

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Optimisation des propriétés de gradients microstructuraux et chimiques dans des superalliages γ/γ'

Référence : **MAS-DMAS-2025-13**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 01/07/2025

Mots clés

Superalliage, frittage flash, gradient microstructuraux, interphase, aéronautique

Profil et compétences recherchées

Mécanique des milieux continus, métallurgie, Ecole ingénieur ou Universitaire avec Master II

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le développement de matériaux de plus en plus résistants à haute température et sous diverses sollicitations est un challenge actuel du secteur aéronautique. Les pièces tournantes telles que les disques de turbine, sur lesquels sont fixées les aubes, situés à la sortie de la chambre de combustion, subissent des sollicitations mécaniques complexes à moyenne et haute température. Au niveau de l'alésage, les propriétés dimensionnantes des disques sont principalement la traction et la fatigue alors qu'en périphérie, où la température est la plus élevée, elles évoluent pour tendre vers le fluage [1]. Actuellement les disques utilisés sont constitués d'un mono superalliage γ/γ' ayant une microstructure équiaxe homogène et présentant le meilleur compromis entre les propriétés demandées pour le cahier des charges à la fois de la zone d'alésage et de la zone périphérique.

Pour augmenter les performances des disques de turbine élaborés par métallurgie des poudres, des études ont été menées par les industriels pour optimiser les propriétés dimensionnantes de chaque zone via des adaptations microstructurales localisées. Cela est notamment réalisé par des traitements thermiques dans des fours à gradient où la température dans la zone périphérique est supérieure à celle de solvus de la phase γ' alors qu'elle reste inférieure dans la zone de l'alésage. On assiste alors à une croissance de taille de grain dans la zone principalement sollicitée en fluage tandis que la taille de grain reste constante dans la zone sollicitée en traction, la microstructure obtenue est appelée microstructure duale [2]. Toutefois cette technique est coûteuse car elle nécessite des installations dédiées. De plus la fenêtre de traitement thermique au-dessus de la température de solvus est souvent faible, ce qui nécessite un contrôle de la température précis.

Ce travail de thèse vise à explorer une nouvelle voie originale pour l'élaboration de disque à microstructure duale à partir d'une combinaison de deux superalliages chimiquement et microstructuralement différents par la technique de frittage flash. La zone sollicitée en traction, l'alésage, sera ainsi composée d'un superalliage optimisé chimiquement pour la traction avec une faible taille de grain alors que la zone sollicitée en fluage, la périphérie, sera composée d'un superalliage optimisé chimiquement pour le fluage avec une taille de grain élevée. De plus, les deux superalliages seront choisis judicieusement pour obtenir une température de traitement thermique d'homogénéisation unique de l'assemblage facilitant la croissance de grain pour l'alliage sollicité en fluage tout en limitant cette croissance pour l'alliage sollicité en traction. Cette voie d'obtention de la microstructure duale est l'une des innovations de cette étude.

La transition entre les deux zones de l'assemblage se fera de manière douce avec une zone mixte. Dans cette zone mixte, la microstructure sera composée à la fois de deux populations de taille de grain, appelée microstructure harmonique [3], mais aussi de deux compositions chimiques de superalliages en contact par une zone de diffusion courte appelée interphase [4]. Ces deux caractéristiques innovantes de la zone mixte devraient à la fois procurer une ductibilité élevée [3] mais aussi un durcissement supplémentaire [4].

Les travaux de thèse comporteront différents volets expérimentaux et de modélisation.

Pour caractériser et optimiser les gradients chimiques et microstructuraux, la zone mixte sera étudiée dans le détail et à différentes échelles (microscopie électronique à balayage, microscope électronique à transmission, sonde atomique tomographique, ...). Ce point central permettra de comprendre les effets de l'interphase et de la microstructure harmonique sur les propriétés mécaniques, notamment à haute

température, avant et après traitements thermiques afin de déterminer le meilleur compromis d'un point de vue mécanique entre ces deux types de gradient.

Suite à la compréhension des effets caractéristiques de la zone mixte, des caractérisations mécaniques à haute température seront réalisées. Celles-ci permettront d'évaluer le comportement mécanique de la zone mixte sous différentes sollicitations. En complément, les zones aux extrémités de l'assemblage seront aussi évaluées mécaniquement à savoir, la zone à gros grains de l'alliage optimisé en fluage et la zone à petit grains de l'alliage optimisé en traction.

Ces caractérisations mécaniques permettront de modéliser le durcissement de chacune des zones et d'optimiser l'assemblage des différentes zones. L'assemblage en découlant devrait permettre d'obtenir une pièce répondant au mieux au cahier des charges des disques de turbines.

[1] R. C. Reed, *The Superalloys : Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2006

[2] R.J. Mitchell *et al.*, *Process Development & Microstructure & Mechanical Property Evaluation of a Dual Microstructure Heat Treated Advanced Nickel Disc Alloy*, *Superalloys 2008*, TMS, 323-329, 2008.

[3] Z. Zhang *et al.*, *Improvement of mechanical properties in SUS304L steel through the control of bimodal microstructure characteristics*, *Materials Science & Engineering A*, 598, 106-113, 2014.

[4] M. Laurent-Brocq *et al.*, *Chemical architecturation of high entropy alloys through powder metallurgy*, *Journal of Alloys and Compounds*, 835, 155279, 2020.

Collaborations envisagées

Avec l'ICMPE dans le cadre du LRC MAXIT

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Thibaut Froeliger

Tél. : 01 46 73 48 92 Email : thibaut.froeliger@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Mathilde Laurent-Brocq

Laboratoire : ICMPE

Tél. : 01 56 70 30 65

Email : mathilde.laurent-brocq@cnrs.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>