uşor mai ridicat

decât la celelalte două oțeluri pentru toate temperaturile de laminare. Temperaturile mai scăzute de laminare (800–900$^{o}$C) frânează procesul de recristalizare ceea ce determină o întârziere a dezvoltării texturii Goss.

Cercetările efectuate au demonstrat că procentul de textură (110) [100], în caz oțelului cu Nb este cu cca 10% mai mare decât în oțelul cu MnS (folosit ca inhibitor) şi cu cca 7% mai mare decat în oțelul cu Al. In ceea ce priveşte prelucrarea la rece a oțelurilor cu grăunți orientați, experimentările de laborator realizate în cadrul lucrării au urmărit dezvoltarea texturii Goss în funcție de gradul de deformare, temperatura şi timpul de recristalizare folosind mai multe condiții de lucru, aşa cum reiese din tabelul 3 [4] .

Variația procentului de textură Goss, obținut pe tabla laminată la rece după condițiile de mai sus, este prezentată în fig. 3, 4, 5. Aşa cum reiese din din figura 3, creşterea timpului de menținere la recoacerea primară determină dezvoltarea componentei de textură Goss pentru toate cele trei oțeluri. De asemenea, s-a observat că cel mai mare procent de textură Goss a fost înregistrat la oțelul cu Nb, în special la timpii de menținere mari (regimul de lucru I din tabelul 3).

In ceea ce priveşte variația texturii cu gradul de deformare, s-a observat că la laminare la rece (etapa a doua), cel mai mare procent de textura Goss a rezultat pentru un grad de deformare $\varepsilon$ = 50 - 64%. Pentru oțelul cu Nb s-a obținut cel mai mare procent de textură.(fig.4). La grade de deformare foarte mari (regimul III din tabelul 3) textura Goss are valori mai mici, ceea ce înseamnă că o singură laminare cu grade mari de reducere nu favorizează dezvoltarea texturii Goss (fig.5).

Textura finală a fost analizată după aplicarea recoacerii secundare pentru a obține o granulație mare, caracteristică acestui tip de oțel. Aşa cum reiese din figura 5, componenta de textură Goss creşte cu creşterea temperaturii pentru toate cele trei oțeluri. Cea mai mare valoare a fost înregistrată pentru oțelul cu Nb, la 1150$^{0}$C (regimul I din tabelul 3) [6].

În cadrul experimentărilor de laborator a fost determinată dimensiunea grăunților după recoacerea secundară (temperatura = 1150$^{0}$C, timpul de menținere = 6 ore). Astfel, pentru oțelul 1N a rezultat un grăunte cu diametrul de 6...8 mm; pentru oțelul 2A, dimensiune este de 1…3 mm, iar pentru 3S, o granulație de 10 - 20 mm, ceea ce demonstrează o influență accentuată a elementelor de microaliere asupra structurii finale.(fig. 6)

*Tabelul 3*

**Regimurile de lucru pentru prelucrarea la rece a oțelurlor experimentale**

| Regimurile de lucru | Gradul de deformare $\varepsilon$ [%] | Recoacerea de recristalizare | |
|---|---|---|---|
| | | Timp | Temperatură [$^{0}$C] |
| I. Laminare la rece în două etape | Etapa 1, $\varepsilon$ = 65% | 5, 10, 20s, 20, 40 min, 1, 1.5 ore | 800, 920, 1050 |
| | Etapa 2, $\varepsilon$ = 50% | 2, 4, 6 ore | 900, 1000, 1150 |
| II. Laminare la rece în două etape | Etapa 1, $\varepsilon$ = 65% | 20 min | 920 |
| | Etapa 2, $\varepsilon$ = 64, 57, 50, 40% | 6 ore | 1150 |
| III. Laminare la rece într-o singură etapă | $\varepsilon$ = 79, 85, 88% | 6 ore | 1150 |

