



Avis de Soutenance

Monsieur SHUOHONG GAO

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **jeudi 09 décembre 2021** à 10h00

Lieu : UTBM, Campus de Sevenans, rue de Leupe, 90400 SEVENANS

Salle : Grand Salon (Château)

Titre des travaux : Procédé de fabrication additive et caractérisation des alliages magnétiques doux Fe-Si

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 28

Unité de recherche : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Directeur de thèse : Nour-Eddine FENINECHE

Codirecteur de thèse : Hanlin LIAO HDR NON HDR

Soutenance : Publique A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Nour-Eddine FENINECHE	Professeur	University of Technology of Belfort-Montbéliard	Directeur de thèse
M. Moataz ATTALLAH	Professeur	The Advanced Materials Processing Lab. (AMPLAB), IRC in Materials Processing School of Metallurgy & Materials, University of Birmingham	Rapporteur
M. Mourad CHERIF	Professeur	LSPM, Université Paris 13, France	Rapporteur
M. Hanlin LIAO	Professeur	University of Technology of Belfort-Montbéliard	Co-directeur de thèse
M. BADJI RIAD	Directeur de recherche	Centre de Recherches en Technologies Industrielles	Examineur
M. Xingchen YAN	Maître de conférences	Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences	Examineur

Mots-clés : Fusion sélective par laser, Alliages magnétiques doux, Propriétés magnétiques orientées, Evolution microstructurale, Propriétés magnétiques douces, Propriétés mécaniques

Résumé de la thèse (en français) :

Les alliages fer-silicium (Fe-Si), également appelés aciers au silicium, sont les plus largement utilisés en raison de leurs excellentes propriétés magnétiques douces et de leurs coûts économiques. Afin d'explorer et de développer de nouvelles voies pour la fabrication d'alliages Fe-Si, l'étude des microstructures et des propriétés des alliages Fe-Si SLMed à partir de poudres pré-alliées a été présentée dans ce travail. Les conclusions de ce travail sont énumérées ci-dessous. Après avoir adopté une série d'expériences et de caractérisation, sous une densité d'énergie linéaire optimale, des spécimens SLMed Fe-3Si avec une bonne rugosité de surface, une faible porosité relative, et sans fissures peuvent être obtenus. La microstructure des pièces SLMed présentait une structure colonnaire typique avec une croissance orientée dans le sens de la construction. L'alliage Fe-3wt.%Si produit par SLM présentait une seule phase Fe-bcc, une texture cubique $\{100\}\langle 001\rangle$, c'est-à-dire une texture $\langle 001\rangle$ le long de la direction de construction (BD). L'allongement à la rupture (EL) de l'éprouvette a atteint 8,8%, la résistance à la traction moyenne (UTS) et la limite d'élasticité (YS) sont respectivement de 562 Mpa, 445 Mpa. Un mode mixte de rupture ductile et fragile est le principal mécanisme de rupture pour l'alliage SLMed Fe-3wt.%Si. Une série de traitements de recuit avec différents temps de séjour et températures de recuit ont été adoptés. Les résultats montrent qu'un recuit effectué à 1000 °C pendant 3 h, a provoqué à la place une croissance marquée des grains. Au fur et à mesure que le temps de séjour augmentait à 5h, par comparaison avec l'échantillon AT1000/3h, les grains n'ont pratiquement pas augmenté de manière significative. Les propriétés magnétiques de l'aimant SLMed Fe-3wt.%Si pourraient être considérablement améliorées, en attribuant de manière appropriée à la croissance du grain et à la libération des contraintes via la combinaison température-temps de recuit soumise. Afin d'étudier les effets de la teneur en silicium sur les microstructures et les propriétés des aciers au silicium SLMed, les pré-alliés avec des teneurs en silicium de 3,5 % en poids, 4,5 % en poids et 5,5 % en poids ont été sélectionnés. Les résultats expérimentaux ont révélé qu'avec l'augmentation de la teneur en silicium, la microségrégation du silicium dans les échantillons SLMed devient plus grave, en particulier à la limite du bain en fusion. La perméabilité maximale relative augmente avec l'augmentation de la teneur en silicium, à la fois la coercivité et les pertes de puissance diminuent avec l'augmentation de la teneur en silicium. L'induction magnétique de saturation présente une tendance légèrement décroissante tandis que la rémanence présente une tendance croissante. L'augmentation de la teneur en Si a un effet positif sur la résistance tout en endommageant la ductilité de l'acier au silicium SLMed, ce qui se traduit par la microdureté la plus élevée et l'UTS moyen le plus élevé tout en étant la moyenne la plus basse au sein de ces trois types d'aciers au silicium. La rupture fragile est le mécanisme de rupture dominant pour les trois types actuels d'aciers au silicium SLMed. Les échantillons SLMed tels que construits et recuits pour trois types d'aciers au silicium sont caractérisés par une seule phase bcc, aucune transformation de phase évidente n'est présentée pendant le traitement recuit. Le traitement recuit entraînant une croissance des grains et un soulagement des contraintes pour trois types d'aciers au silicium, en tant que tels, leurs propriétés magnétiques complètes sont également améliorées. Le comportement de recuit n'est pas considérablement modifié par les variations de la chimie de l'alliage de la teneur en Si.

