

Modélisation de l'impact du grenaillage sur le comportement et l'endommagement en fatigue d'un superalliage base nickel-fer, l'INCO718

J-P. Goulmy^{a,b,c}, L. Toualbi^b, P. Kanoute^{b,c}, S. Kruch^b, E. Rouhaud^c

a. IRT-M2P, 4, rue Augustin Fresnel 57070 Metz, France

b. Onera – The French Aerospace Lab, F-92322 Châtillon, France

c. Université de Technologie de Troyes (LASMIS), 12 rue Marie Curie, 10010 Troyes, France

Résumé *Le traitement de grenaillage a pour but de créer des contraintes résiduelles de compression à la surface d'une pièce pour retarder l'amorçage des fissures de fatigue. L'objectif de cette étude est de prendre en compte les effets du grenaillage sur la durée de vie d'un disque Haute Pression fabriqué en Inconel 718.*

Mots clés : Grenaillage, contraintes résiduelles, écrouissage, durée de vie, Inconel 718

1. Introduction

Les procédés de renforcement mécanique de surfaces tels que le grenaillage sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique afin d'améliorer la durée de vie en fatigue de pièces critiques, telles que les disques de turbine. Cependant, ces méthodes sont efficaces seulement si la relaxation thermomécanique des contraintes résiduelles est modérée à la température d'utilisation. Certaines études montrent que l'état microstructural initial du matériau peut avoir une influence sur l'efficacité du grenaillage[1]. De plus, la relaxation des contraintes résiduelles peut être fortement dépendante du taux d'écrouissage introduit au moment du grenaillage [2]–[4].

L'objectif de cette étude est de prendre en compte les contraintes résiduelles issues du grenaillage dans le calcul de la durée de vie d'un disque HP (Haute Pression) en Inconel 718. Pour répondre à cette problématique, il est nécessaire de comprendre quel est l'impact du grenaillage sur la microstructure et comment les contraintes résiduelles se relaxent lorsqu'elles sont soumises à de hautes températures et à des chargements thermomécaniques. Par ailleurs le développement et l'identification d'une loi de comportement apte à rendre compte des différents mécanismes de viscoplasticité cyclique constituent des étapes importantes dans la modélisation de l'évolution des contraintes résiduelles et de l'écrouissage en service.

2. Matériau et méthodes

Le matériau étudié est l'Inconel 718 DA (Direct Aged) issu d'un disque de turbine forgé. La microstructure présente de nombreuses phases et précipités qui sont fonction de la composition de l'alliage et des étapes thermomécaniques subies. Les phases γ' $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ et γ'' Ni_3Nb sont des phases durcissantes, le rôle de la phase γ'' étant prépondérant. La phase δ Ni_3Nb , forme stable de la phase γ'' , joue un rôle important dans l'alliage puisqu'elle permet de contrôler la taille des grains par ancrage mécanique au niveau des joints de grains.

La Figure 1 présente la microstructure Direct Aged, dont la taille de grains est comprise entre 5 et 10 μm , et qui présente une précipitation durcissante nanométrique (10 à 20 nm). Les précipités δ sont de formes globulaires et caractérisés par un diamètre de 1 à 2 μm pour 300 nm d'épaisseur.

