

Nouvelles tôles magnétiques Fe-Co “Fully Process” pour machines à grande vitesse

T. Waeckerlé¹, R. Batonnet¹, T. Wéry², F. Petit²

Aperam Alloys Imphy, 58160 Imphy, France, ¹R&D/Centre de Recherche, ²Département Feuillard

RESUME – En prenant une voie différente de celle utilisée ces dernières décennies par la formation irréversible de précipités durcissants, de nouveaux feuillards FeCo à haute limite élastique ont été mis au point récemment par un procédé spécifique HSP (High Strength Processing) basé sur un recuit défilé et un contrôle très précis de la cristallisation partielle de l’alliage industriel (jusqu’au laminé à chaud) Fe49Co49V2 (appelé AFK502 chez Aperam). Grâce à un phénomène d’amélioration de ductilité se superposant à cet état partiellement cristallisé et partiellement ordonné, nous mettons en évidence des propriétés cumulées très intéressantes pour nombre d’applications électrotechniques : limite élastique pouvant être réglée précisément jusqu’à 1000MPa même pour des feuillards très minces, découabilité aisée à la presse des rotors et stators sur ces matériaux déjà recuits (impensable après recuit statique habituel), possibilité de retrouver de très faibles pertes magnétiques si un recuit supplémentaire dédié est appliqué aux pièces découpées... Cette innovation majeure sera décrite en détail.

MOTS-CLES – FeCo, fully process, Haute limite élastique, recristallisation, propriétés magnétiques

1. Introduction : Toujours accroître la densité massique des convertisseurs électromagnétiques embarqués

Depuis quelques années, il se confirme une tendance à la montée significative en puissance électrique embarquée des avions, du fait de nombreux équipements électriques et électroniques supplémentaires, et en particulier le basculement progressif des actionneurs hydrauliques vers des actionneurs hybrides hydrauliques et électriques (EHA) puis dans un 2^{ème} temps vers des actionneurs électromagnétiques (EMA). Pour accroître de plus de 50 la puissance électrique embarquée (puissance = couple x vitesse x volume), trois pistes peuvent être empruntées avec des fortunes inégales :

- accroître le couple (en particulier lié à la structure électrotechnique et à l’approche à saturation du matériau magnétique). Malheureusement les structures de ces machines synchrones sont déjà très optimisées et l’utilisation des Fe50%Co (qui présente la saturation la plus élevée des alliages magnétiques connus) est déjà un optimum technique,

- accroître le volume de la machine (en particulier sa longueur et son diamètre) : cela se fera au prix d’un accroissement significatif des masses embarquées, ce qui est inadmissible en avionique,

- accroître la vitesse de rotation (par exemple d’un facteur 2 en passant de 12000 tr/min à 24000 tr/min) est donc la seule voie qui permette ce fort gain de puissance électrique sans accroître la masse embarquée. Cependant le cahier des charges de l’alliage en est changé car en plus des performances magnétiques, celui-ci doit fonctionner sous des forces centrifuges (proportionnelles au carré de la vitesse) beaucoup plus élevées qui doivent rester en deçà de la limite élastique des matériaux (cf. rapport FebasCo récent). Pour ces nouvelles générations, on (les acteurs industriels de ce secteur) considère habituellement que les nouvelles nuances de Fe50%Co (que nous appelons HLE pour Haute Limite Elastique) doivent disposer d’une limite élastique d’au moins 600 MPa.

Pour un tel besoin, Aperam Imphy a développé récemment une nouvelle solution à partir des mêmes alliages élaborés, puis transformés à chaud et à froid. Considérant que :

- o la limite élastique ne pouvait dépasser 500-550MPa dans de tels alliages Fe-Co polycristallins
- o l’adjonction beaucoup plus forte d’inhibiteurs de croissance (Nb, Zr...) et surtout de fine précipitation de carbures ou phases intermétalliques se ferait avec une perte considérable de performances magnétiques (pertes) et d’aimantation à saturation, ainsi qu’une réduction significative de ténacité et tenue en fatigue (c’est la voie choisie par les concurrents),

une voie nouvelle basée sur la cristallisation partielle a été mise au point..