Abstract (in English):

Iron silicon (Fe-Si) alloys, also named silicon steels, are the most widely used owing to their excellent soft magnetic properties and economic costs. As electronic devices become diversified and automated, it is urgent to develop high-performance soft magnetic alloys with good reliability. For functional soft magnetic alloys, the SLM technique shown the potential to manufacture soft magnetic components directly from raw materials, such as the rotor and stator of the motor. In order to explore and develop new routes for manufacturing Fe-Si alloys, the investigation into the microstructures and properties of SLMed Fe-Si alloys from pre-alloyed powders was presented in this work. The most important finding in this work is listed in the following. After adopting a series of experiments and characterization, under optimal linear energy density, SLMed Fe-3 wt.%Si specimens with good surface roughness, low relative porosity, and without cracks can be obtained. The microstructure of the SLMed parts exhibited a typical columnar structure with an oriented growth of building direction. The SLM-produced Fe-3wt.%Si alloy presented a single Fe-bcc phase, a $\{100\}\langle 001\rangle$ cubic texture in our study, i.e. a $\langle 001\rangle$ texture along the building direction (BD). Hence, in the printing coordinate system, the three directions of X, Y, and Z are contained in the axis that is easy to be magnetized, the alloy had isotropy magnetic properties at these three measured directions (X, Y, and Z). The elongation at break (EL) of the specimen reached 8.8%, the average ultimate tensile strength (UTS) and Yield strength (YS) are 562 Mpa, 445 Mpa, respectively. A mixed-mode of ductile and brittle failure is the main rupture mechanism for SLMed Fe-3wt.%Si alloy. A series of annealed treatments with different dwell times and annealed

temperatures were adopted. The results show that annealing conducted at 1000 °C for 3 h, caused instead a marked grain growth. As the dwell time increased to 5h, by the comparison of the AT1000/3h sample, the grains almost did not grow further significantly. The magnetic properties of the SLMed Fe-3wt.%Si magnet could be comprehensively enhanced, attributing to grain grew and stress release via submitted annealing temperature-time combination appropriately. To investigate the effects of silicon content on the microstructures and properties of SLMed silicon steels, the pre-alloyed with silicon contents of 3.5wt.%, 4.5wt.%, and 5.5wt.% were selected. Experimental results revealed that with the increase of silicon content, the micro segregation of silicon in SLMed samples becomes more serious, especially at the boundary of the molten pool. The relative maximum permeability increases with the increase of silicon content, both coercivity and power losses decrease with the increase of silicon content. The saturation magnetic induction exhibits a slightly decreasing trend while the remanence is shown an increasing trend. The increase of Si content has a positive effect on the strength while damages the ductility of the SLMed silicon steel, resulting in the highest microhardness and the highest average UTS while the lowest average within these three types of silicon steels. Brittle fracture is the dominant fracture mechanism for the present three types of SLMed silicon steels. Both the SLMed as-built and annealed samples for three types of silicon steels are characterized by a single bcc-phase, no obvious phase transformation is presented during annealed treatment. The annealed treatment resulting in grain growth and stress relief for three types of silicon steels, as such, their comprehensive magnetic properties are also improved. The annealing behavior is not dramatically altered by variations in alloy chemistry of Si content.