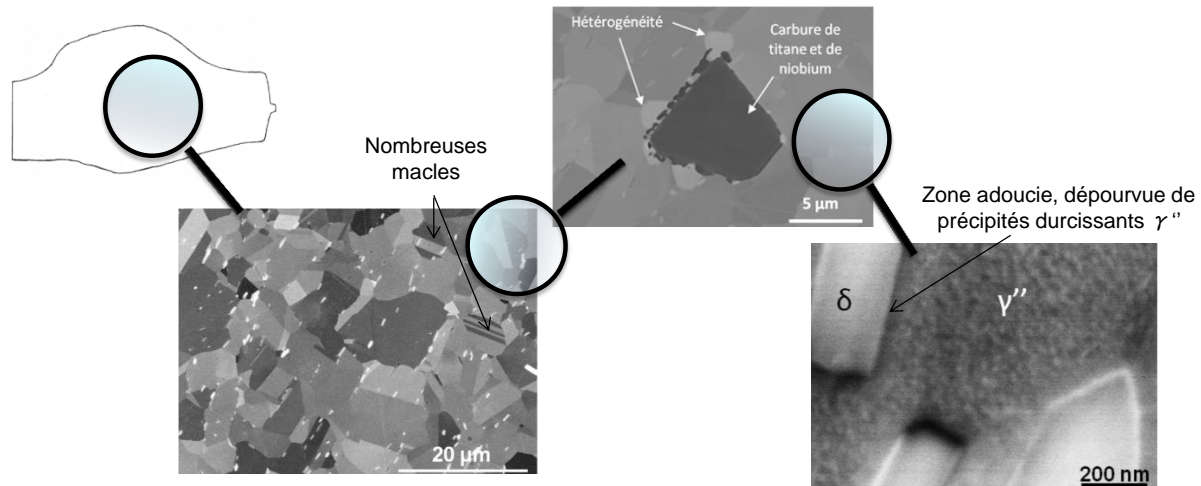


Figure 1. Microstructure de l'Inconel 718 DA issue d'un disque de turbine forgé.

Pour évaluer l'influence du grenaillage sur les propriétés mécaniques de l'Inconel 718 DA, deux techniques de caractérisation sont particulièrement utilisées : la diffraction des rayons X (DRX) et l'EBS (Electron BackScatter Diffraction). La DRX permet d'évaluer les contraintes résiduelles et l'écrouissage induits lors du grenaillage. L'EBS donne accès à la morphologie et la taille des grains.

Pour évaluer de façon semi-quantitative l'écrouissage induit par grenaillage une étape de calibration est réalisée en s'appuyant sur les travaux déjà réalisés [1], [5]–[8]. Le principe de la calibration consiste à mesurer, à l'aide de différentes techniques (DRX, EBS, microdureté), la valeur correspondant à une déformation plastique connue. Différentes méthodes permettent d'introduire une valeur choisie de déformation plastique : les essais de traction, les essais de compression et les essais de fatigue. Cette calibration est ensuite utilisée pour évaluer l'écrouissage introduit lors du traitement de surface.

3. Relaxation thermique des contraintes résiduelles et de l'écrouissage

Le grenaillage est efficace seulement si la relaxation thermomécanique des contraintes résiduelles est modérée à la température d'utilisation. L'évaluation de la relaxation des contraintes résiduelles et de l'écrouissage après sollicitation thermique est donc un enjeu majeur dans la modélisation de l'impact du grenaillage sur le comportement mécanique.

La Figure 2 présente un exemple de profils de contraintes résiduelles et d'écrouissage en fonction de la profondeur obtenus suite à une relaxation thermique à 550°C pour l'Inconel 718 DA grenaillé. Cinq temps de maintien à 550°C sont investigués : 0 minutes, 30 minutes, 1 heure, 5 heures et 50 heures.

On note une évolution rapide des contraintes résiduelles et de l'équivalent de déformation plastique lors des premiers temps de maintien. Par contre, au-delà de 5 heures, aucune évolution notable n'est à signaler. Ces observations montrent que les effets du grenaillage sont toujours présents même après l'application d'une sollicitation thermique à 550°C.

