

Modélisation des contraintes résiduelles de grenaillage dans les pièces à géométrie complexe

M. Gelineau^{a,*}, L. Barrallier^b, E. Rouhaud^c, R. Kubler^b, Q. Puydt^a

a. Institut de Recherche Technologique M2P

b. Laboratoire MSMP, Arts et Métiers ParisTech

c. Laboratoire LASMIS, Université de Technologie de Troyes

* maxime.gelineau@irt-m2p.fr

Résumé

Pour comprendre et modéliser l'impact du grenaillage de précontrainte sur la durée de vie des composants mécaniques, il est indispensable de connaître l'état mécanique après traitement. Lorsque la géométrie du composant traité est complexe (forme non plane et/ou non massive), la prédiction des contraintes résiduelles n'est pas triviale. La mesure du gradient dans l'épaisseur et la simulation du procédé deviennent extrêmement difficiles. Grâce à des études de cas sur un alliage base nickel Inconel 178 DA, nous proposons un modèle prédictif simplifié sur géométries complexes.

Mots clés : Grenaillage ; contraintes résiduelles ; géométrie complexe ; modélisation éléments finis

1. Introduction

Le grenaillage de précontrainte est un traitement superficiel utilisé pour la finition des composants métalliques. Il a pour objectif d'augmenter la durée de vie en fatigue des pièces traitées. Pour comprendre et modéliser l'impact du grenaillage sur la durée de vie des composants mécaniques, il est indispensable de connaître en tout point du composant l'état mécanique après grenaillage.

Les géométries rencontrées sur les composants mécaniques traités par grenaillage sont souvent complexes (arbres de transmission, pignons, aubes de turbine, etc.). L'objectif de ce travail est donc de modéliser le champ de contraintes résiduelles post-grenaillage sur des composants métalliques à formes complexes (épaisseurs minces, surfaces courbes). C'est un travail issu du projet collaboratif CONDOR dont l'un des groupes de travail vise à développer une méthodologie de dimensionnement en fatigue pour des structures grenaillées.

2. Modélisation des contraintes résiduelles

2.1 Principe

L'hypothèse de base consiste à dire que les déformations plastiques dues au grenaillage dépendent peu de la géométrie du composant. Alors, pour un traitement uniforme, l'hypothèse massif semi-infini (MSI) peut être retenue au moins localement. Les déformations plastiques sont déterminées à partir du profil de contraintes résiduelles sur un volume représentatif, de géométrie simple (plane et suffisamment massive pour être considérée MSI) et grenaillé dans les mêmes conditions que la pièce (intensité Almen et recouvrement).

Ce profil de contraintes résiduelles sur MSI peut être obtenu expérimentalement (DRX, méthode du trou, etc.), analytiquement (méthode ZARKA, analyse dimensionnelle) ou numériquement (modélisation d'impacts) [1].

La démarche consiste alors à modéliser dans un code de calcul éléments finis (EF) la géométrie traitée, puis à introduire localement un champ de contraintes initial (non équilibré) calculé à partir du gradient de déformations plastiques incompatibles qui existerait dans le massif semi-infini [2]. Après un calcul statique de rééquilibrage élastique, le résultat escompté est un champ de contraintes résiduelles dans le composant qui serait celui après grenaillage.

2.2 Développement spécifique

Certains codes de calcul EF tel qu'ABAQUS disposent des fonctionnalités permettant d'introduire l'état de contraintes initial d'un matériau sur chaque point d'intégration d'éléments du maillage [3]. Toutefois, aujourd'hui aucun outil approprié n'existe pour introduire automatiquement un champ de contraintes initial dans un modèle EF. Nous proposons ici un programme qui réalise un couplage entre deux outils numériques : la subroutine SIGINI qui communique avec ABAQUS pour l'introduction d'un champ de contraintes initial, et un script PYTHON qui génère automatiquement cette subroutine SIGINI pour un maillage donné.

