

Traitement de surfaces par impacts : Évaluation des contraintes résiduelles induites par martelage

Lyes Hacini, Van Ngan Lê & Philippe Bocher

École de Technologie Supérieure, Institut de Recherche d'Hydro-Québec
1100, Notre-Dame ouest, Montréal, Québec, H3C1K3
Philippe.bocher@etsmtl.ca

Résumé :

Ce travail a pour objectif l'étude de la technique de relaxation des contraintes résiduelles par martelage. Comme première approche, on a choisi d'étudier l'effet du martelage seul sur des plaques libres. 4 plaques d'acier inoxydable austénitique 304L ont été martelées par 1, 3, 5 et 9 couches de martelage respectivement, alors qu'une cinquième plaque issue du même lot a servi de témoin pour évaluer les contraintes initiales. Les contraintes résiduelles ont été évaluées grâce à la technique des contours, qui permet d'avoir une carte 2D de la distribution des contraintes résiduelles dans le sens perpendiculaire au cordon de soudage. Ces essais ont permis de démontrer l'effet bénéfique du martelage à induire des contraintes de compression sur une profondeur de quelques millimètres, ce qui réduit les risques de fissuration, ainsi qu'une amélioration des propriétés mécaniques locales. Aussi, nous avons réussi à identifier le nombre optimal de couches de martelage à appliquer afin d'induire un niveau maximal de contraintes de compression tout en minimisant le nombre de passes de martelage et aussi le temps de traitement.

Abstract:

This work aims to study the residual stresses relaxation by hammer peening technique. We chose to study the effect of hammer peening applied to free plates. 4 austenitic stainless steel 304L plates were hammered by 1, 3, 5 and 9 layers respectively, whereas a fifth plate was used as reference. The residual stresses were evaluated thanks to the contours technique, which provides the 2D field of the residual stresses present in the perpendicular plan of the peened line. These tests display the beneficial effect of hammer peening to induce compressive stresses on a depth of few millimetres, which reduces the risks of cracking, as well as an improvement of the mechanical properties. Also, the optimal number of hammer peening layers to be applied was determined in order to minimize the processing time.

Mots-clefs :

Relaxation, contraintes résiduelles, martelage

1 Introduction

La fabrication mécano soudée de certains composants industriels génère des contraintes résiduelles près des cordons de soudure. Ces contraintes semblent être à l'origine de fissurations prématurées qui peuvent entraîner une rupture catastrophique durant le fonctionnement et une réduction de la durée de vie de ces composants. Dans ce contexte, l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) a développé la technique de relaxation par martelage robotisé qui permet de relaxer les contraintes proches de la surface tout en préservant les propriétés mécaniques et dimensionnelles de ces composants manufacturées (Simoneau (2004), Fihey *et al* (2005), Hacini *et al* (2006)).

L'effet du martelage seul a été étudié sur des plaques libres (ne contenant aucunes contraintes résiduelles initiales). Quatre (4) plaques d'acier inoxydable austénitique 304L ont été martelées par 1, 3, 5 et 9 couches de martelage respectivement, alors qu'une cinquième plaque a servi de témoin pour évaluer les contraintes initiales. Les contraintes résiduelles ont été évaluées grâce à la technique des contours (Prime *et al* (2000,2001), Nasri *et al* (2004, 2007)), qui permet d'avoir une carte complète 2D de la distribution des contraintes résiduelles.

Ce travail a pour but de quantifier l'effet bénéfique du martelage sur les contraintes résiduelles de surface et ceci afin de réduire dans une prochaine étape les contraintes résiduelles de tension générées dans des pièces soudées. Ils a aussi pour objectif d'identifier le nombre optimal de couches de martelage à appliquer; cela permettra de réduire le temps de martelage et d'induire le niveau maximal de contraintes de compression dans les plaques.

2 Approche expérimentale

2.1 Échantillons

Cinq plaques issues d'un même lot de dimensions 450*150*25mm en acier inoxydable austénitique 304L ont été utilisées. La limite d'écoulement de ce matériau est de 210MPa et la contrainte ultime en traction uniaxiale est 564MPa. Quatre de ces plaques ont subi respectivement 1, 3, 5 et 9 couches de martelage. La plaque non martelée a servi de témoin pour évaluer l'état initial de contraintes.

