

Modélisation du grenailage de précontrainte via l'analyse dimensionnelle : du profil de contraintes vers la pièce déformée

D. GALLITELLI^a, E. ROUHAUD^a, D. RETRAINT^a, J. BADREDDINE^a, C. LABERGERE^a, M. FRANCOIS^a

a. ICD-LASMIS, Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie, 10010 TROYES ;

Résumé :

Le Grenailage est un procédé de traitement mécanique de surface, qui consiste à bombarder la surface du matériau avec des billes projetées à différentes vitesses. L'impact provoque une déformation plastique et donc des contraintes résiduelles de compression en surface. L'objectif de cette étude est l'amélioration de la maîtrise du procédé de grenailage et de prévoir la distribution des contraintes résiduelles après grenailage à l'aide d'un modèle conçu grâce à l'analyse dimensionnelle. Les contraintes résiduelles dépendent des propriétés physiques des billes et du matériau traité, des conditions du procédé etc, et ces paramètres sont pris en compte dans le modèle.

Une comparaison entre les profils de contrainte modélisés et des profils expérimentaux est proposée afin de tester leur fiabilité. Pour simuler le grenailage sur des pièces complexes nous proposons de calculer le profil des contraintes avec le modèle et de l'introduire ensuite dans un modèle éléments finis de la pièce complexe qui fournira, après calcul, l'état de contraintes et déformations sur toute la pièce. La possibilité d'utiliser un modèle de dynamique des billes qui permet de simuler le grenailage par ultrason (GUS) et de fournir la distribution des vitesses d'impact permet l'utilisation de ce modèle pour le GUS.

La prise en compte du profil des contraintes résiduelles dans le dimensionnement d'une pièce est extrêmement importante. L'avantage du modèle proposé est sa rapidité d'exécution, et la simplicité du passage entre les profils des contraintes modélisés à la pièce déformée à l'aide d'un code FEM et avec un calcul de rééquilibrage statique. Les futurs développements concernent les méthodes d'introduction des contraintes afin d'effectuer des calculs sur des pièces à géométrie de plus en plus complexes.

Abstract:

Shot peening is a pre-stressing surface treatment used in high-technological industries (aeronautics, nuclear) to enhance the mechanical characteristics and lifespan of mechanical parts. The component to be treated and spherical shot are placed within a treatment chamber; then the shot is projected onto the surface of the component. The multiple impacts induce compressive residual stresses in the material and enhance the surface characteristics and fracture resistance of the mechanical components. Modelling shot peening process is very complex as it involves several parameters such as shot velocity, mechanical properties of material, etc. The aim of this work is to establish the residual stress field after treatment using a simple model obtained with dimensional analysis.

A comparison between experimental residual stress profiles and computed residual stress profiles is proposed. We use a model that enables to track the motion of the shot for ultrasonic shot peening (USP) to obtain the complete velocity distribution of the shot impacts. We can then use the residual stress model proposed above and obtain a complete model for ultrasonic shot peening from process parameters to residual stress field.

Mots clefs : Grenailage, Analyse dimensionnelle, Intensité Almen, Simulation numérique.

1 Introduction

Le travail suivant propose une étude pour obtenir une simulation complète du procédé du grenailage classique et/ou par ultrasons. Les étapes principales du travail consistent en la création, à l'aide de l'analyse dimensionnelle, d'un modèle capable de prévoir le profil des contraintes résiduelles sur une surface grenailée. Ce profil est ensuite introduit dans un code éléments finis en tant qu'état initial de contrainte. Un calcul de rééquilibrage statique est effectué afin d'avoir le champ de déformations sur la pièce provoqué par le grenailage. Le modèle en question dépend des paramètres du grenailage (vitesse des billes, dimension des billes, propriétés mécaniques des matériaux). Une fois ces paramètres connus, il est possible de remonter au profil de contraintes. En utilisant le modèle de dynamique des billes pour grenailage par ultrasons développé par notre laboratoire, il est possible de connaître les vitesses d'impact des billes. Une des avantages de cette méthode est la grande rapidité pour effectuer l'ensemble de la modélisation, du même ordre de grandeur que le temps pris pour le procédé de grenailage lui-même. Le modèle est assez simple, mais pourtant, les résultats montrent une bonne fiabilité.

2 Analyse dimensionnelle et description du modèle

Le modèle en question se base sur des approximations concernant les contraintes dues au grenailage [2]. Il est supposé que le tenseur prend la forme :

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ Avec } \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$$

Eq. 1 Tenseur de contraintes résiduelles après grenailage

Les contraintes radiales en fonction de la profondeur obtenues lors du grenailage (Figure 1) ont été approximées à un polynôme de quatrième degré :

$$P(z) = \sigma_{xx}(z) = \sigma_{yy}(z) = \sum_{k=0}^4 a_k Z^k = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + a_3 Z^3 + a_4 Z^4$$

Eq. 2 Polynôme qui représente le profil de contraintes résiduelles dans la profondeur Z

Le polynôme est résolu en considérant les valeurs clés du profil (σ_{surf} ; σ_{max} ; σ_p ; Z_{max} ; Z_p), connues grâce à l'analyse dimensionnelle.