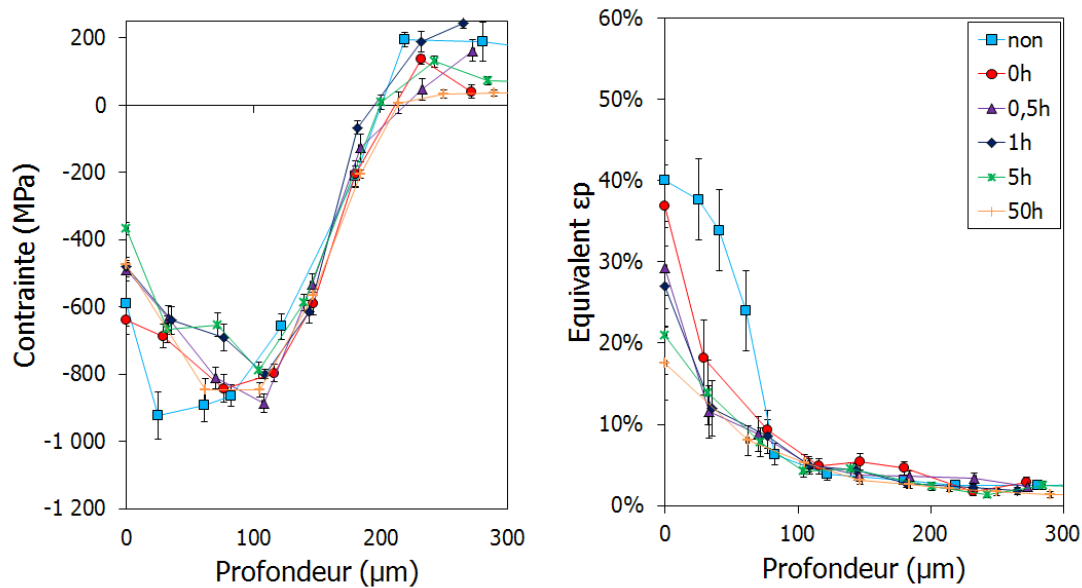


Figure 2. Profils de contraintes résiduelles et d'écroutissage pour différents temps de maintien de relaxation thermique, Inconel 718 DA, grenailé.

Après 5h à 550°C, environ 30 % des contraintes résiduelles en surface sont relaxées. Parallèlement la contrainte maximale est relaxée d'environ 10 %. C'est donc à la surface que la relaxation des contraintes résiduelles est la plus importante. Enfin, pour le même temps de maintien, l'écroutissage est diminué d'environ 50 % par rapport à la valeur initiale. De plus, on notera que la position de la contrainte maximale en compression et celle du passage en traction ne sont pas affectées par la relaxation thermique à 550°C. Ces résultats sont cohérents avec les observations faites dans la littérature [9]–[12].

Ces résultats seront utilisés par la suite pour nourrir la modélisation de la relaxation des contraintes résiduelles et de l'écroutissage sous sollicitation thermique.

4. Identification d'une loi de comportement

L'identification de la loi de comportement est une étape importante dans la modélisation de l'évolution des contraintes résiduelles et de l'écroutissage en service. Elle a donc fait l'objet d'une attention particulière. Des essais de comportement à 20 et 550°C ont été réalisés afin de pouvoir mettre en place un formalisme adapté et permettre l'identification des paramètres de la loi. Des effets de type Marquis et mémoire ont été mis en avant et modélisés [13], [14].

La Figure 3 présente trois essais types réalisés pour identifier le comportement du matériau : a) traction, b) relaxation et c) essai cyclique avec changement d'amplitude de déformation au cours de l'essai. La simulation (vert) permet de bien représenter les boucles obtenues expérimentalement (noir) à 550°C.

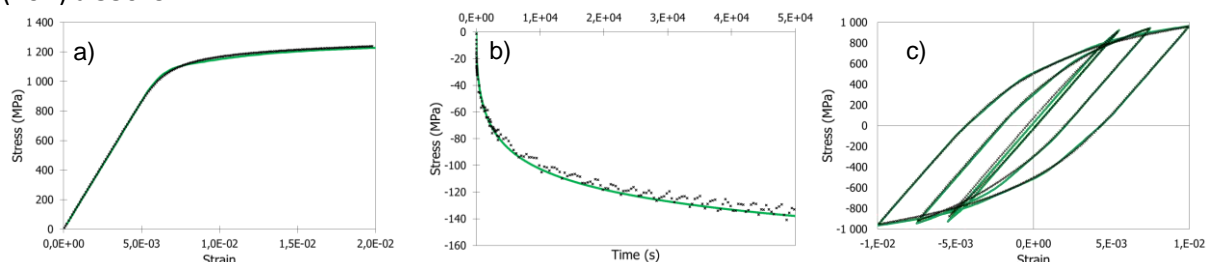


Figure 3. a) traction, b) relaxation et c) essai cyclique avec changement d'amplitude de déformation au cours de l'essai. Comparaison expérience (noir) /simulation (vert) pour l'Inconel 718 DA à 550°C.