2.2 Procédure de martelage

La procédure de martelage suivie pour ces essais est identique à celle décrite par Simoneau (2004) et Hacini (2007). Pour rappel, le martelage a été réalisé grâce à un marteau pneumatique, modèle RRH06P de la compagnie Atlas Copco supporté par le robot SCOMPI®; ce dernier est un robot portatif à six axes employé au sein d'Hydro-Québec pour la maintenance in situ (soudage, meulage et martelage) des turbines hydrauliques. Le nombre de couches de martelage varie entre 0 et 9 couches; chaque couche est composée de 6 passes, avec une distance interpasses de 5.5mm; la fréquence de martelage utilisée est de 36Hz avec une pression d'air qui vaut 0.62MPa (90psi). La taille de la zone martelée est de 304*31mm au centre de chaque plaque.

2.3 Mesure des contraintes résiduelles

Les mesures des contraintes résiduelles sur les 5 plaques ont été réalisées par la méthode des micro-profils (contours). D'autres méthodes de mesure ont été mises en place pour valider ces résultats et feront l'objet d'une future publication (Thibault *et al* (2007)).

Afin d'appliquer cette méthode, il est nécessaire de couper les échantillons à l'EDM (Electric Discharge Machining), cette méthode d'usinage permet de préserver les surfaces sujettes à l'étude. Lors de la coupe EDM, il est primordial d'empêcher les échantillons de bouger, un système de blocage a été conçu à cet effet. Il permet d'exercer sur les cotés d'une trajectoire de coupe un serrage assez important pour empêcher les 2 moitiés de l'échantillon de se déplacer.

La coupe EDM est réalisée sur une machine FANUC avec un fil de 0.25 mm (100 mils). Elle est réalisée à une vitesse de coupe de 0.9mm²/s (5po²/h), et est perpendiculaire à la direction de martelage selon le plan horizontal de la plaque.

Les profils des deux surfaces ainsi obtenus seront alors mesurés par profilométrie, mais avant de faire cette étape, un artefact doit être soigneusement corrigé. En effet, à l'extrémité de chaque moitié, là où la coupe EDM se termine il reste toujours une zone surélevée qui a été mal coupée, elle doit être supprimée lors du calcul des contraintes.

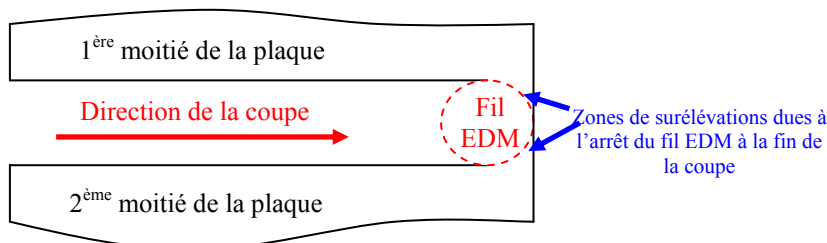


FIG. 1 – Artefact (surépaisseur) produit à la fin de la coupe EDM

Une fois les profils des deux surfaces numérisés, les résultats sont moyennés et les données numériques sont utilisées pour calculer les contraintes nécessaires afin de « redresser » la surface. Pour faire cela plus facilement, cette surface est approximée par un polynôme de degré 7 en utilisant la méthode des moindres carrés. Par un modèle éléments finis représentant l'échantillon, la surface polynomiale est utilisée pour imposer les déplacements inverses à la face coupée par EDM. Cela permet de calculer les contraintes équivalentes relâchées lors de la coupe dans le plan de section.

3 Résultats et discussion

Les contraintes ainsi calculées par la méthode des contours sont présentées dans la figure 2. Ces résultats représentent les contraintes selon l'axe perpendiculaire à la surface de la coupe EDM, autrement dit, les contraintes longitudinales à la direction du martelage appliqué aux plaques.

La figure 2.a représente le profil de contraintes dans la plaque témoin, cette plaque n'a subi aucun martelage, malgré cela, la mesure des contraintes donne des valeurs variant de ± 100 MPa. La figure 2.b démontre que le martelage est capable d'induire des contraintes assez élevées même après une seule couche. On remarque aussi que le maximum de contraintes ne se trouve pas sur la surface, mais à environ 1mm de profondeur, cette situation peut se présenter lorsqu'un matériau ductile est martelé avec un embout beaucoup plus dur (Michel (2007)). La profondeur influencée par la compression atteint 7mm, avec un niveau de contrainte élevé comparativement à la plaque non martelée (figure 3).