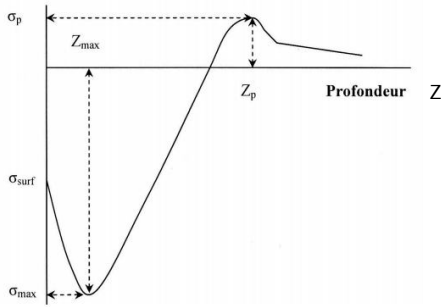


Figure 1 Profil expérimental typique des contraintes résiduelles après grenailage (σ_{surf} = contrainte surfacique ; σ_{\max} = contrainte maximale en compression ; σ_p = contrainte maximale en traction ; Z_{\max} = profondeur de la contrainte maximale en compression ; Z_p = profondeur de la contrainte maximale en traction ;)

L'analyse dimensionnelle est une méthode capable d'interpréter la complexité d'un phénomène physique en faisant un raisonnement sur les dimensions des variables impliquées pour avoir une relation entre ces variables. Elle se base sur le théorème II de Vaschy-Buckingham, qui dit que si on a une relation entre n grandeurs dimensionnées et indépendantes les unes des autres du type $a_0 = f(a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$ avec k dimensions indépendantes, alors on peut l'exprimer sous la forme d'une relation entre $n-k$ nombres sans dimension de la forme $C_0 = F(C_1, C_2, \dots, C_{n-k-1})$. Si la fonction F n'est pas calculable à partir des équations, elle peut être évaluée expérimentalement. Dans notre cas, les valeurs clés du profil des contraintes ont été liées via l'analyse dimensionnelle aux paramètres du grenailage (vitesse et dimension des billes) et aux propriétés mécaniques des matériaux traités et des billes utilisées [2]. Cela donne des modèles analytiques comme :

$$\sigma_{\text{surf}} = \left[1,3243 \cdot 10^7 \left(\frac{V^2 \rho_{\text{mat}}}{E} \right)^2 - 6,1824 \cdot 10^3 \left(\frac{V^2 \rho_{\text{mat}}}{E} \right) - 1,2383 \cdot 10^{-1} \right] \sigma_y$$

Eq. 3 Modèle analytique pour le calcul de la contrainte en extrême surface σ_{surf} . V = vitesse d'impact ; E = module d'Young ; ρ_{mat} = densité du matériau ; σ_y = limite d'élasticité ;

capables de calculer les valeurs clés du profil et, ensuite, d'avoir le profil des contraintes avec la résolution du polynôme $P(z)$.

3 Test du modèle et introduction des contraintes dans le code éléments-finis ABAQUS

Le modèle est ainsi capable de reproduire des profils de contraintes résiduelles après grenailage. La figure 2 présente une comparaison du profil modélisé avec des données expérimentales.

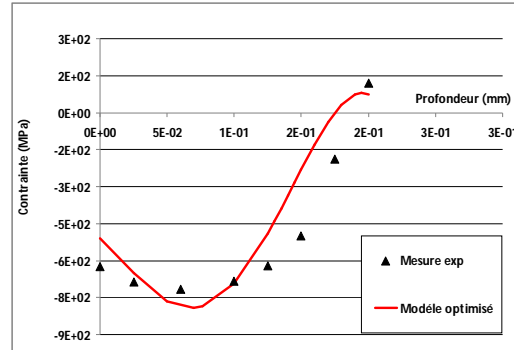


Figure 2 Comparaison entre le profil mesuré expérimentalement sur un acier AISI4140 grenailé [6] et celui calculé avec le modèle.

En utilisant un logiciel de calcul par éléments-finis (Abaqus 6.10 dans le cas en question), il est alors possible d'introduire les contraintes résiduelles calculées dans un modèle de pièce à géométrie complexe. Après un calcul d'équilibre élastique, il est possible de voir les déformations subies par la pièce et induites par ces contraintes de grenailage. Les tôles étudiées sont issues du laminage d'un lopin d'alliage d'aluminium 2024T3. Les dimensions de ces tôles sont 200x300x5mm. Elles ont subies un traitement de grenailage classique avec des billes type S230 de dureté 58 HRC avec une intensité Almen de 45A, sur la totalité de la surface pour le cas a, et partiellement (grenailage d'une bande de 50mm de largeur au milieu de la plaque sur la longueur de 200mm) pour le cas b [3]. Le profil des contraintes a été calculé à partir de paramètres connus, et ensuite introduit dans le code éléments-finis pour calculer l'état de déformation correspondant. Avec le même profil, un calcul analytique de courbure a été effectué, en utilisant une relation entre contraintes résiduelles et courbure. Les résultats sont présentés sur les figures 3a et 3b, où il est possible de voir que le calcul numérique donne des résultats proches des mesures expérimentales. Cette approche correspond à une solution valable pour les pièces à géométrie complexe où il est impossible d'envisager des calculs analytiques.