Ce programme permet notamment de renseigner deux informations : la première est la distance de chacun des points d'intégration par rapport à la surface grenaillée ; la seconde correspond à l'orientation locale des éléments du maillage en surface par rapport au repère global du modèle. Le champ de contraintes initial est ensuite calculé à partir des déformations plastiques incompatibles qui existeraient dans un MSI grenaillé uniformément, puis il est introduit aux points d'intégration du maillage. En d'autres termes, cela revient à appliquer le gradient de déformations plastiques MSI sur la géométrie complexe.

Comme l'illustre la (Fig. 1), l'outil développé se révèle efficace et très pratique pour générer un gradient de contraintes résiduelles dans l'épaisseur d'une géométrie complexe.

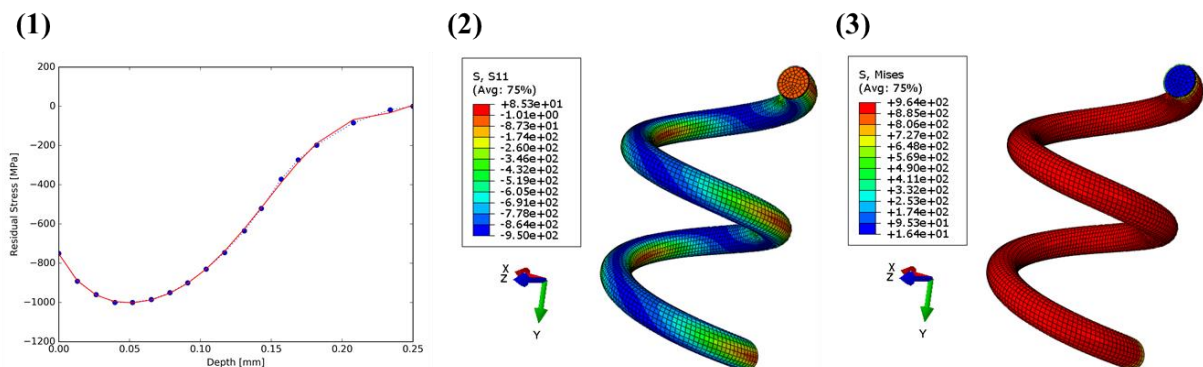


Figure 1. Profil de contraintes résiduelles dans un massif semi-infini (1) à partir duquel un champ de contraintes résiduelles est généré dans un ressort ; visualisation de la composante σ_{xx} (2) et des contraintes de Von Mises (3).

2.3 Validation expérimentale

Afin de démontrer la faisabilité de l'approche de modélisation sur des géométries simples (plaques massives), et d'autre part d'éprouver sa validité sur des géométries plus complexes (plaques minces par rapport à la profondeur affectée par le grenaillage, éprouvettes cylindriques), une comparaison entre les données de la modélisation et celles de l'expérimentation est menée à partir d'échantillons

Inconel 718 DA (module d'élasticité $E = 205$ GPa, coefficient de Poisson $\nu = 0.3$) avec des analyses par diffraction des rayons X (DRX) dans les directions longitudinale (DL) et transverse (DT). Les mesures RX sont faites dans la profondeur des échantillons, avec enlèvements de matière successifs par voie électrochimique. Les principaux paramètres sont les suivants :

- Goniomètre χ (SEIFERT XRD 3000 PTS),
- Tube à anode Mn, rayonnement $K\alpha$ (30 kV et 20 mA),
- Filtre Cr devant le détecteur P.S.D.,
- 2 angles ϕ ,
- 11 angles χ ,
- Taille de spot : 1.5 mm de diamètre,
- Famille des plans de diffraction : $\{311\}$ à $2\theta = 150^\circ$.

Typiquement les résultats obtenus sont ceux présentés sur la (Fig. 2). Il s'agit ici, à titre d'exemple, d'une plaque plane de dimensions $75 \times 19 \times 5$ mm³, grenillée avec une intensité Almen F22-23A et un recouvrement de 200%. Les points expérimentaux sont corrigés de l'enlèvement de matière par la méthode de Moore et Evans [4]. La courbe continue bleue correspond aux résultats du calcul. La courbe pointillée au profil MSI obtenu par DRX sur un massif de 10 mm d'épaisseur.