Lorsque la plaque subit 3 couches de martelage (figure 2.c) la profondeur influencée augmente, puisqu'elle atteint 9mm de zone de compression et que la contrainte maximum de compression se trouve en surface est vaut -890MPa alors qu'elle ne vaut que -440MPa dans la plaque n'ayant subi qu'une passe.

Les figures 2.d et 2.e montrent les profils de contraintes pour les plaques ayant subi 5 et 9 couches de martelage. Peu d'améliorations sont relevées dans ces 2 plaques, les profondeurs soumises à de la compression sont respectivement de 9 et 10mm, tandis que la contrainte maximum de compression vaut -970MPa pour les deux plaques.

La figure 3 représente le profil de contraintes au milieu de la plaque en fonction de la profondeur sous la zone martelée, il est facile de constater que l'augmentation du nombre de couches de martelage de 1 à 3 augmente la zone de compression, cependant au-delà de la 3^{ème} ou 4^{ème} couche appliquée peu d'améliorations sont enregistrées alors que la durée du traitement augmente ainsi que les risques de fissuration au niveau de la surface martelée.

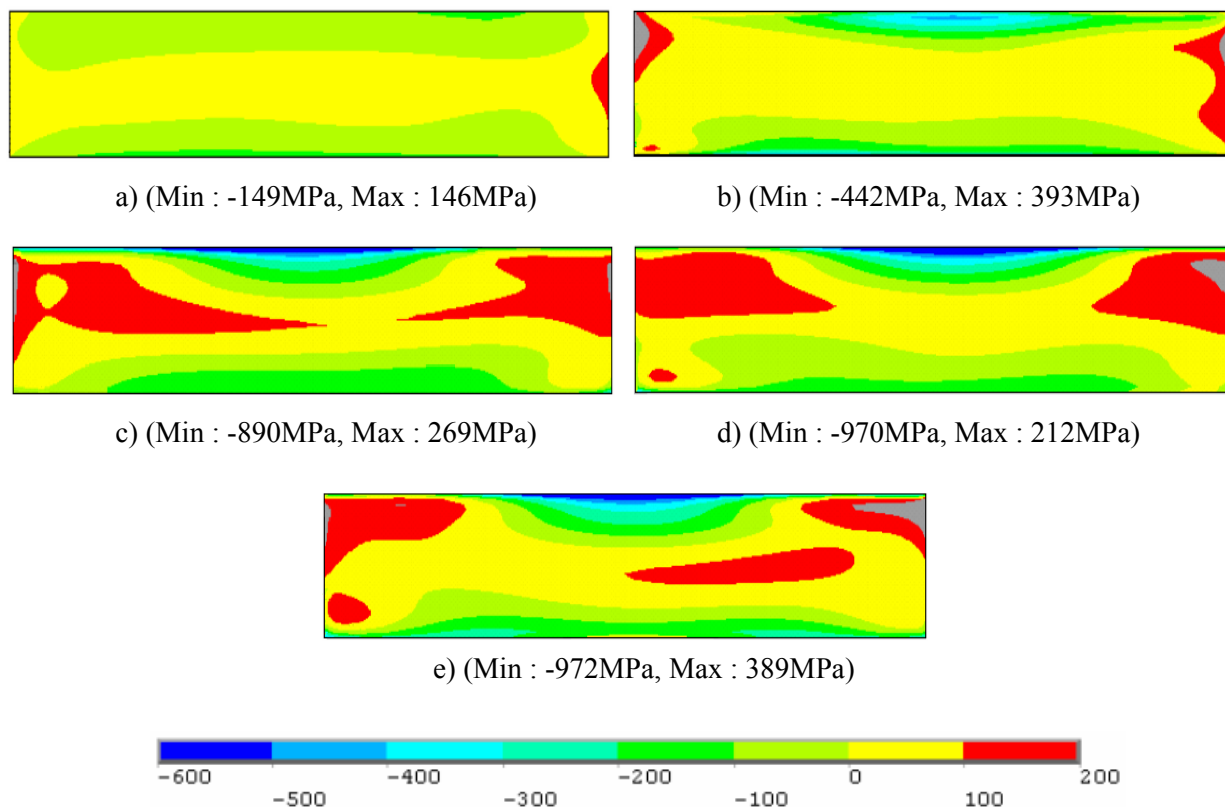


FIG. 2 – Évolution du profil des contraintes longitudinales [MPa] en fonction du nombre de couches de martelage : a) plaque de référence, b) Après une couche, c) Après trois couches d) Après cinq couches e) Après neuf couches

