

Effets des défauts géométriques et des gradients de microstructure et de contraintes sur le comportement en fatigue de composants forgés et grenillés

Colloque MECAMAT 2017

E. Pessard^a, B. Gerin^{a,b}, F. Morel^a, C. Verdu^b

a. LAMPA, Arts et Métiers ParisTech Angers, etienne.pessard@ensam.eu

b. MATEIS, INSA de Lyon

Résumé

Cette étude est consacrée au comportement en fatigue de pièces forgées à chaud puis grenillées contenant des défauts de surface naturels (générés lors du forgeage). Après avoir caractérisé en détails l'intégrité de surface de ces composants, deux approches visant à prédire leurs tenues sont développées. La première repose sur une analyse géométrique des défauts qui utilise un demi-ellipsoïde pour approximer leur forme. La deuxième approche se base sur la simulation numérique par éléments finis des défauts critiques. Les contraintes résiduelles sont intégrées dans les simulations via un critère d'endurance multiaxial. L'utilisation d'un critère non local permet alors de retrouver les résultats expérimentaux et montre l'importance de la prise en compte de la morphologie réel du défaut pour l'estimation de son impact sur la tenue en fatigue.

Mots clés : Intégrité de surface, Grenillage Fatigue à Grand Nombre de Cycles, Critère non local

1. Introduction

L'amorçage en fatigue étant le plus souvent localisé en surface, de nombreux travaux de la littérature se consacrent à la prise en compte de l'intégrité de surface sur la tenue en fatigue. Le terme intégrité de surface, contient à la fois la géométrie de la surface (rugosité, défauts locaux) mais aussi l'ensemble des gradients en surface (contraintes résiduelles, microstructure, écrouissage, dureté...) qui sont bien souvent liés. L'intégrité de surface étant très dépendante des procédés de mise en forme, les études traitant de cette problématique sont souvent focalisées sur un procédé particulier : l'usinage, [1-3], le grenillage [4-5], l'emboutissage [6] ou encore le poinçonnage [7].

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR nommé DEFISURF dont un des volets porte sur les effets des défauts de surface en fatigue dans le cas d'une bielle en acier C70 forgée à chaud puis grenillée. Ce composant fabriqué en très grande série est utilisé dans les moteurs de véhicule automobile. Plus de 1000 bielles ont été fabriquées en conditions industrielles spécialement pour cette étude. Si dans notre cas, le forgeage à chaud ne génère pas de gradients de contraintes résiduelles et d'écrouissage, l'incrustation de calamine sur les outillages crée en surface des défauts de tailles conséquentes sur le composant (typiquement de 500 à 2000 μm de long et de 50 à 200 μm de profondeur cf. figure 1). Le grenillage ensuite imposé modifie sensiblement l'intégrité de surface en générant un gradient de microstructure. Les grains en extrême surface sur les 10 premiers μm sont très déformés avec une épaisseur de l'ordre de 1 μm . Des traces d'endommagement et des

replis sont également observés (cf figure 1 b). En surface la dureté croît de 60 Hv et des contraintes résiduelles de compression de 500MPa sur les 250 premiers μm sont introduites (figure 2). Le grenailage ne permet cependant pas de supprimer les défauts générés lors du forgeage. Il en modifie légèrement la topologie.

Afin de pouvoir dé-corréler les différents effets du procédé sur le comportement en fatigue, cinq lots ont été étudiés. Le premier lot possède un état de surface poli et sera utilisé comme référence. Le second est issu de bielles forgées non grenillées. Il se caractérise par des défauts de forgeage en surface mais aucun gradient de microstructure ou de contrainte résiduelle. Le troisième lot a subi, après l'étape de forgeage à chaud, l'étape de Shot Blasting industrielle. Afin d'étudier plus en détails l'effet du grenailage, deux lots supplémentaires ayant subi l'étape de forgeage ainsi qu'une opération de shot peening contrôlée ont également été considérés. Les 3 lots grenillés (shot blasting et peening) possèdent des niveaux de contraintes résiduelles très proches sur les 100 premiers μm (Figure 2).

