



ÉMINAIRE du 23 novembre 2012

Centre des Matériaux - Évry

## Superalliages à base nickel : microstructures et propriétés mécaniques

J.Y. GUÉDOU, M. REVAUD, A. DEVAUX, A. DUMONT

---

### *Les superalliages base Ni, matériaux indispensables dans les turbomachines aéronautiques*

Jean-Yves Guédou

Responsable Recherche Matériaux et Procédés, Conseiller scientifique  
SNECMA – Groupe SAFRAN

Le développement des machines thermiques pour la production d'énergie (turbines à vapeur puis à gaz) dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle a entraîné le développement d'alliages métalliques pouvant tenir à haute température. L'addition d'aluminium puis de titane dans le nickel au cours des années 1920 – 1930 a été le début de la grande aventure des superalliages base Ni. L'industrie des turbines aéronautiques naissante avant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale a constitué un formidable essor pour ces matériaux. Dans les années 50, la mise au point de nouveaux outils de caractérisation (microscope électronique ...) ainsi que de moyens d'élaboration performants (four sous vide ...) a permis d'une part de comprendre les modes très spéciaux de durcissement à chaud de ces alliages et d'autre part de mettre au point des nuances toujours plus performantes. Un large spectre de température d'emploi a pu être défini par la mise en oeuvre de compositions pour alliages de fonderie destinés aux hautes températures et d'alliages corroyés présentant de très haute résistance. Les années 60-70 se sont révélées un véritable âge d'or pour ces matériaux avec les travaux de nombreux métallurgistes et la mise sur le marché de compositions toujours utilisées comme l'INCO718 ou le Waspaloy. La possibilité de pousser ces matériaux vers les plus hautes températures pour ceux mis en oeuvre par voie coulée ou vers les résistances très élevées pour les nuances corroyées ne s'est pas démentie durant les dernières décennies et aujourd'hui encore, des nouvelles compositions d'alliages pour solidification monocristalline ou pour mise en oeuvre par voie forgeage, qu'ils s'agissent d'alliages conventionnels comme le 718PLUS ou l'AD730 ou d'alliages élaborés par métallurgie des poudres comme le N19.



# *Étude microstructurale et optimisation métallurgique du superalliage base nickel ATI 718Plus*

Meriadeg Revaud

Doctorant Cifre Snecma, groupe Safran / Centre des Matériaux Mines ParisTech

Les superalliages à base de nickel sont très utilisés pour la construction des parties chaudes des turboréacteurs aéronautiques, car leurs compositions leur procurent une grande résistance mécanique à haute température. Ainsi le superalliage Inconel 718, qui représente 70 % de la production mondiale de superalliages à base de nickel, est utilisé pour la fabrication de pièces telles que les disques de turbines. Ce superalliage est fortement utilisé car il associe de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à 650°C à un coût raisonnable.

Au début des années 2000, ATI Allvac a développé un nouveau superalliage à base de nickel dans le but de concurrencer l'Inconel 718. Ce nouvel alliage, nommé ATI 718Plus, promet des propriétés mécaniques supérieures que celles de l'Inconel 718 pour une utilisation pouvant aller jusqu'à 700°C. Pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à 700°C, la composition chimique de l'alliage ATI 718Plus a été établit par ATI Allvac, de façon à obtenir la phase intragranulaire  $\gamma'$  comme phase durcissante, et la phase intergranulaire  $\delta$  comme dans l'Inconel 718.

L'objectif de l'étude a été dans un premier temps de comprendre la microstructure de l'alliage. Pour cela des analyses en MEB et en MET ont été menées sur un grand nombre d'échantillons, traités à diverses températures et pour divers temps, de façon à identifier la nature et la cinétique de précipitation des phases présentes dans l'alliage. Dans un second temps l'étude a consisté à caractériser la microstructure et les propriétés mécaniques en traction et en fluage de l'alliage ATI 718Plus traité selon neuf gammes de traitements thermomécaniques se différenciant par la température de forgeage, le nombre de passes et le traitement thermique. Enfin l'étude a permis de tester trois gammes de traitements thermomécaniques dont les paramètres ont été définis grâce aux résultats précédents pour optimiser la microstructure dans l'objectif d'améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage.



