

Germination d'endommagement sur les impuretés dans un alliage d'aluminium recyclé étudiée par nano-tomographie in-situ

Gabrielle VERNET^{a, b}, Henry PROUDHON^a, Maryse GILLE^a, Gustavo PINZON^c, Fanny MAS^b,
Thilo F. MORGENEYER^a

^a Centre des Matériaux, MINES Paris, Université PSL, CNRS UMR 7633, Versailles, France

^b Constellium C-TEC, Parc Economique Centr'Alp, Voreppe, France

^c European Synchrotron Radiation Facility, 71 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, France

L'augmentation du taux de recyclage dans les alliages d'aluminium est un levier essentiel pour réduire l'empreinte carbone de la production de véhicules automobiles. Cependant, cette augmentation peut accroître le taux d'impuretés, notamment du fer, dans les alliages et affecter la formabilité du matériau.

Cette étude porte sur l'effet des particules intermétalliques riches en fer sur les mécanismes d'endommagement et la ductilité d'un alliage d'aluminium recyclé à l'état T4 sollicité en déformation plane. Des essais en nano-tomographie in-situ ont été réalisés au synchrotron sur plusieurs alliages pour observer l'évolution de l'endommagement dans le matériau à l'échelle nanométrique. Trois tailles de voxel ont été choisies pour les scans : 241 nm, 200 nm et 75 nm.

Un suivi des particules et des porosités au cours de l'essai a été implémenté grâce à des méthodes de corrélation volumique d'images (DVC) pour identifier les mécanismes de germination de l'endommagement liés aux particules. Environ 3000 porosités et 5000 particules ont été suivies pour quantifier les mécanismes observés. La taille des particules ressort comme l'un des paramètres qui influencent le plus la germination par rupture des particules. Leur forme, nature et particules et porosités initiales voisines jouent également un rôle majeur en favorisant la concentration de contraintes dans la particule menant à sa rupture. La distribution en clusters de particules favorise ensuite la coalescence entre porosités initiales et nouvellement germées au sein d'un cluster et mène à la rupture finale du matériau.

Propriétés et utilisation du 6061-T6 dans le nucléaire

Jérôme Garnier

Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherches Matériaux et procédés Avancés, 91191, Gif-sur-Yvette, France

Grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques à basse température, leur résistance à la corrosion et leur transparence neutronique, les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans les réacteurs de recherche nucléaire.

Pour sa polyvalence, l'alliage d'aluminium 6061-T6 a été retenu pour la fabrication des principaux composants du réacteur d'irradiation de matériaux RJH. Plusieurs travaux de thèse ont ainsi été menés afin de mieux comprendre les relations entre élaboration, microstructure, propriétés mécaniques et stabilité sous irradiation.

Cet alliage présente différents types de précipités : des précipités β'' assurant le durcissement structural, des dispersoïdes riches en chrome et en manganèse contrôlant la taille des grains, ainsi que des phases grossières de type Mg_2Si et des intermétalliques riches en fer.

Cet exposé montrera comment ces différentes phases contrôlent le comportement mécanique et la tenue sous irradiation de l'alliage.

Evaluation de la ténacité d'éprouvettes mSENB en aciers nanorenforcés (ODS) : influence de l'épaisseur sur les valeurs de ténacité.

Romain Dassonneville^{1,2}, J. Garnier¹, E. Pons¹, B. Raïs, Y. de Carlan¹, J. Besson²

¹Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherches Matériaux et procédés Avancés, 91191, Gif-sur-Yvette, France

² Centre des Matériaux, MINES Paris, Université PSL, CNRS UMR, 7633, Versailles, France

Grâce à leur haute résistance en traction et en fluage à haute température, les aciers renforcés par nano-dispersion d'oxydes, dits « ODS », sont envisagés comme matériau de gainage pour les réacteurs de quatrième génération. Néanmoins, le haut niveau de renforcement de ces aciers s'accompagne d'une réduction de leur ductilité et de leur ténacité ; qu'il convient d'étudier. Afin d'évaluer la ténacité des gaines de combustible de 500 μm d'épaisseur, il est nécessaire d'estimer d'éventuels effets de l'épaisseur sur les valeurs de ténacité conventionnelle obtenues. En effet, il est mentionné dans la littérature, qu'à de faibles épaisseurs, la ténacité conventionnelle n'est plus nécessairement intrinsèque au matériau. Elle peut dépendre des dimensions de l'éprouvette. Aussi des essais de ténacité par flexion trois points sur des éprouvettes SENB (*Single Edge Notched Bend specimen*) miniaturisées, dites mSENB, ont-ils été réalisés à des épaisseurs variant entre 3 mm et 0,5 mm pour un acier ODS 9Cr obtenu par compaction isostatique à chaud (H29) et un acier ODS 14Cr filé (K72M2). Ces deux aciers présentent des microstructures très différentes. En effet, alors que l'acier 9Cr possède une microstructure isotrope sans orientation préférentielle ; l'acier ODS 14 Cr présente une microstructure fibrée avec des grains allongés selon la direction de filage.