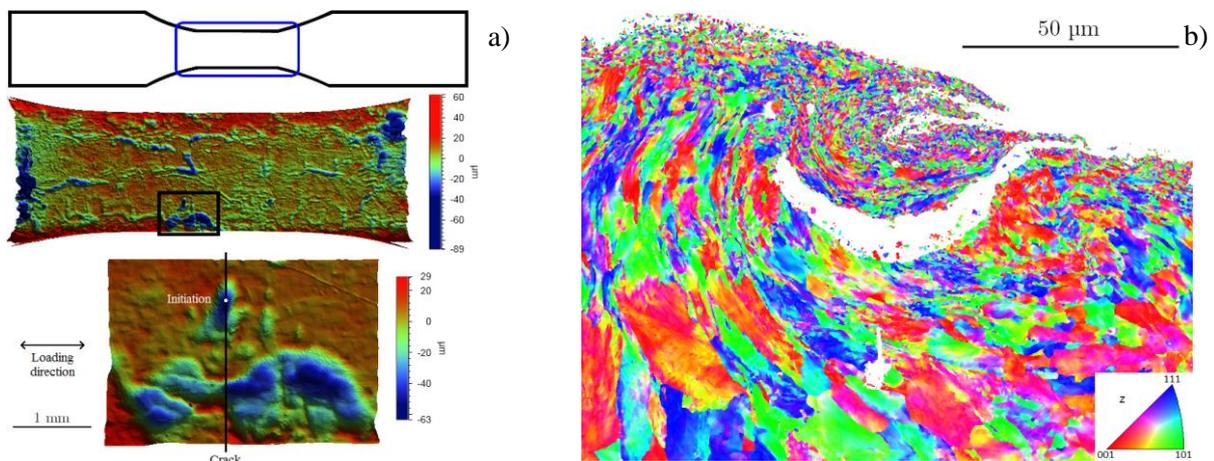


Figure 1. a) géométrie de l'éprouvette et défaut de surface observé après forgeage à chaud, b) Gradient de microstructure observé en coupe sous la surface d'une bielle grenillée par shot-blasting

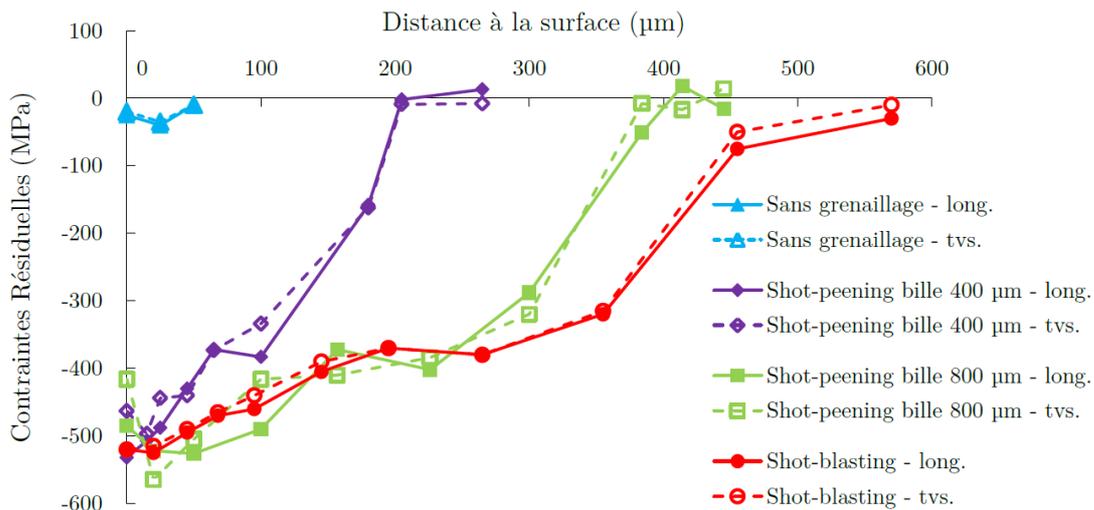


Figure 2. Profils des contraintes résiduelles dans les éprouvettes issues des bielles

Des éprouvettes relevant des cinq lots ont été prélevées dans l'âme de bielles puis sollicitées en flexion plane avec un rapport de charge $R=-1$. Toutes les éprouvettes ont été intégralement scannées au profilomètre 3D avant et après essai afin de caractériser, en particulier, la topologie de surface dans la zone d'amorçage.

2. Effets des défauts de surface

L'ensemble des éprouvettes testées a fait apparaître un amorçage localisé au niveau de défauts locaux introduits lors de l'opération de forgeage. Pour le cas particulier du lot comprenant l'opération de forgeage seule, l'absence de gradient de microstructure, d'érouissage et de contrainte résiduelle laisse penser que seule la topologie de surface contrôle le comportement en fatigue.