2. Contrôle de recristallisation partielle et de propriété magnétique en recuit statique

La température de cristallisation des alliages Fe-50%Co se situe aux alentours de 720°C (pour une durée de quelques heures en recuit statique). En fait la recristallisation commence vers 670°C mais on obtient un taux de cristallisation de 100% qu'à partir de 720°C. Au delà et ce jusqu'à 900°C (transformation ferrite $\alpha \rightarrow$ austénite γ), c'est le domaine de la croissance de grains qui contrôle le compromis des propriétés mécanique et magnétique (voir précédemment). En fixant une température vers 700-720°C, le taux de cristallisation T_X (fraction surfacique de grains cristallisés) peut être contrôlé par la durée t de maintien. Les essais présentés ci-après (tableau 1), ont été réalisés à une température de 710°C en faisant varier la durée de maintien de 4 heures jusqu'à 10 minutes.

Durée	B20Oe (G)	Br/Bm	Hc (Oe)	Pertes 400Hz/2T (W/kg)	R0,2 (MPa)	T_X
10'	19430	0,86	11,0	319	896	
15'	19630	0,85	10,4	302	863	
30'	19860	0,84	8,8	257	807	20%
1h	20330	0,83	7,0	203	718	35%
2h	20860	0,81	5,1	156	629	50%
4h	21530	0,80	3,4	107	538	65%

Table 1 : Caractéristiques magnétiques et mécaniques d'un AFK502-HLE après recuit à 710°C pendant t

Comme le soulignent les micrographies (Figure 1), cette méthode de recuit basse température permet une microstructure fine, homogène, partiellement cristallisée et capable de régler la limite élastique dans une large gamme, typiquement entre 500 et 900 à 1000MPa. On notera qu'en dessous de 20% de cristallisation, il est difficile de dissocier le processus de restauration en cellules et sous-grains de la recristallisation partielle.

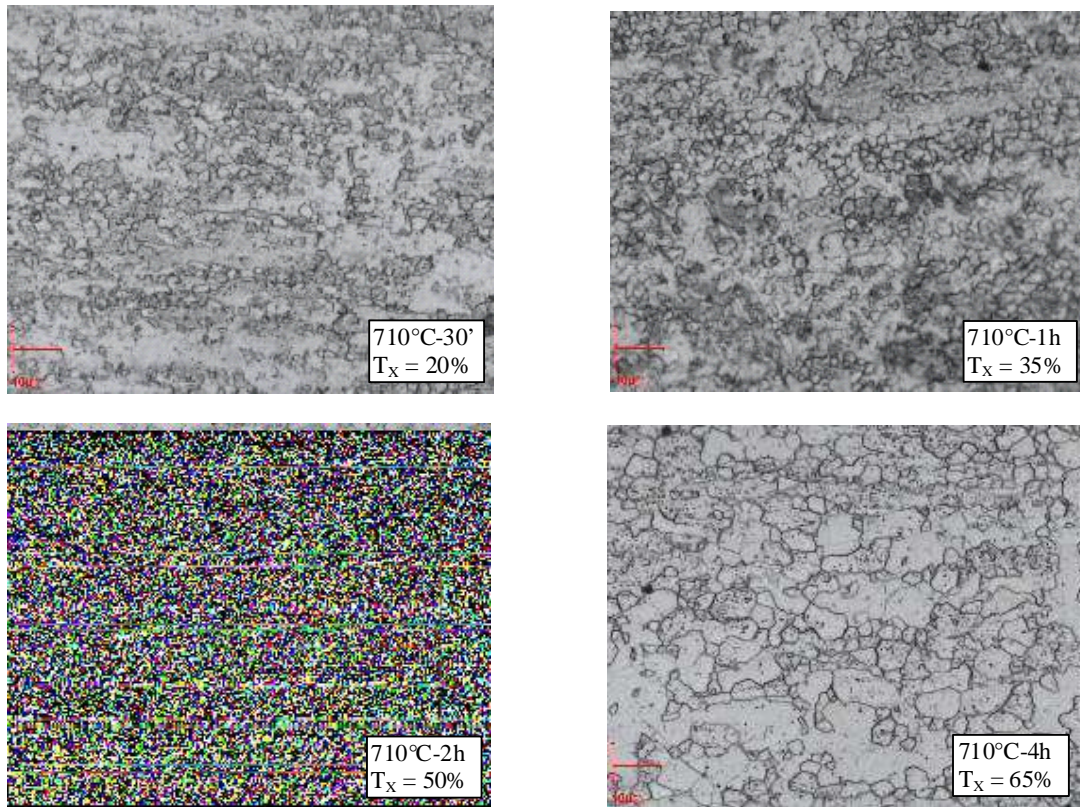


Figure 1 : Microstructures-type des différents stade de recristallisation partielle à 710°C dans le cas d'un alliage Fe-49%Co-2%V

En partant de l'hypothèse que la vitesse de croissance des germes de la recristallisation évolue à l'inverse du temps de palier ' t ', alors $\delta T_X / \delta t = D/t$ et donc : $T_X = D \cdot \ln(t) + C^{te}$ (1) si $T_X > 10-20\%$
où $D(T)$ coefficient d'autodiffusion des éléments majeurs de la matrice.