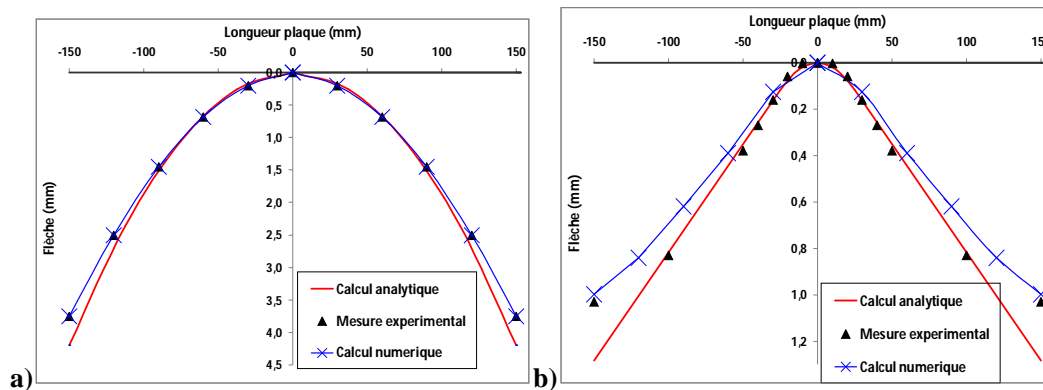


Figure 3 Confrontation des courbures calculées analytiquement et numériquement (modèle introduit sous Abaqus) avec des mesures expérimentales : a) une plaque d'aluminium de 5 mm d'épaisseur grenailée sur toute la surface ; b) plaque en Alliage 2024T3 de 5 mm d'épaisseur grenailée partiellement [3]

4 Simulation complète du procédé de grenailage par ultrasons et comparaison avec des données expérimentales sur une plaque Almen

Un modèle de dynamique des billes pour le grenailage par ultrasons a été développé [10]. Avec ce modèle, il est possible d'avoir la cartographie des vitesses d'impact (figure 4). Une fois la vitesse et les autres paramètres du grenailage connus, il est possible de calculer le profil des contraintes dans la profondeur de la pièce grenillée avec le modèle analytique. Ce profil est introduit dans le code éléments finis Abaqus avec lequel il est possible de voir en fin de calcul, les déformations dues à ces contraintes résiduelles.

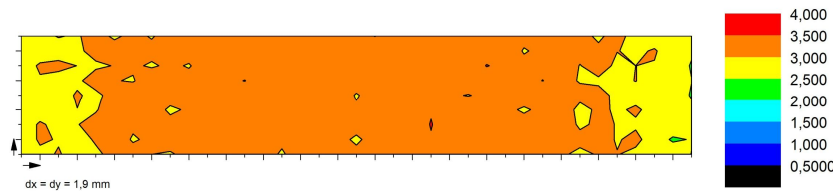


Figure 4 Cartographie des vitesses d'impact (m/s)

La différence par rapport au calcul du paragraphe précédent, réside dans le fait que grâce au modèle de dynamique de billes, il est possible d'effectuer la même démarche pour le cas du grenailage par ultrasons. La figure 5 montre de façon simple le chaînage complet de la simulation du procédé de grenailage ultrasonore à partir de la dynamique des billes jusqu'au champ de contraintes résiduelles.

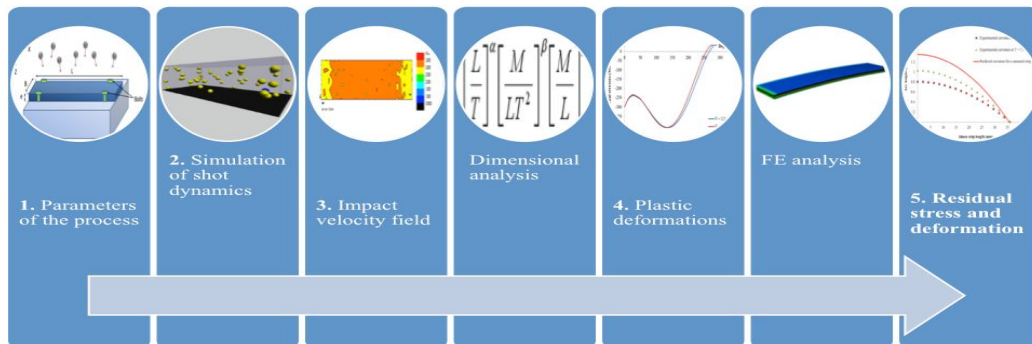


Figure 5 Schéma de simulation complet du procédé de grenailage par ultrasons [10]