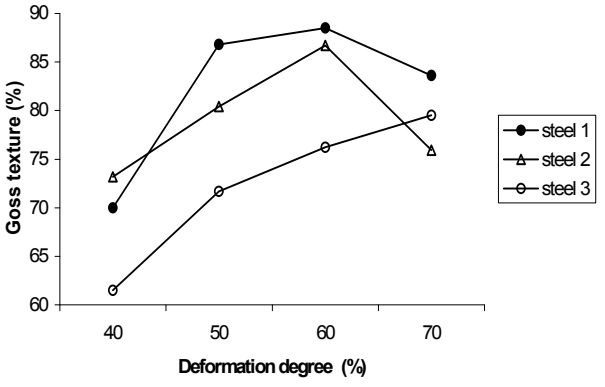



**Fig. 4.** Variația texturii Goss cu gradul de deformare la laminarea a doua.

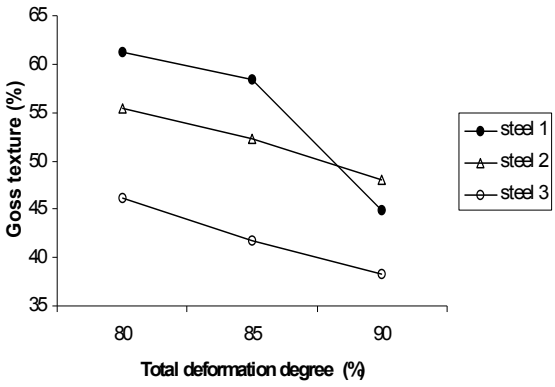



**Fig. 5.** Variația texturii Goss cu gradul total de deformare.

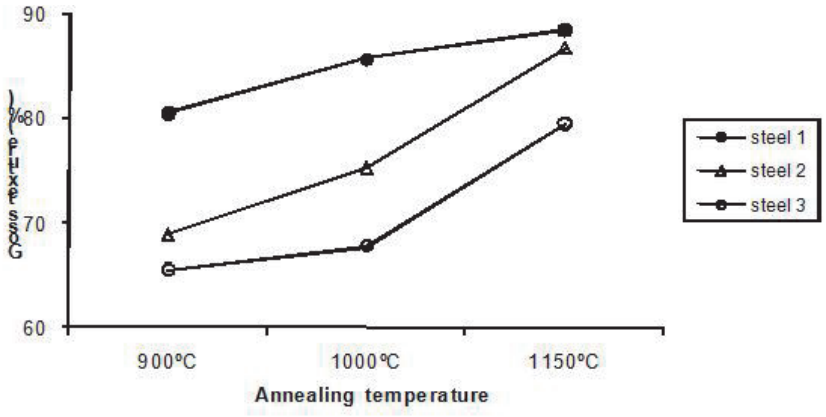



**Fig. 5.** Variația texturii Goss cu temperatura de recoacere secundară.

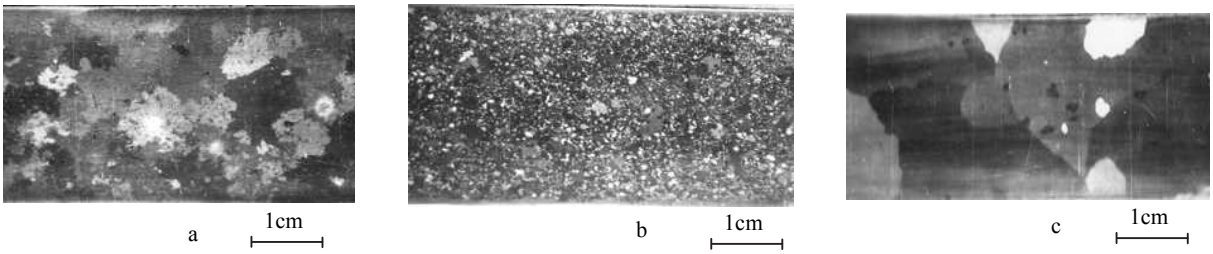



**Fig. 6.** Macrostructura tablelor după recoacerea secundară la temperatura de 1150°C:
*a* – oțel 1; *b* – oțel 2; *c* – oțel 3.

Pe probele pe care s-a analizat textura Goss s-au determinat şi pierderile magnetice utilizând o instalație de laborator de construcție proprie, conform schemei din figura 7 [7]

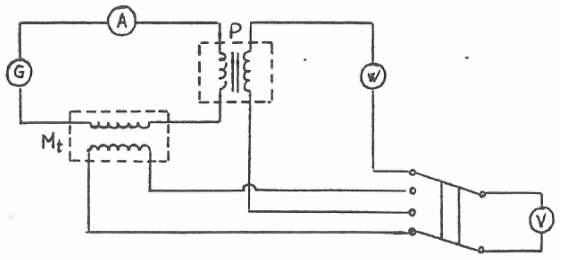



**Fig. 7.** Schema instalației de măsurare a pierderilor magnetice

S-a observat că odată cu creşterea temperaturii şi a timpului de recoacere secundară, pierderile magnetice scad. La temperatura de $1150^0$C şi timpul de menținere de 6 ore se obțin cele mai mici valori ale pierderilor magnetice, iar dintre cele trei oțeluri experimentale cele mai bune rezultate se obțin pentru oțelul 1N (fig. 8).

Curbele de histerezis au fost determinate pe un aparat TR 9801 / tip Ferro-Tester cu osciloscop [5]. Curbele sunt foarte asemănătoare pentru toate cele oțeluri, demonstrând prin aspectul lor pierderi mici prin histerezis. Comparativ a fost analizată şi o tablă japoneză (calitatea M0H), acesta fiind materialul cel mai performant pe plan mondial (PW = 0,7 W / kg pierderi în miez) (fig. 9).