L'éq (1) est bien vérifiée en figure 2 puisque les propriétés magnétiques et mécaniques en découlent de façon linéaire depuis l'état écroui : $R_{0,2}(t) = (R_{0,2})_{\acute{e}cr} - C^{te} \cdot T_X(t)$ (2) et $H_c(t) = (H_c)_{\acute{e}cr} - C^{te} \cdot T_X(t)$ (3)

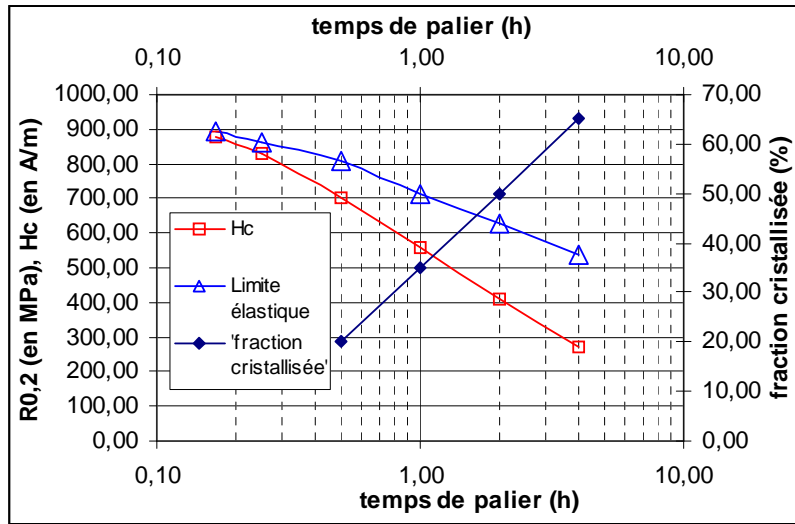


Figure 2 : Evolution de la limite élastique, du champ coercitif et de la fraction cristallisée en fonction du temps de palier à 710°C dans un alliage Fe-49%Co-2%V

3. Passage nécessaire au recuit au défilé

La table 1 montre qu'il est possible d'atteindre des limite élastique de près de 1000MPa simplement en réduisant la durée de recuit statique à 10'. On aurait ainsi par contrôle du temps de recuit statique entre quelques minutes et quelques heures toute la gamme des compromis souhaitables (dans les différentes applications) de propriétés mécaniques et magnétiques. Malheureusement un recuit statique correspond à la montée en température d'une bobine enroulée massive de 1 à plusieurs tonnes et c'est donc l'inertie thermique qui commande l'homogénéité de température dans la bobine : soit le recuit est rapide mais par inhomogénéités thermiques les propriétés en seront très hétérogènes, soit l'homogénéité thermique est à chaque instant obtenue (vitesse de chauffe et refroidissement) et alors des temps de court de recuit ne peuvent être atteint. Les temp courts en recuit statique ne sont donc pas possible de façon homogène sur des bobines industrielles. La seule solution est donc d'opérer en recuit au défilé.

La figure ci-dessous montre les résultats comparés entre recuit statique conventionnels, recuit statique de laboratoire basse température et recuit au défilé. Ce dernier permet de façon surprenante de gagner encore significativement en performance par rapport au recuit statique. Nous expliquerons l'origine de cette amélioration.

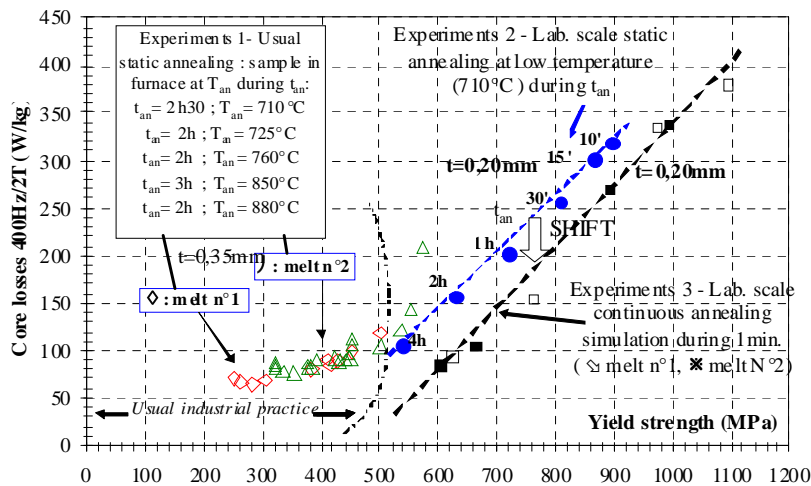


Figure 3 : comparaison des différents types de recuit final (statique conventionnel, statique de courte durée basse température et recuit défilé) du Fe-49%Co-2%V (AFK502) dans un diagramme Pertes magnétique-limite élastique.