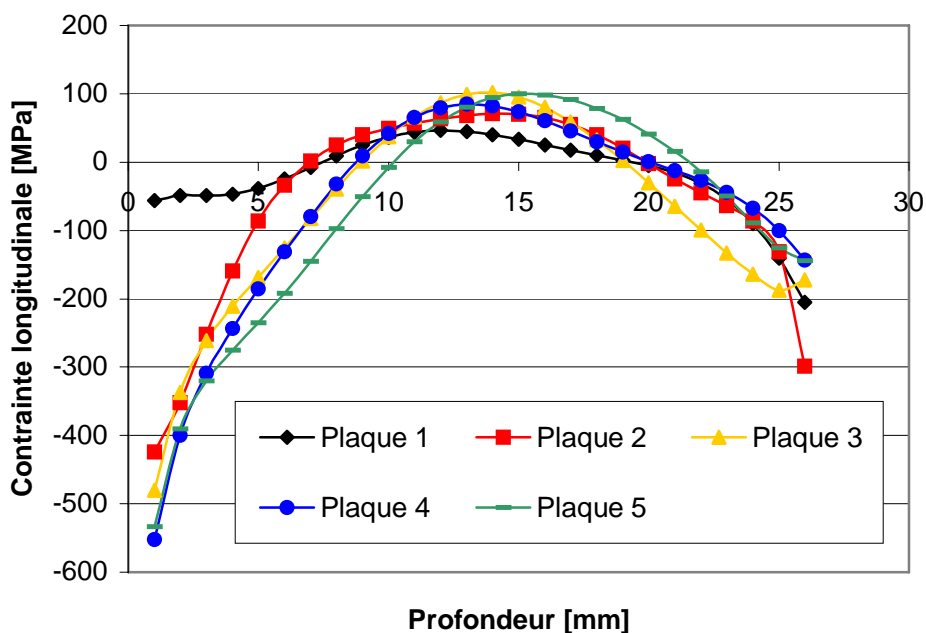


FIG. 3 – Contrainte longitudinale au milieu de chaque plaque en fonction de la profondeur; plaques 1 à 5 : 0, 1, 3, 5, et 9 couches de martelage

Le Tableau 1 englobe les résultats significatifs pour les 5 plaques, il s'agit de la profondeur influencée par le martelage, la contrainte maximum enregistrée à 1mm de profondeur sous la zone martelée ainsi que le temps de traitement.

TAB. 1 – Variations de divers paramètres en fonction du nombre de couches pour une profondeur de 1mm

| Nombre de couches de martelage (Proportionnel à la durée de traitement) | 1 | 3 | 5 | 9 |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Profondeur maximum en compression [mm] | 7 | 9 | 9 | 10 |
| Valeur de la compression maximum [MPa] à 1mm de profondeur de la surface martelée | 435 | 482 | 571 | 535 |

Selon les trois critères mentionnés dans le tableau 1, et en accordant une pondération moins importante au premier critère (durée du traitement), il ressort qu'un martelage optimal se situe entre 3 et 5 couches appliquées, ce qui rejoint les conclusions des références Fihey (2005) et Hacini *et al* (2006). Augmenter le nombre de couches au-delà de ce niveau ne va pas améliorer l'état de contraintes à l'intérieur des plaques et risque d'induire des fissures en surface à cause de l'augmentation excessive de la dureté qui va rendre la surface plus fragile.