Dans la littérature, la majorité des travaux visant à intégrer l'effet de l'état de surface sur le comportement en fatigue a été conduite sur des composants usinés possédant des profils périodiques. Dans le cadre des bielles forgées, l'amorçage ayant lieu au niveau de défauts ponctuels, les approches basées sur des grandeurs globales caractérisant l'état de surface de type R_a ou S_a ne peuvent être employées. L'approche la plus directe consiste à utiliser la géométrie scannée pour estimer la concentration de contrainte générée par le défaut via un critère analytique [8] ou directement la limite d'endurance via le critère empirique de Murakami [9]. Les défauts présentant des géométries très variées et parfois très complexes, il a été choisi, dans un premier temps, d'approcher la forme des défauts à l'aide d'une semi-ellipsoïde. Cette analyse permet notamment d'obtenir pour chaque éprouvette la distribution de la population de la surface projetée du défaut $area^{1/2}$ du critère de Murakami et la concentration de contrainte proposée par Peterson

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (2)$$

Avec ρ le rayon d'entaille et t la profondeur du défaut.

Le critère de Murakami s'écrit à partir de la donnée de $area^{1/2}$

$$\sigma_D = \frac{1.43(H_v + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \quad (3)$$

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus est présenté dans un diagramme de Kitagawa sur la Figure 3. Pour le lot après forgeage seul, la tenue en fatigue est très dispersée et toujours inférieure à celle du lot poli ; jusqu'à 34% inférieure pour le plus gros défaut observé. L'effet de la taille de défaut sur la limite d'endurance semble bien suivre la pente de 1/6 proposée par Murakami. La taille critique de défaut à partir de laquelle la limite d'endurance chute avec la taille de défaut est de 40 μm . Utiliser directement le critère de Murakami en intégrant la dureté ($H_v=292$) du matériau fournit en revanche des prédictions très conservatives (Courbe en pointillées).

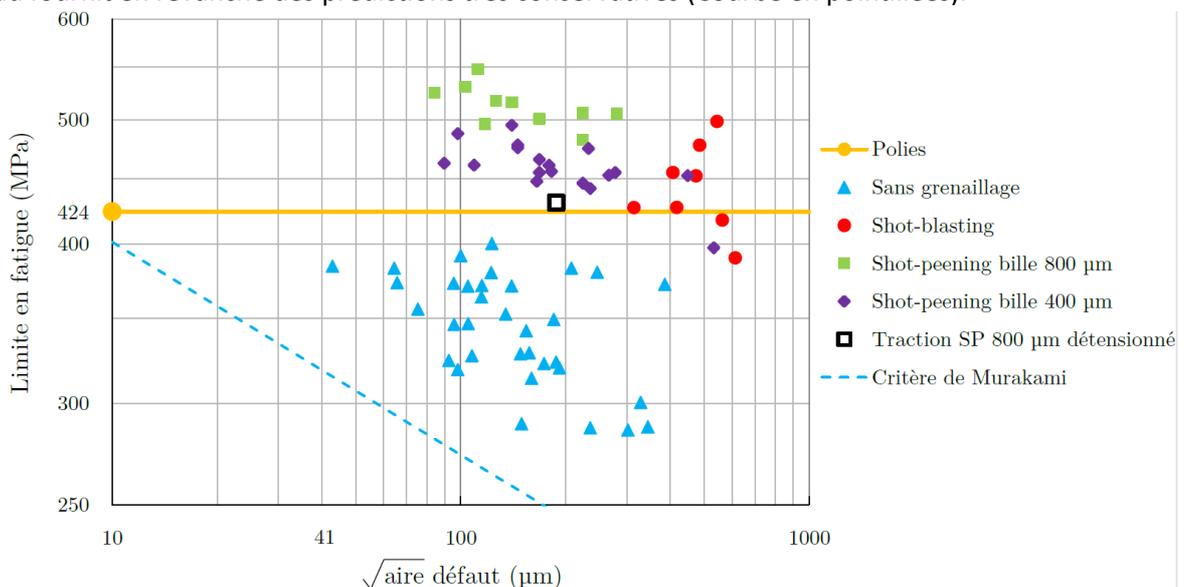


Figure 3. Diagramme de Kitagawa –Takahashi synthétisant l'ensemble des résultats expérimentaux

