

Analyse des contraintes résiduelles par la méthode de la rainure et du trou incrémental

G. Montay, A. Maras. , E. Rouhaud

Université de Technologie de Troyes (UTT)
Institut Charles Delaunay, LASMIS, FRE CNRS 2848
12, rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes
montay@utt.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de comparer deux méthodes d'analyse des contraintes résiduelles, la méthode du trou incrémental et la méthode de la rainure incrémental qui permet d'obtenir les contraintes résiduelles en deux dimensions. Cette étude permet de mieux appréhender les résultats fournis par chacune de ces méthodes. Après avoir présentées les deux méthodes, nous argumenterons sur la pertinence des résultats fournis par ces techniques. La méthode de la rainure est une évolution de la méthode du perçage incrémental qui est rendue possible grâce à l'utilisation l'interférométrie de speckle.

Abstract

The main of this study is to compare the residual stress in depth of a material with the increment hole drilling method and the incremental groove drilling method. The incremental groove drilling method allows obtaining the stress in two dimensions instead of one dimension with the hole drilling method.

Mots clefs

Contraintes résiduelles, Méthode du trou incrémental, Méthode de la rainure incrémental, Interférométrie de speckle, ESPI.

1 Introduction

La connaissance des contraintes résiduelles permet d'améliorer de manière fiable les performances mécaniques d'une structure, ainsi que sa durée de vie en fatigue.

L'analyse des contraintes résiduelles dans les structures mécaniques joue un rôle de plus en plus important en conception mécanique. La détermination des contraintes résiduelles permet aujourd'hui de faire plus finement des choix de matériaux ou des choix de procédés.

Pour cela plusieurs méthodes sont disponibles souvent classées en trois catégories, destructive, semi-destructive ou non destructive. Parmi toutes ces méthodes, nous pouvons citer la méthode du trou incrémental, la méthode du découpage pour les méthodes destructives et semi destructives, les méthodes de diffraction (X, neutrons et synchrotron) et méthode ultrasonore pour les méthodes non destructives [1-2].

L'objectif de cette étude est de comparer plusieurs méthodes destructives dites de relaxation, la méthode classique du trou incrémental et la méthode plus moderne de la rainure incrémental qui permet d'obtenir les contraintes résiduelles en deux dimensions.

Plus qu'une simple comparaison, cette étude permet de mieux appréhender les résultats fournis par chacune de ces méthodes.

Après avoir présenté les deux méthodes d'analyse, nous argumenterons sur la pertinence des résultats fournis par les différentes techniques de mesures.

2 Présentation de la méthode du trou incrémental.

Cette méthode, consiste à percer un trou dans le matériau qui relaxe les contraintes résiduelles contenues dans ce volume. De cette façon, la structure ainsi perturbée retrouve un nouvel état d'équilibre interne en créant en surface des déformations. En procédant de manière incrémentale, nous mesurons les déformations relaxées dans la couche de matière ainsi enlevée avec un interféromètre classique de speckle ainsi qu'avec des jauges de déformation collées à la surface de l'échantillon.

L'équation 1 permet de relier les déformations aux contraintes résiduelles piégées dans la structure avant l'enlèvement de matière.

$$\sigma_i = \frac{\varepsilon_i^1}{2A_{ii}} \quad (1)$$

A_{ii} est un coefficient de calibration déterminé par la méthode des éléments finis.

L'équation 2 ci dessous est utilisée afin de prendre en compte la redistribution du champ de contraintes entre deux perçages successifs. Pour cela il convient de recalculer la déformation en fonction de la déformation mesurée $\varepsilon_{i_{mes}}^1$ et des déformations relaxées par les perçages

précédents $\sum_{i=1}^{i=j-1} \varepsilon_{ij}^1$.

$$\varepsilon_i^1 = \varepsilon_{i_{mes}}^1 - \sum_{i=1}^{i=j-1} \varepsilon_{ij}^1 \quad (2)$$

Cette technique permet de déterminer le gradient de contraintes résiduelles uniquement en fonction de la profondeur du trou c'est-à-dire en une seule dimension.

3 Présentation de la méthode de la rainure incrémental

Cette méthode nouvelle d'analyse consiste à usiner une rainure de manière incrémentale en profondeur du matériau.

Cette méthode est une évolution de la méthode du perçage incrémental en deux dimensions. Evolution qui est rendue possible grâce à l'utilisation de méthodes photomécaniques de mesures de champs.

L'usinage d'une rainure (Fig.1) dans une zone précontrainte provoque une perturbation du champ de contrainte résiduelle. L'interférométrie LASER de speckle (ESPI) utilisée en décalage de phase est le moyen que nous avons choisi pour mesurer les déplacements en surface de la structure.