5. Analyse en fatigue

Les essais de fatigues sont réalisés sur différentes géométries d'éprouvette afin d'évaluer l'influence du grenaillage sur le comportement et l'endommagement en fatigue pour différentes conditions de sollicitations. Les premiers résultats montrent que les contraintes résiduelles ne sont pas totalement relaxées après sollicitation. Une bonne modélisation de la relaxation des contraintes résiduelles est donc essentielle pour la suite.

De plus, l'influence de la rugosité, créée lors du grenaillage, semble être un élément clé à prendre en compte dans la prédiction de la durée de vie en fatigue.

6. Perspectives

Ces travaux seront poursuivis par une modélisation de la relaxation des contraintes résiduelles et de l'écrouissage sous chargements thermique et thermomécanique. Les contraintes résiduelles et l'écrouissage après sollicitation seront alors pris en compte pour déterminer la durée de vie des structures grenaillées.

Références

- [1] P. S. Prevey, "The measurement of sub-surface residual stress and cold work distributions in nickel base alloys," in *Residual Stress in Design, Process and Materials Selection*, 1987, pp. 11–19.
- [2] P. S. Prevey, "The Effect of Cold Work on the Thermal Stability of Residual Compression in Surface Enhanced IN718," in *20th ASM Materials Solutions Conference & Exposition*, St. Louis, Missouri, 2000.
- [3] J. T. Cammett, P. S. Prevey, and N. Jayaraman, "The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work, and fatigue in a Nickel-Base Superalloy," in *ICSP 9*, Paris, 2005.
- [4] B. J. Foss, S. Gray, M. J. Hardy, S. Stekovic, D. S. McPhail, and B. A. Shollock, "Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000," *Acta Mater.*, vol. 61, pp. 2548–2559, 2013.
- [5] M. Kamaya, A. J. Wilkinson, and J. M. Titchmarsh, "Measurement of plastic strain of polycrystalline material by electron backscatter diffraction," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 235, pp. 713–725, 2004.
- [6] K. A. Soady, B. G. Mellor, and P. A. S. Reed, "Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening Part 2 – approaches to fatigue life after shot peening," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 6, pp. 652–664, Jun. 2013.
- [7] D. N. Githinji, S. M. Northover, P. J. Bouchard, and M. A. Rist, "An EBSD Study of the Deformation of Service-Aged 316 Austenitic Steel," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 44, no. 9, pp. 4150–4167, May 2013.
- [8] R. R. Shen, V. Ström, and P. Efsing, "Spatial correlation between local misorientations and nanoindentation hardness in nickel-base alloy 690," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 674, pp. 171–177, Sep. 2016.
- [9] P. S. Prevey, D. J. Hornbach, and P. W. Mason, "Thermal Residual Stress Relaxation and Distortion in Surface Enhanced GasTurbine Engine Components," *ASM Int.*, 1998.
- [10] N. Masmoudi Khebou, "Etude de l'évolution des contraintes de grenaillage en fatigue à haute température pour le superalliage base nickel IN100," Thèse Doctorat, Arts et Métiers ParisTech, France, 1990.
- [11] J. Hoffmeister, V. Schulze, A. Wanner, R. Hessert, and G. Koenig, "Thermal relaxation of residual stresses induced by shot peening in IN718," in *10th International Conference of Shot Peening*, Tokyo, 2008.
- [12] I. Lillamand, "Evolution d'une couche grenaillée sous sollicitations thermiques et mécaniques, cas de la fatigue oligocyclique," Thèse de doctorat, ENSAM, 1999.
- [13] J. L. Chaboche, K. Dang-Van, and G. Cordier, "Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel," in *SMIRT 5*, Berlin, 1979.
- [14] D. Marquis, "Modélisation et identification de l'écrouissage anisotrope des métaux," Thèse de 3e cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 1979.