Ces approches restent limitées à plusieurs titres. Elles ne prennent pas en compte la possible interaction entre défauts et elles peinent à intégrer l'effet des champs de contrainte multiaxiaux notamment ceux dus aux contraintes résiduelles. Pour contourner ces limitations, une démarche numérique a été développée. Les scans 3D des défauts critiques avec une résolution spatiale de 3 μm en surface ont été utilisés pour générer un maillage représentatif des défauts réels. Un calcul élastique de la zone critique sollicitée en flexion est ensuite conduit afin d'estimer le champ de contrainte généré. Un critère d'amorçage non local basé sur l'estimation de la contrainte à une distance donnée du point le plus sollicité ou moyennée dans un volume de taille fixé est appliqué (Figure 4). Utiliser une approche non locale permet entre autre de s'affranchir des problèmes de finesse de maillage en surface. La distance (40 μm) ou la taille du volume (de rayon 80 μm) optimale est ensuite identifiée par analyse inverse de façon à minimiser l'erreur de prédiction sur l'ensemble de la population d'éprouvettes. Les deux méthodes point et volume fournissent des prédictions proches avec une erreur maximale de 15% (Figure 4b).

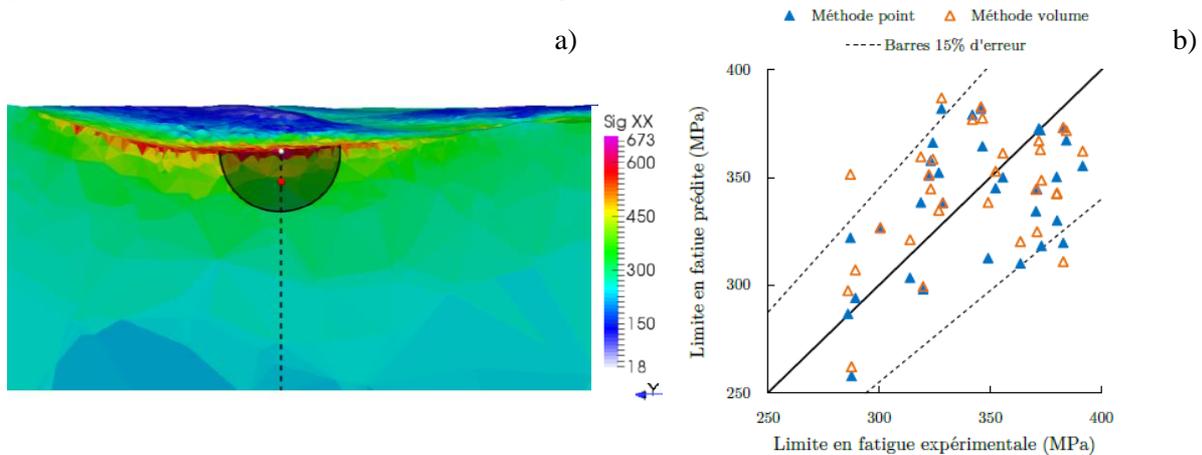


Figure 4. a) Vue en coupe d'une simulation d'un défaut critique, point chaud indiqué en blanc. Les méthodes points (en rouge) et volume (sphère centrée sur point chaud) et b) prédictions associées

Notons que, sous l'action du chargement de flexion les défauts génèrent au point critique un champ de contrainte principalement uniaxial, ceci étant dû aux formes plates des défauts :

Position	Σ_{11}/Σ_0	Σ_{22}/Σ_0	Σ_{33}/Σ_0
Fond du défaut (surface)	2.17	0.36	0.26
A 40 μm de profondeur	1.22	0.06	0.12

Table 1. Champ de contrainte au fond et au cœur du défaut sous une sollicitation d'amplitude Σ_0

2. Effets des défauts de surface et des contraintes résiduelles

Après grenailage, les bielles contiennent toujours les défauts locaux introduits lors du forgeage mais également des gradients de contraintes résiduelles et d'écroissage. Pour les trois conditions de grenailage étudiées, une amélioration significative de la limite d'endurance est observée. A taille équivalente de défaut, les lots grenailés ont une limite d'endurance supérieure d'environ 150 MPa par rapport au lot non grenailé.