Il est à noter que même si les valeurs de contraintes maximales enregistrées paraissent trop élevées par rapport à la contrainte ultime en traction du matériau (564MPa), elle restent toujours possibles car l'acier 304L est caractérisé par un niveau d'écrouissage très élevé et que les contraintes mesurées sont en compression. Aussi, des travaux antérieurs réalisés sur les mêmes plaques ont permis de démontrer l'influence du martelage sur la dureté du matériau traité qui est beaucoup plus élevée que celle du matériau de base non traité (Hacini *et al* (2006)). Cette dureté est elle-même proportionnelle à la contrainte d'écoulement du matériau (Busby *et al* (2004)), ce qui nous permet de dire que le martelage permet d'augmenter la limite d'écoulement du matériau et ce sur des profondeurs allant jusqu'à 10mm. Quant à la dureté, elle peut servir d'indicateur de l'augmentation de la contrainte d'écoulement et ainsi offrir un moyen simple de vérifier la qualité du martelage.

4 Conclusions

À travers ces essais, on a étudié l'efficacité du martelage à induire des contraintes de compression sur des plaques libres. Les principales conclusions et recommandations sont les suivantes :

- La technique des micro-profilés semble être une méthode adéquate pour mesurer les contraintes résiduelles en 2D sur de grandes sections.
- Le martelage a induit de la compression sur une profondeur d'environ 10mm, ce qui est supérieure à la majorité des techniques de relaxation utilisées en industrie.
- Il semble que le nombre optimal de couches de martelage à appliquer pour l'acier 304L se situe entre 3 à 5 couches, cela confirme les conclusions des travaux précédents.

L'étude présente n'identifie aucun aspect négatif à l'application d'un plus grand nombre de couches de martelage sur une même zone, sauf la durée du traitement qui augmente proportionnellement au nombre de couches, ce qui peut augmenter le coût du traitement. Cependant, il sera intéressant de regarder les surfaces martelées pour vérifier d'éventuelles initiations de fissures.

Remerciements

Les auteurs remercient le CRSNG et Hydro-Québec pour leurs supports financiers et techniques. Ils tiennent aussi à exprimer leur reconnaissance au Dr Jean-Luc Fihey et au chercheur Denis Thibault ainsi que M^r Stéphane Godin pour son aide dans la réalisation de la partie expérimentale de ce travail.

Références

- Simoneau, R. 2004 Déformation de plaques d'aciers par le martelage multi-passe robotisé. Rapport interne IREQ-2004-161
- Fihey, J.L., Simoneau, R., Lanteigne, J., Thibault, D., Laroche, Y. 2005 Controlled Hammer-Peening on a Restrained A514 (S690Q) Weldment. Proceedings 5-6 July, Institute for Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology
- Hacini, L., Lê, N.V., Bocher, P. 2006 Residual Stresses Induced by Robotized Hammer Peening: Effect of Energy Level. Proceeding of Aerospace Materials and Manufacturing, 1-4 octobre, p 759-767
- Prime, M.B. 2001 Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour after a Cut. Journal of Engineering Materials and Technology, Vol 123, pp. 162-168
- Prime, M.B., Gonzales, A.R. 2000 The Contour Method: Simple 2-D Mapping of Residual Stresses. Proc 6th Int. Conf. on Residual Stresses, Oxford, U.K., July10-12, Vol 1, pp.617-624
- Nasri, H., Lanteigne, J., Baillargeon, C. 2004 Mesure des contraintes résiduelles sur une préparation soudée en acier A-516 par la méthode de profil d'une surface de coupe. Rapport interne IREQ-2004-159
- Nasri, H. 2007 Mesure des Contraintes Résiduelles par micro profils de surface. Thèse de maîtrise, École de Technologie Supérieure
- Thibault, D., Bocher, P., Thomas, M., Garghour, M. (Publication future) Neutral diffraction measurements of residual stresses in 13%Cr-4%Ni weld
- Michel, A. 2007 Pièces mécaniques soudées : Traitements thermiques et mécaniques, Techniques de l'ingénieur BM 5 190v2 – 1
- Hacini, L. 2007 Application de la technique des micro profils à la mesure des contraintes résiduelles dues au soudage et martelage de plaques en acier inoxydable austénitique 304L Rapport interne IREQ-2007-0030
- Busby, J.T., Hash, M.C., Gary, S.W. 2004 The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels. Journal of Nuclear Materials, Vol 336, pp267-278