**Propriétés magnétiques d'alliages Fe-6,5%Si élaborés par
solidification rapide sous atmosphère contrôlée.
Comparaison avec des alliages Fe-3,2%Si industriels**

Y. Gannac, J. Degauque, J. Redoules

► **To cite this version:**

Y. Gannac, J. Degauque, J. Redoules. Propriétés magnétiques d'alliages Fe-6,5%Si élaborés par solidification rapide sous atmosphère contrôlée. Comparaison avec des alliages Fe-3,2%Si industriels. Journal de Physique IV Proceedings, 1992, 02 (C3), pp.C3-79-C3-83. 10.1051/jp4:1992311 . jpa-00251516

HAL Id: jpa-00251516

<https://hal.science/jpa-00251516>

Submitted on 1 Jan 1992

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Propriétés magnétiques d'alliages Fe-6,5%Si élaborés par solidification rapide sous atmosphère contrôlée. Comparaison avec des alliages Fe-3,2%Si industriels

Y. GANNAC, J. DEGAUQUE et J.P. REDOULES

I.N.S.A., LPS U.R.A. 74, Toulouse, France

Résumé :

Les caractéristiques magnétiques de rubans de Fe-6,5%Si élaborés par solidification rapide sous atmosphère contrôlée ont été comparées à celles d'alliages industriels à grains orientés et non orientés. Dès 150 Hz, l'évolution des caractéristiques des rubans est plus favorable.

Abstract :

The magnetic properties of Fe-6,5%Si ribbons obtained by a rapid quenching in a controlled atmosphere have been compared with those of grain oriented and non oriented industrial alloys. For frequencies higher than 150 Hz these properties turn out to be better than those of industrial alloys.

Introduction :

Pour les applications liées à la production, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique, l'électrotechnique utilise des matériaux magnétiques caractérisés d'une part par une aimantation à saturation et une perméabilité élevées et d'autre part par une faible coercitivité. Parmi ces matériaux magnétiquement doux, les alliages Fe-Si se placent très nettement en tête. Avec des concentrations pondérales en silicium comprises entre 1 et 3,5%, ils se présentent sous forme de produits plats laminés, avec des grains orientés ou non. Sollicités avec les fréquences industrielles, ils sont le siège de pertes magnétiques que l'on cherche à minimiser. L'ajout de quelques pourcents de silicium provoque une chute de la constante magnétocristalline K et de la magnétostriction λ_s et une augmentation de la résistivité favorables à la diminution des pertes totales. La concentration optimale en silicium est de 6,5% mais, au delà de 4,5% de silicium les matériaux deviennent fragiles et ne peuvent plus être laminés. La difficulté peut être contournée grâce à la solidification rapide qui permet d'élaborer de minces rubans d'alliages Fe-6,5%Si [1-4]. Dans le présent travail nous nous proposons de comparer quelques propriétés magnétiques de rubans Fe-6,5%Si élaborés par solidification rapide sous atmosphère contrôlée, bruts de trempe et recristallisés avec celles d'alliages Fe-3,2%Si industriels.

Echantillons :

Des billes de 20 g d'alliage Fe-6,5%Si sont élaborés dans un creuset de lévitation à partir d'un silicium de qualité électronique (5N) et d'un fer électrolytique. Dans le cas d'une solidification rapide effectuée à l'air, il a été observé que les propriétés magnétiques de rubans obtenus avec cet alliage étaient, après recristallisation sous atmosphère purificatrice, comparables à celles de rubans obtenus avec un alliage à base de fer de haute pureté. [5, 6]. Les billes sont ensuite coulées sous la forme de rubans par un

procédé de solidification rapide (*Planar Flow Casting*). Les rubans sont obtenus en projetant l'alliage en fusion à l'aide d'une surpression d'hélium (180 g) sur la jante d'une roue en acier doux tournant à une vitesse de 20 m.s⁻¹. La coulée sous atmosphère neutre d'hélium (pression d'hélium de 20 mbar) permet d'obtenir des rubans dont l'état de surface présente des irrégularités moins importantes que lors d'une trempe à l'air [6, 7]. Les rubans ont une largeur de 4 mm et une épaisseur d'environ 50 µm. Les éprouvettes prélevées dans ces rubans, ont une longueur de 80 mm. Les rubans bruts (R.S. b.) sont ensuite recristallisés (R.S. r.) à 1050°C sous atmosphère d'hydrogène pendant 2h.

Les éprouvettes de Fe-3,2%Si sont découpées dans des tôles industrielles à grains orientés (G.O.) et non orientés (N.O.) parallèlement à la direction de laminage. Leurs dimensions sont de 78 mm × 10 mm × 0,28 mm pour les G.O. et 78 × 10 mm × 0,30 mm pour les N.O. Un recuit permet de relaxer les contraintes créées lors de la découpe.

Techniques expérimentales :

Les mesures magnétiques sont effectuées à l'aide d'un "testeur de petites tôles" couplé à un système d'acquisition comportant un C.A.N. 16 bits, 500 kHz piloté par un microordinateur Epson [7]. La fréquence du champ magnétique varie de 0,05 Hz à 400 Hz.

Résultats :

Comportement quasi-statique (0,05 Hz)

Pour l'ensemble des échantillons soumis à de faibles excitations ($< 15 \text{ A.m}^{-1}$), les lois de Rayleigh sont vérifiées tant pour les cycles d'hystérésis - $B \pm B_m = \mu_1 (H \pm H_m) \pm \frac{b}{2} (H \pm H_m)^2$ où B_m est l'induction magnétique maximale obtenue pour le champ H_m - que pour les courbes de première induction - $B = \mu_1 H + bH^2$. Pour un échantillon donné, les valeurs des paramètres de Rayleigh sont voisines dans les deux cas. Elles sont données dans le tableau I. Dans le cas d'un champ plus important, ce tableau donne aussi la valeur maximale de la perméabilité ($\mu_{\max}$) et du champ ($H_{\max}$) pour laquelle elle est obtenue.