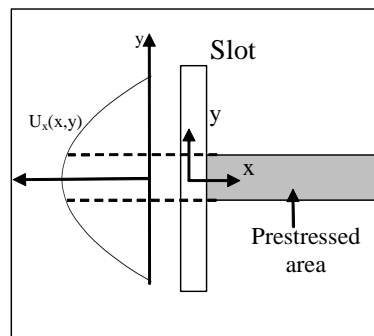


FIG. 1 : Schéma de la relaxation des contraintes générée par l'enlèvement de matière

L'exploitation des images de franges (FIG.2) obtenues en décalage de phase [3-4] permet d'une part de déterminer le profil de déplacement en profondeur de la structure, et d'autre part d'analyser le champ de déplacement suivant la largeur grâce à l'usinage de la rainure. On remarque que ce profil évolue à mesure que l'on se rapproche de la zone non affectée par le champ de précontraintes.

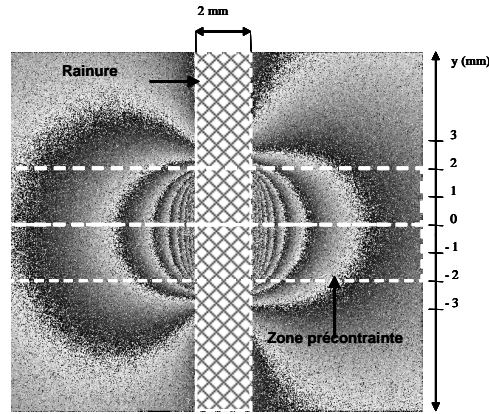


FIG. 2 : Figure de franges représentant le déplacement surfacique. Chaque frange représente un déplacement horizontal de $0,447 \mu\text{m}$.

Connaissant le champ cinématique (déplacement ou déformation) mesuré en surface, la détermination des contraintes associées se fait par la relation :

$$\varepsilon_x(x,y) = A \cdot \sigma_x(y,z) \quad (3)$$

où $\varepsilon_x(x,y)$ est issu de la mesure, $\sigma_x(y,z)$ représente les contraintes résiduelles en fonction de la direction de la rainure (y) et de la profondeur (z), A une matrice de coefficients de calibration déterminée par la méthode des éléments finis en simulant la relaxation de la matière enlevée par un chargement sur une cellule discrétisant la surface latérale de la rainure [5].

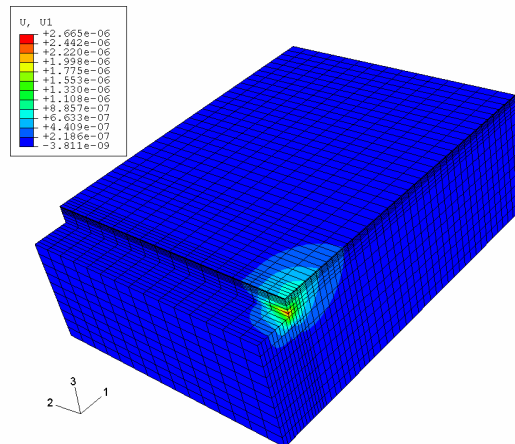


FIG. 3 : Simulation numérique de la relaxation pour le premier incrément usiné.

La figure 4 schématise le système de coordonnées et d'indices que nous avons utilisés quand la rainure est usinée.

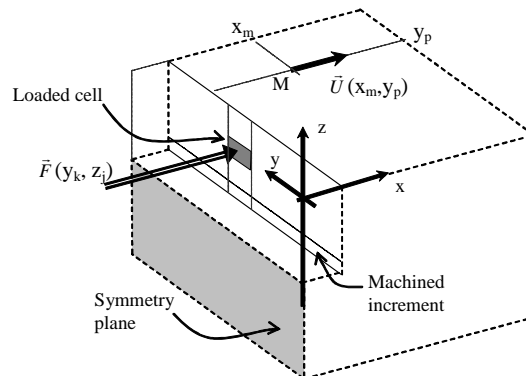


FIG. 4 : discrétisation simple de la relaxation des contraintes

La relation ci-dessous relie de manière linéaire le champ de déformation au champ de contraintes résiduelles recherché

$$\varepsilon^{imp} = A_{jk}^{imp} \cdot \sigma_{jk} \quad (4)$$

Où i représente le nombre d'incrément percés, m la coordonnée de la déformation suivant la direction x , p la coordonnée de la déformation suivant la direction y , k le nombre de cellules chargées suivant la direction y et j le nombre de cellule suivant la direction z . Par la suite une seule mesure suivant x sera faite, l'indice m n'aura donc plus d'influence dans l'équation précédente.

Il convient aussi de tenir compte de la redistribution du champ de contraintes entre deux incréments successifs. La relaxation génère un auto-équilibrage de la structure modifiant en profondeur le gradient de contraintes initialement introduit. Pour prendre en compte ce phénomène, nous retranchons la déformation produite par ce nouvel équilibre à la déformation mesurée.