4. Propriétés de l'AFK502 Fully Process

Ce nouveau matériau n'est pas l'aller ego des FeSi Fully Process puisqu'il n'est pas complètement cristallisé. L'état 100% cristallisé peut-être aussi obtenu par le recuit au défilé bien sûr, mais alors il devient de plus en plus fragile. Le procédé de cristallisation partielle non fragile de l'AFK502 couvre donc tous les stades de la recristallisation jusqu'à la disparition des dernières portions de métal non cristallisé, mais pas au delà, ce qui correspond à une limite élastique de 500-600 MPa à plus de 1000 MPa. Cela correspond aux demandes actuelles des nouvelles génératrices ou actionneur à grande vitesse, tournant à plus de 30 000tr/min.

Nous verrons aussi que le procédé utilise également de façon très profitable la vitesse de refroidissement du recuit au défilé pour obtenir une grande aptitude à la découpe, au poinçonnage, à l'estampage...des feuillards HSP.

Nous verrons que le procédé HSP ainsi développé sur des bandes d'alliages Fe-Co industrielles jusqu'au stade laminé à froid, permet de découper des rotor et stator avec une limite élastique désirée entre 500 et 1000MPa, et ensuite de recuire statiquement les stators seulement pour leur donner de basses pertes magnétiques. Une telle performance n'est pas possible avec les feuillards FeCo à haute limite élastique actuelle.

Nous verrons que le procédé HSP permet de découper des profils en E ou I de transformateur, qui ne se déforment pas du tout après le recuit statique final de minimisation des pertes magnétiques.

Nous verrons que le procédé HSP permet – à limite élastique imposée – d'offrir les plus basses pertes magnétiques accessibles sur le marché.

Nous examinerons ces différentes propriétés en partant des bases physiques et métallurgiques. Nous mettrons en perspective ces propriétés obtenues simultanément par rapport aux produits connus actuellement.

5. Conclusion

Le recuit au defile apparait comme la bonne méthode pour produire de façon efficace des feuillards FeCo équiatomique (donc haute saturation magnétique) fournissant à la fois une haute limite élastique réglable par le taux de fraction cristallisée et les paramètres de recuit, un comportement ductile à la découpe, et enfin un compromis pertes magnétiques-limite élastique amélioré par rapport aux autres solutions connues. Enfin la dépendance linéaire des propriétés par rapport à la fraction cristallisée démontre la prédisposition de ce procédé au défilé pour une exploitation industrielle efficace.

Il est maintenant démontré qu'un tel procédé HSP peut fournir sur outils industriels une limite élastique contrôlée entre 500 et 1000MPa , des pertes magnétiques très faibles sur certaines des parties découpées à partir de ce produit HSP, grace à un simple recuit supplémentaire statique, une grande stabilité géométrique des pieces découpées dans ce produit HSP après un recuit supplémentaire de minimisation des pertes magnétiques.

6. Références

- [1] T. Waeckerlé, "Soft Magnetic Iron Cobalt Materials: Properties and Recent Developments", proc. WMM'12 Ghent, June 2013, p. 208.
- [2] D. Gautard et al., "50-50 CoFe alloys – Magnetic and Mechanical Properties, J.M.M.M. 160 (1996) pp. 359-362
- [3] D. R. Thornburg, "High-Strength High Ductility Cobalt-Iron Alloys", J Appl. Phys., **40**, (1969), pp. 1579–80
- [4] B. Nabi et al., "Effect of recrystallization and degree of order on the magnetic and mechanical properties of soft magnetic FeCo-2V alloy", Mat. Sci. Eng. A. 578 (2013), pp. 221-215
- [5] T. Sourmail, "Evolution of strength and coercivity during annealing of FeCo based alloys", Scripta Mat., **51**, (2004), pp. 589-591

7. Soumission de la communication

La soumission se fait en ligne à partir du site électronique de la conférence : <http://sge2014.sciencesconf.org/> (voir la rubrique 'Soumission en ligne des communications').

Le fichier soumis sera préalablement converti au format PDF avec les polices incorporées et ne devra pas excéder la taille maximale de 2Mo.