Tableau I : valeurs des paramètres de Rayleigh μ_1 , b , de $\mu_{\max}$ et $H_{\max}$

échantillon	G.O.	N.O.	R.S. b.	R.S. r.
$\mu_1 \text{ H.m}^{-1}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$
$b \text{ H.A}^{-1}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-3}$
$\mu_{\max} \text{ H.m}^{-1}$	0,0405	0,0196	0,0221	0,0289
$H_{\max} \text{ A.m}^{-1}$	16,6	43,5	21,2	12,3

Comportement dynamique

L'étude a porté sur les cycles d'hystérésis obtenus pour des champs magnétiques de fréquence comprise entre 5 et 400 Hz et d'amplitude comprise entre 10 et 500 A.m⁻¹. A 50 Hz, pour un champ de 200 A.m⁻¹ les cycles des R.S. recristallisés ont une forme plus rectangulaire que ceux du G.O. et du N.O. (figure 1).

Figure I : forme des cycles pour le G.O. (a), le N.O. (b), le Fe-6,5%Si brut de trempe (c) et recrystallisé (d)

Dans le domaine de fréquence considéré, on observe (figure II) que la puissance dissipée à 1 T et pour 50 cycles des R.S. bruts et R.S. recristallisés, et toujours inférieure à celle de l'alliage N.O., ces deux types présentant une texture voisine. Si les alliages G.O. présentent les pertes les plus faibles à basse fréquence, les alliages avec excès de silicium et rapidement solidifiés, ont le comportement le plus favorable à partir de 300 Hz pour l'état brut et dès 150 Hz pour l'état recristallisé.

Figure II : évolution des pertes avec la fréquence pour le G.O., le N.O. et les Fe-6,5%Si bruts et recristallisés.

Discussion :

L'excès de silicium et le mode d'élaboration agissent de deux manières opposées sur le comportement des propriétés magnétiques.

- influence négative :

- . diminution de l'aimantation à saturation.
- . taille des grains plus faible qui entraîne une augmentation de la densité de joints de grains responsable d'une augmentation du champ de dureté. Ceci est particulièrement vrai en comparaison des G.O. dont la taille des grains est de l'ordre du centimètre.

- influence positive :

- . la diminution des constantes d'anisotropie magnétocristalline K et de

magnétostriction λ , consécutive à l'augmentation de la teneur en silicium, en facilitant les déplacements des parois de domaine et les rotations, entraîne un abaissement de la coercitivité et donc des pertes par hystérésis.

. l'augmentation de la résistivité qui varie de $40 \mu\Omega\text{.cm}$ à $80 \mu\Omega\text{.cm}$ lorsque la teneur en silicium passe de 3% à 6,5%, ainsi que la faible épaisseur des rubans résultant du procédant d'élaboration, minimisent les pertes par courant de Foucault.

Les propriétés magnétiques optimales des rubans Fe-6,5%Si sont obtenues après une recristallisation appropriée qui, en contrôlant la taille des grains, la texture et l'importance des transformations ordre-désordre, favorise la mobilité des parois de domaines magnétiques [8]. Enfin, en comparaison des G.O., la densité importante des parois de Bloch facilite les effets collectifs entre domaines magnétiques ce qui entraîne une rapide inversion de l'aimantation.

Une étude de la décomposition des pertes magnétiques totales des Fe-6,5%Si fait ressortir la faible part des pertes dynamiques dans les pertes totales pour ce matériau contrairement au cas des alliages Fe-3,2%Si étudiés [7]. Ainsi à 400 Hz pour une induction de 1 T, les pertes dynamiques représentent 90% des pertes totales d'un G.O., 60% pour un N.O. et seulement 30% pour le Fe-6,5%Si recristallisé et 20% pour le Fe-6,5%Si brut de trempe.

Conclusion :

La solidification rapide rend possible l'élaboration de rubans Fe-6,5%Si. En comparaison d'alliages industriels à grains orientés ou non, les rubans avec excès de silicium ont, au delà de 150 Hz, un comportement en fréquence qui est nettement favorable. L'analyse de la décomposition des pertes dans le cas des Fe-6,5%Si montre que l'obtention de meilleures performances passe une meilleure maîtrise de la microstructure qui conditionne les pertes par hystérésis.

Références :

- [1] Tsuya N., Arai K.
J. Appl. Phys., 50 (3), p.1658, 1979
- [2] Narita K., Enokizomo M., Teshima N., Mori Y.
J.M.M.M., 19, p.143, 1980
- [3] Faudot F., Rialland J.F., Bigot J.
Physica Scripta, Vol 39, p. 263, 1989
- [4] Degauque J., Bouchara D., Fagot M., Bras J., Gannac Y.
Annales de chimie - matériaux, 16, pp.255-256, 1991
- [5] Degauque J., Fagot M., Bras J., Bouchara D., Gannac Y.
J.M.M.M., 101 (1991) 114-116
- [6] Bouchara D.
Thèse, Université Toulouse, 1990
- [7] Gannac Y.
Thèse, Université Toulouse, 1992
- [8] Altoé M.V.P., Lancarotte M.S., Cohen R., Missell F.P., Monteiro W.A., Degauque J., Fagot M.
IEEE Trans. magn., Vol MAG-27, p.5325, 1991