Lorsque l'incrément i est usiné, la relation précédente devient :

$$\varepsilon^{ip} = \sum_{k=1}^K A_{ik}^{ip} \cdot \sigma_{ik} + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^K A_{jk}^{ip} \cdot \sigma_{jk} \quad (5)$$

Tout l'intérêt de cette méthode est l'analyse en 2D du champ de contraintes.

4 Présentation de l'échantillon.

Notre analyse a été effectuée sur une plaque en alliage d'aluminium AU4G ayant subi un traitement de grenailage par ultrasons sur trois bandes localisées de 4mm de largeur. Le grenailage a été effectué avec des billes de 1mm de diamètres pendant 10 minutes.

Les trois mesures ont été faites sur chacune des trois bandes afin que les relaxations générées par l'une des méthodes ne perturbent pas les autres mesures.

Ce traitement particulier permet de générer un double gradient de contraintes résiduelles; un suivant la profondeur de l'échantillon et un autre suivant la largeur de la bande grenailée.

5 Résultats et interprétations

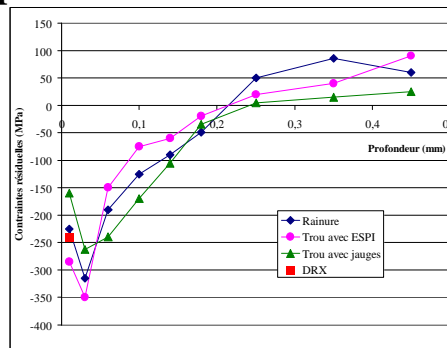


FIG. 5 Résultats des différentes méthodes proposées.

La figure 5 représente les profils de contraintes résiduelles obtenus par chacune des méthodes. On peut constater une bonne corrélation des résultats. En effet, par les trois méthodes, on retrouve :

- Une partie du gradient de contraintes en compression due au grenailage qu'a subi l'éprouvette.
- Un passage des contraintes de compression vers les contraintes de traction qui se situe entre 0,2 et 0,25 mm
- L'aire de la zone en compression est à peu près équivalente (Rainure ~23, Trou+Jauge ~21 et Trou+ESPI ~26)

Les mesures obtenues par la méthode de la rainure se situent plus au moins entre les mesures obtenues par les deux autres méthodes.

Une mesure de la contrainte à la surface a été réalisée par DRX (diffraction des rayons X), cette mesure vient confirmer le niveau de contraintes obtenues par les trois autres méthodes.

La comparaison de la méthode de la rainure avec d'autres méthodes montre la pertinence de cette méthode de mesure, malgré les différences qu'on peut noter si on analyse les valeurs à chaque

profondeur. Cette différence est due aux spécificités de chacune des méthodes et aux géométries générées par les deux types d'usinages (trou et rainure).

Plus exactement,

- Les surfaces sur lesquelles les contraintes se relâchent sont différentes.
- Les normales suivant lesquelles les contraintes se relaxent sont différentes
- Les volumes de matière enlevés et donc les quantités de contraintes relâchées sont différents.
- Les mesures ne sont pas faites exactement aux mêmes endroits. Le grenailage par ultrasons n'est pas homogène sur chacune des trois bandes.

6 Conclusions

Cette étude a permis de faire une comparaison quantitative et qualitative des résultats obtenus par la méthode de la rainure. Cette méthode a l'avantage d'accéder directement aux contraintes résiduelles en deux dimensions, non seulement dans la profondeur de la structure mais aussi le long de la rainure. Ce type de résultats n'est pas indiqué dans cette communication [5]. Il convient d'être vigilant sur les interprétations quant aux résultats proposés par différentes méthodes. Le volume sur lequel on identifie les contraintes est l'un des facteurs les plus importants à contrôler.

Références

- [1] Lu J., "Handbook of measurements of residual stress". SEM, Edited by Jian Lu (1996).
- [2] Montay G., Cherouat A., Lu J., Baradel N. and Bianchi L., "Development of high precision incremental step hole drilling method for the study of residual stress in multi-layer materials: influence of temperature and substrate on $ZrO_2 - Y_2O_3$ 8wt.% coating," Surface and coating technology. **155**, Issue155/2-3, pp 152-160 (2002).
- [3] Cloud G., Optical methods of engineering analysis. Cambridge University Press, New York, (1995).
- [4] Jones R. & Wykes C., Holographic and speckle interferometry. Cambridge University Press, Second edition, (1989).
- [5] Montay, G., Sicot, O., Maras, A., Rouhaud, E., François, M. Two dimensions residual stresses analysis through incremental groove machining combined with electronic speckle pattern interferometry. (2009). *Experimental Mechanics*, 49 (4), pp. 459-469.