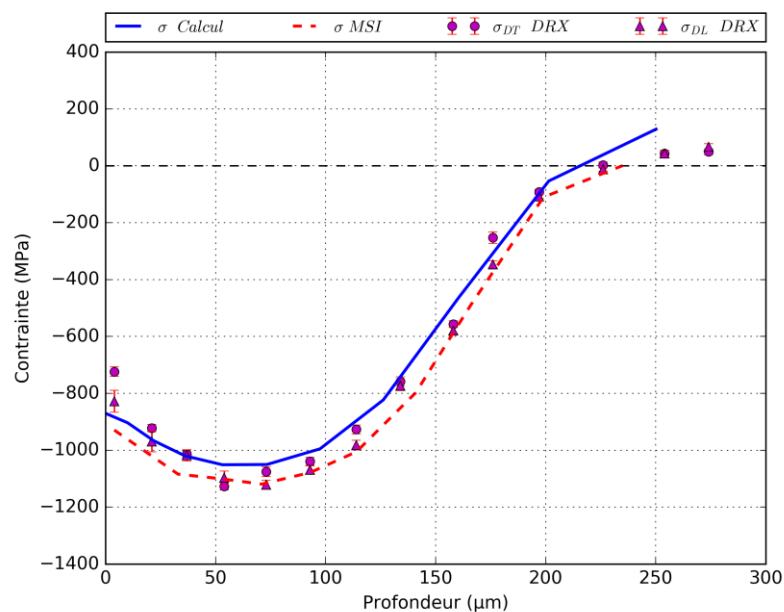


Figure 2. Profils de contraintes résiduelles sur MSI (courbe pointillée), sur plaque par DRX (cercles et triangles) et sur plaque après calcul (courbe continue)

Ici le calcul donne un état de contraintes équi-biaxial, c'est pourquoi nous ne faisons apparaître qu'une seule courbe pour le calcul. On constate d'une part une bonne correspondance entre les résultats du calcul et ceux obtenus par DRX, et d'autre part on remarque que l'hypothèse MSI est ici justifiée puisque la courbe pointillée est très proche des résultats de l'échantillon.

3. Conclusion

La méthode prédictive pour la modélisation des contraintes résiduelles de grenailage présente un réel intérêt. Elle permet de limiter les mesures ou les simulations du procédé à des formes planes et massives qui servent de référence aux calculs. Nous avons pu développer la méthodologie sur des plaques minces et des éprouvettes de fatigue lisses en Inconel 718 DA. Les premiers résultats sont concluants.

Remerciements

Ce travail de recherche est réalisé dans le cadre du projet CONDOR. Il s'agit d'un projet collaboratif dirigé par l'Institut de Recherche Technologie M2P. Nous souhaitons exprimer nos remerciements aux partenaires industriels : Airbus Helicopters, ARCELORMITTAL, AREVA, MISTRAS group, PSA Peugeot Citroën et SAFRAN.

Références

- [1] F. Cochenec, Simulation numérique du grenaillage de mise en forme pour une intégration produit-procédés en conception mécanique, Thèse, Université de Technologie de Troyes, 2009.
- [2] E. Rouhaud, A. Milley, J. Lu, Introduction of residual stress fields in finite element three-dimensional structures, Proceedings of the 5th International Conference on Residual Stresses (ICRS5), Linköping Suède, 16-18 juin 1997.
- [3] P. Renaud, Modélisation numérique du grenaillage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées, Thèse, Arts et Métiers ParisTech, 2011.
- [4] L. Castex, « Redistribution des contraintes dans une plaque après enlèvement de matière », Réunion des 10 et 11 octobre 1984 à Aix-en-Provence (ENSAM), Groupement Français pour l'analyse des contraintes par diffractométrie X.