# ***AD730TM – Nouvel alliage base-Ni développé pour les applications disques de turbine***

**Alexandre Devaux**

Ingénieur métallurgiste, Aubert & Duval - groupe ERAMET

Les objectifs ambitieux fixés pour les turbines à gaz aéronautiques, en termes d'augmentation de rendement et de diminution de consommation spécifique, ont une forte influence sur la conception des moteurs et tendent à augmenter sans cesse les températures et les contraintes d'emploi des différents matériaux, en particulier celles des superalliages à base de nickel. C'est dans ce contexte qu'ont été mis au point des alliages de plus en plus chargés en phase durcissante avec le développement de la métallurgie des poudres, dont le coût reste un inconvénient majeur pour les motoristes. Dès lors, des progrès importants ont été effectués dans la métallurgie conventionnelle C&W (Cast & Wrought) avec notamment le développement de la triple fusion (VIM-ESR-VAR) et l'obtention de nouveaux superalliages pour disques tels que l'AD730 associant de hautes caractéristiques mécaniques jusque 700-750°C et un coût raisonnable. Des propriétés mécaniques supérieures à celles des alliages 718 et 718Plus ont été recherchés pour l'AD730 dans l'optique de proposer un alliage présentant des propriétés proches de l'Udimet720 à un moindre coût.

L'obtention d'un coût raisonnable a conduit à une composition chimique qui devait exclure ou limiter la présence d'éléments onéreux (Co, Ni, Ta...) et permettre une bonne aptitude à la voie conventionnelle grâce à la limitation de la fraction et du solvus de la phase  $\gamma'$ . L'obtention de hautes propriétés mécaniques a été assurée par le renforcement par solution solide des phases  $\gamma / \gamma'$ . La stabilité microstructurale a également été un point clé dans le design de l'alliage et a consisté à obtenir un alliage  $\gamma / \gamma'$  exempt de phases topologiquement compactes (phases  $\mu$  ou  $\sigma$  riches en Cr-Mo-W) ou de phases aiguillées (phases  $\delta$  ou  $\eta$ ) susceptibles de dégrader les propriétés.

Les effets des paramètres du traitement thermique tels que la température de mise en solution, la vitesse de refroidissement et la température de vieillissement ont été étudiés et ont conduit à la définition d'un traitement thermique optimisé utilisé pour comparer les propriétés mécaniques de l'AD730 à celles d'autres superalliages pour disques de turbines.



# ***Effet des paramètres de traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques du superalliage base nickel N19***

**Alice Dumont**

Doctorante Cifre SNECMA, Groupe SAFRAN / Centre des Matériaux, Mines-ParisTech

Les disques de turbines des turbo-réacteurs aéronautiques sont soumis à des températures et à des sollicitations mécaniques élevées. Le superalliage N19, élaboré par métallurgie des poudres, a été développé récemment, au cours d'un programme de recherche commun entre Snecma, l'Onéra et le Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris, afin de pouvoir supporter de telles conditions.

L'objectif de cette étude est d'optimiser la microstructure du N19 en jouant sur les paramètres de traitement thermique pour améliorer les propriétés mécaniques de l'alliage. Une bonne compréhension des relations entre les paramètres de traitement thermique et la microstructure, d'une part, et, des relations entre la microstructure et les propriétés mécaniques, d'autre part, est donc nécessaire.

De nombreux traitements thermiques ont été appliqués à l'alliage pour évaluer l'effet de la température de mise en solution, des conditions de refroidissement et de la température de revenu sur la taille de grain et sur la taille et la distribution des précipités  $\gamma'$ . L'observation des microstructures en microscopie électronique à balayage et en transmission a permis d'évaluer l'effet des différentes étapes du traitement thermique sur les caractéristiques microstructurales de l'alliage.

L'effet de ces modifications microstructurales sur la résistance à la propagation de fissure en fatigue-fluage et sur le comportement en fatigue relaxation a été étudié. En parallèle, la caractérisation des propriétés en traction et en fluage a été réalisée par l'Onera.

La dernière étape de cette étude consistera en l'identification d'une séquence de traitement thermique permettant d'obtenir un compromis entre les propriétés mécaniques en traction, fluage, propagation de fissure avec temps de maintien et fatigue - relaxation.