La méthode complète a été appliquée sur une plaque Almen, en parallèle avec une approche expérimental de la même situation, pour pouvoir comparer les résultats en termes de flèche Almen^{*}. Une plaque Almen de type A à été grenillée pendant 15 minutes dans des conditions connues. Ensuite, à l'aide d'un comparateur Almen, la flèche a été mesurée. Puis la démarche de simulation a été lancée avec Abaqus. On obtient finalement la plaque déformée, et il est possible de tracer la courbure de la déformée et de récupérer la flèche Almen. Comme cela est montré dans le tableau 1, la différence de flèche Almen entre la mesure expérimentale et la simulation numérique est assez faible, confirmant ainsi la fiabilité des modèles et de la méthode adoptée.

*Indicateur standard de l'intensité de grenailage conventionnelle.

Tableau 1 Comparaison entre les mesures expérimentales et la simulation complète du procédé

Flèche Almen		
Expérimentale (mm)	Simulation complète (mm)	Erreur %
0.34	0.36	6.1%

5 Conclusion et perspectives

Dans le travail proposé, nous avons décrit le modèle des contraintes résiduelles après grenailage, comment coupler ce modèle avec un calcul éléments finis, et comment l'appliquer au cas du grenailage par ultrasons. Deux résultats ont été présentés, un pour le grenailage classique et un pour le grenailage par ultrasons. Les analyses des résultats ont été faites soit en termes de courbure soit en termes de flèche Almen. L'objectif principal du travail proposé est la possibilité d'étudier les champs de contraintes et déformations d'une pièce traitée afin de pouvoir les prendre en compte dans le dimensionnement des pièces mécaniques grenillées. Les résultats obtenus dans l'ensemble du travail sont encourageants. Grâce à une démarche robuste et des modèles relativement simples, il sera possible de connaître le profil des contraintes et du champ de déformations après grenailage. Les calculs sur des plaques Almen et sur des tôles sont de bons tests pour faire des comparaisons entre mesures expérimentales et calculs numériques afin de valider le modèle. L'idée principale pour la suite est de pouvoir effectuer la même démarche avec des pièces complexes. Le travail futur vise donc à développer ces modèles pour des applications sur des pièces industrielles.

Références

- [1] DESLAEF D. Modélisation numérique du grenailage de précontrainte : approche tridimensionnelle et dynamique. Thèse de doctorat en systèmes mécaniques et matériaux. Troyes : Université de technologie de Troyes, 2000.
- [2] OULD MOHAMED C. Analyse des contraintes résiduelles générées lors du grenailage : approche analytique, numérique et expérimentale des impacts de billes. Thèse de doctorat en systèmes mécaniques et matériaux. Troyes : Université de technologie de Troyes, 2007.
- [3] COCHENNEC F. Simulation numérique du grenailage de mise en forme pour une intégration produit-procèdes en conception. Thèse de doctorat en systèmes mécaniques et matériaux. Troyes : Université de technologie de Troyes, 2009
- [4] REZVANI K. 3D FE analysis of shot peening process for simulation and research on shot peening process parameter. International conference on shot peening. Indiana, USA.2011.
- [5] HUANG J. Application of the FEM for the prediction of the micro-region stress of TiB₂/Al composite. International conference on shot peening. Indiana, USA.2011
- [6] KLEMENZ M . Numerical prediction of the residual stress state after shot peening. «High Performance Computing in Science and Engineering '06 » Springer. 2007, pp 437-448
- [7] Rouhaud E., D. Deslaef, J. Lu, J.L. Chaboche, *Modeling of Residual Stress, Shot Peening*, Chapitre de livre : « Handbook on Residual Stress » éditeur : Jian Lu, Society of Experimental Mechanics 2005.
- [8] COMOLET R., BONNIN J. Mécanique expérimentale des fluides. Tome 2 et 3. 5^e ed. Paris : Dunod, 2003, 261 p. ISBN 2-1000-7410-5
- [13] BOURGES et al. Méthodologie expérimentale. 2^e ed. Paris : Tec et Doc, 1998, 366 p. ISBN 2-7430-0595-5
- [9] Rouhaud E., A. Milley and 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.
- [10] BADREDDINE J., GALLITELLI D., ROUHAUD E. et al. Complete simulation of ultrasonic shot peening process. Surface Modification Technology 2012, Lyon, France.