En raison des faibles épaisseurs considérées, certaines éprouvettes ne respectent pas les critères géométriques imposés par les normes ISO 12135 et ASTM E1820 - le ratio largeur W sur épaisseur B n'est notamment plus compris entre 1 et 4 - ; il a été nécessaire de réaliser des simulations éléments finis afin de déterminer les fonctions utiles à l'analyse des essais. Ces simulations ont été réalisées sur le logiciel éléments finis CAST3M. Il a été montré, que le domaine d'application des fonctions présentes dans les normes, pouvait être étendu à l'ensemble des éprouvettes considérées dans cette campagne d'essai. L'ensemble des essais de ténacité a , de ce fait, été analysé à l'aide des fonctions usuelles présentes dans les normes ISO 12135 et ASTM E1820. Par ailleurs, d'autres simulations éléments finis ont été effectuées sur le logiciel Zset afin d'approfondir la compréhension des essais expérimentaux. Par exemple, une étude sur l'influence du décentrage de l'éprouvette sur la mesure de sa raideur a été réalisée. De plus, un modèle d'endommagement de type GTN a été introduit afin de simuler la propagation de la fissure au cours des essais. Les paramètres de ce modèle doivent être encore néanmoins ajustés.

Expérimentalement, plusieurs essais mSENB ont été réalisées pour chaque épaisseur, dont certains ont été interrompus afin d'étudier l'évolution de la forme du front de fissure. Ce dernier apparaît sous forme de chevron pour des épaisseurs inférieures à 0,6 mm et à 1,5 mm pour l'acier 14 Cr et 9 Cr respectivement. Des études, en cours, sont menées afin de déterminer quelle est la longueur de fissure équivalente à ce chevron. Finalement, en termes de ténacité conventionnelle, il semble difficile de conclure à un réel effet de l'épaisseur pour l'acier ODS 14 Cr. En effet, les résultats de ces essais ne laissent pas apparaître une tendance claire. A noter, que l'analyse de ces essais est relativement compliquée ; dans la mesure où un changement dans le comportement macroscopique de l'acier avec l'épaisseur, ainsi que des pop-ins, ont été observés. L'acier ODS 9 Cr ne présente pas, quant à lui, de pop-ins et l'ensemble des ruptures sont stables. Une tendance moins bruitée semble se dégager de l'analyse de ces essais.

Comportement et microstructure des fers puddlés

Maxime Vignes^{1,2}, Anne-Françoise Gourgues-Lorenzon¹, Matteo Porrino²

¹ UMR 7633, Département Ingénierie, Centre des Matériaux - CMAT, Mines Paris - PSL, 21 allée des Marronniers 78000 Versailles

² Laboratoire Géométrie-Structure-Architecture – GSA, École nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais, 14 rue Bonaparte 75006 Paris

Résumé :

Le fer puddlé est un matériau très représentatif de la révolution industrielle et de la construction au XIX^e siècle, tant pour son utilisation dans les chemins de fer que dans les ponts et les charpentes métalliques à usage civil. Le procédé mis en œuvre à cette époque induit une hétérogénéité microstructurale et chimique significative. Cette hétérogénéité nécessite des volumes élémentaires représentatifs (VER) plus étendus que pour les métaux modernes, ce qui rend les analyses complexes et très invasives pour des structures parfois classées en tant que monuments historiques. Cette étude s'intéresse au comportement mécanique et aux hétérogénéités chimiques du fer puddlé (notamment par des taux de phosphore très élevés comparé aux aciers modernes), dans une démarche de prélèvement minimisant l'impact sur la structure tout en garantissant autant que possible un VER.

Une étude sur des matériaux de synthèse issus de la littérature montre l'influence du phosphore dans une matrice ferritique^[1]. Cet élément renforce la solution solide dans la ferrite et peut réduire la cohésion aux joints de grains, ce qui provoque des ruptures intergranulaires. Plus la concentration de phosphore est élevée dans la matrice, plus la résistance à la déformation plastique et la dureté augmentent, au détriment de l'allongement à rupture et de la striction, qui sont alors réduits.

Un ensemble d'observations à multiples échelles macro/micro de la microstructure a permis de définir un VER aussi peu invasif que possible pour la structure. Des essais de traction instrumentés ont été réalisés pour visualiser et mesurer les hétérogénéités du champ de déformation. Elles ont permis de montrer le comportement à la fois ductile et fragile du matériau. Les analyses *post mortem* des éprouvettes ont permis d'identifier les points de fragilité et les autres sites d'amorçage de fissure, afin de comprendre le processus d'endommagement jusqu'à la rupture.

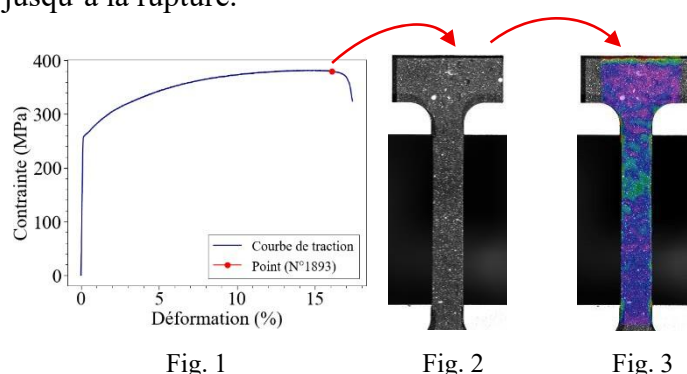


Figure 1-3, de gauche à droite : Courbe de traction d'une éprouvette de fer puddlé ; Suivi par caméra optique à l'étape proche de la rupture et suivi du champ de déformation principale maximale ϵ_1 .

Références :

[1] J. W. Stewart, J. A. Charles, E. R. Wallach, « Iron–phosphorus–carbon system: Part 1 – Mechanical properties of low carbon iron–phosphorus alloys », *Materials Science and Technology*, vol. 16, no 3, p. 275-282, mars 2000, doi: 10.1179/026708300101507839.