

Recyclage d'alliages de titane de qualité aéronautique par le procédé PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining)

S. HANS

Aubert & Duval, 63770 Les Ancizes

Mots clés : titane ; recyclage ; fusion ; affinage ; inclusion

Résumé

Le recyclage d'alliages de titane pour applications aéronautiques représente un enjeu majeur pour préserver les ressources, diminuer l'empreinte carbone et maîtriser les approvisionnements. La fusion et l'affinage du métal liquide sont réalisés par les procédés d'affinage en creuset froid comme le PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining). Par la criticité des applications aéronautiques de ces alliages une compréhension fine des phénomènes physiques mis en jeu et la maîtrise des conditions de fusion / affinage sont nécessaires. La démarche d'étude visant à maîtriser l'homogénéité chimique et l'élimination des inclusions est présentée.

1. Introduction

Les alliages de titane sont classiquement élaborés en « voie synthèse » à partir d'éponges de titane, issues de la chloration et réduction par le magnésium de minerais d'oxyde titane, et d'additions d'éléments d'alliages avant réalisation de plusieurs refusions à l'arc sous vide (procédé VAR : Vacuum Arc Remelting). Les lingots d'alliages obtenus sont utilisés pour de nombreuses applications après transformation à chaud en demi-produits ou pièces, générant des co-produits massifs ou des copeaux d'usinage. Dans l'industrie aéronautique on estime que le « buy to fly ratio » (poids des pièces rapporté à celui du demi-produit) peut atteindre un facteur huit ce qui illustre le gisement et l'intérêt de recyclage [1]. Par ailleurs on estime également que l'émission de CO₂ est réduite d'un facteur quatre entre la « voie synthèse » et la « voie recyclée » [2]. Une solution européenne d'élaboration d'alliages de titane de qualité aéronautique à partir de recyclage a été mise en place en 2017 sur la base de l'économie circulaire (collecte et traitement des copeaux en France et en Europe). Cette filière se concrétise notamment par un atelier de fusion PAMCHR suivie d'une refusion VAR au sein de l'usine EcoTitanium d'Aubert & Duval. Pour appuyer ce développement, l'IRT-M2P de Metz s'est équipé d'un four PAMCHR pilote au sein de la plateforme Metafensch rendant ainsi possible une activité de R&D expérimentale.

2. Démarche d'étude expérimentale et numérique

L'obtention de la qualité requise pour les applications aéronautiques, notamment l'homogénéité chimique et l'élimination des inclusions, nécessite une compréhension fine des

phénomènes physiques mis en jeu et la maîtrise des conditions de fusion et d'affinage du métal liquide. La démarche d'étude entreprise est basée sur des expérimentations réalisées à échelle pilote permettant de mieux comprendre l'effet des actionneurs sur le comportement du métal liquide, d'évaluer les conditions aux limites et fournir des éléments de validation à une approche complémentaire de modélisation prise en charge par l'Institut Jean Lamour de Nancy [3]. Les modèles développés sont ensuite utilisés pour optimiser le pilotage du four industriel EcoTitanium [4].

3. Maîtrise de la chimie

Les procédés de fusion par creuset froid étant semi-continus il n'est pas possible d'ajuster la composition au cours de la fusion. La maîtrise de l'homogénéité chimique finale dépend donc de la composition du lit de fusion (qualité des co-produits massifs et copeaux dégraissés), de la capacité de mélangeage au sein des puits liquide du PAMCHR et du VAR, des pertes éventuelles par évaporation et de la ségrégation des éléments d'alliage lors de la solidification. L'influence de ces mécanismes est étudiée et illustrée.

4. Elimination des inclusions

L'élimination totale des inclusions de type HDI (High Density Inclusion) notamment les fragments d'outils d'usinage de type carbures de tungstène, et HID (High Interstitial Defect) composés de titane enrichi en éléments interstitiels tels que l'azote, l'oxygène ou le carbone est obligatoire pour les applications aéronautiques. La capacité du procédé doit être démontrée par la réalisation d'une coulée «ensemencée» par des inclusions synthétiques. Le comportement et les mécanismes d'élimination de ces inclusions sont étudiés et illustrés.

5. Conclusions / Perspectives

Les procédés de recyclage des alliages de titane sont opérationnels industriellement mais nécessitent une maîtrise particulière et des qualifications spécifiques pour garantir les exigences pour une application aéronautique. Les perspectives de développement portent sur la capacité à augmenter le taux de recyclage, par exemple par la fusion de pièces en fin de vie, et sur l'amélioration de la surveillance du procédé.

Remerciements

Je tiens à remercier A. Biagi et R. Allier (Aubert-& Duval) ainsi que JP. Bellot (Institut Jean Lamour) pour leur aide à la réalisation de cette présentation.

Références

- [1] F. Delon, *EADS Perspectives on Titanium Raw Material Market*, Journées Technologiques de Titane, Nantes, France, 2012
- [2] M. Eckelman et al, *Life cycle carbon benefits of aerospace alloy recycling*, Journal of Cleaner Production, 2014
- [3] N. McDonald, E. Doridot, S. Hans, J. Delfosse, L. Decultot, JP. Bellot, A. Jardy, *Elimination of defects in titanium using PAM-CHR melting*, Conférence LMPC 2022
- [4] E. Doridot, S. Hans, JP. Bellot, A. Jardy, *Industrial applications of modelling tools to simulate the PAMCHR casting and VAR process for Ti64*, Conférence Titane Nantes 2019