## 4. CONCLUZII

Rezultatele experimentale au condus la următoarele concluzii:

− textura Goss se formează în tabla laminată la cald, temperatura cea mai favorabilă fiind $1000^0$C pentru a obține un volum mare de componentă (110) [100];

− textura Goss se dezvoltă odată cu creşterea temperaturii şi timpului de recristalizare după laminarea la rece;

− la temperatura de $1150^0$C şi timpul de menținere de 6 ore, se obține cel mai ridicat procent de textură Goss pentru toate cele trei oțeluri;

− pierderile magnetice în miez scad odată cu creşterea procentului de textură Goss;

− oțelul microaliat cu Nb a avut cel mai bun comportament; în toate etapele procesului tehnologic s-a obținut cel mai ridicat de textură Goss şi cele mai mici valori ale pierderilor magnetice.

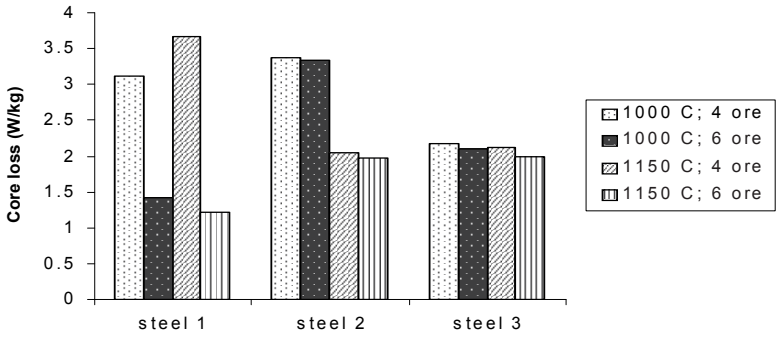



**Fig. 8**. Pierderile în miez pentru cele trei oțeluri.

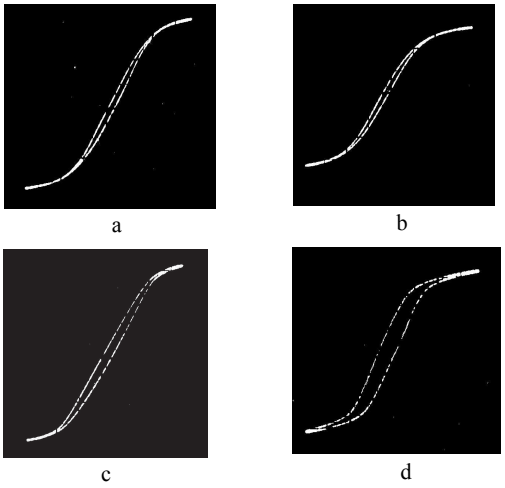



**Fig. 9.** Curbele histerezis pentru oțelurile experimentale: *a* – oțel 1N; *b* – oțel 2A; *c* – oțel 3S; *d* – oțel japonez .

## BIBLIOGRAFIE

[1] Goss, N.P., Patent SUA nr.1 – 1934.
[2] Littman, N., *Core loss of grain oriented 3% Si at high ind.* Procedings of the American Inst of Phis 1975, nr.24, p.721.
[3] Doniga, A., *Cercetări privind oțelurile silicioase pentru transformatoare*. Teză de doctorat. Galati 1998.
[4] Doniga A., *Secondary phase part of the oriented grains silicon steels* – Rev. Metalurgia International – nr.8 / 2010 Suplimentar, pag. 15 - 19.
[5] Gheorghieş Const., Doniga Ana, *Evolution of texture in grain oriented silicon steels* – Journal of Iron and Steel Research, International, 2009 nr.16(4): pag. 78 – 83.
[6] Doniga A, Vasilescu E, Istrate M., *Researches regarding the magnetical characteristics of Nb microalloyed Silicon steels used for electrotechnical industry* – EUROMAT – Praga - 2005.
[7] Doniga A., Stanciu C., *Proprietățile magnetice ale oțelurilor cu conținut scăzut de Nb*. Conferință internațională BRAMAT 1-2 martie 2001- Brașov.

### Despre autori

Conf. dr. ing. **Ana DONIGA**
Universitatea „Dunărea de Jos“ din Galați

A absolvit Facultatea de Metalurgie a Institutului Politehnic din Bucureşti, specializarea Deformări Plastice şi Tratamente Termice. Este conferenţiar doctor inginer la Universitatea “Dunărea de Jos” din Galaţi, Facultatea M.S.M.M. A publicat peste 100 de articole ştiinţifice şi 8 cărţi în domeniul prelucrării plastice a materialelor metalice, ştiinţa materialelor şi prelucrarea artistică a materialelor metalice.Este membru AGIR.

Prof. dr. ing. **Elisabeta VASILESCU**
Universitatea „Dunărea de Jos“ din Galați

A absolvit Facultatea de Metalurgie a “Univesității Dunărea de Jos”din Galați, specializarea Turnătorie.Este proofesor doctor inginer la Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați, Facultatea M.S.M.M. A publicat peste 250 de articole ştiinţifice şi 10 cărţi în domeniile: tratamente termice, termochimice, termomecanice, metalurgia pulberilor, protecția mediului. Este membru AGIR.