La dureté ainsi que la largeur de pic suivent les mêmes tendances et sont affectées sur une profondeur égale à celle des contraintes résiduelles. Notons que selon le critère de Murakami (eq.3), pour une taille de défaut de 100 μm , une augmentation de dureté de 60Hv devrait générer une augmentation de la limite d'endurance de 40 MPa. Afin de découpler l'effet de l'écroissage et des contraintes résiduelles, des éprouvettes rectifiées puis grenailées par shot-peening ont été testées

avant et après détensionnement en traction (avec un allongement de 1%). Pour ces essais, la chute de la limite d'endurance de 100MPa après détensionnement démontre l'impact prédominant des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue.

Dans la modélisation proposée les contraintes résiduelles sont intégrées via la contrainte hydrostatique du critère de Dang Van [10]. Le critère de Dang Van s'écrit, dans le cas d'un chargement uniaxial proportionnel :

$$\tau_a + \alpha \sigma_{H,\max} \leq \beta \quad (2)$$

où τ_a est l'amplitude du cisaillement, $\sigma_{H,\max}$ est la contrainte hydrostatique maximale et α, β sont des paramètres matériau. Les contraintes résiduelles sont supposées constantes au cours du cyclage. Cette hypothèse a pu être vérifiée via le suivi des contraintes résiduelles sous chargement de fatigue à grand nombre de cycles.

La figure 5 montre la limite en fatigue expérimentale de chaque éprouvette en fonction du K_f obtenu par simulation, qui intègre à la fois l'influence du défaut et celle des contraintes résiduelles. L'ensemble des points correspondant aux différents lots se répartit parfaitement autour de la courbe $\sigma^D = \sigma_0^D / K_f$ avec σ_0^D la limite d'endurance de référence à l'état poli.

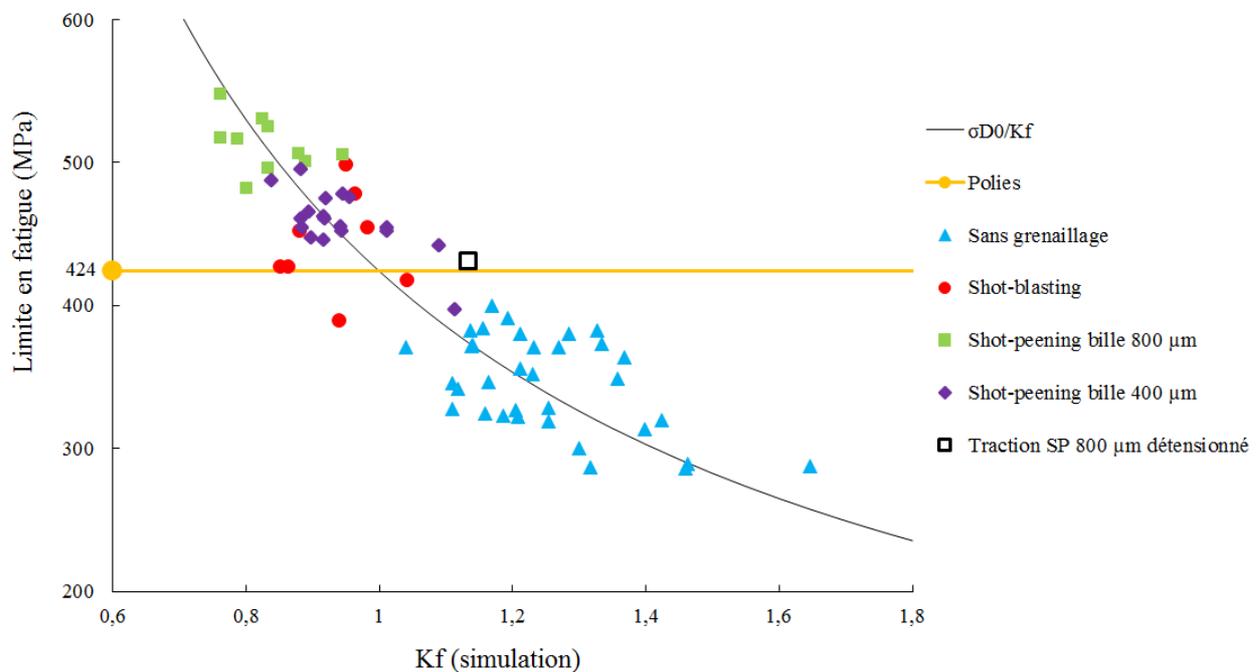


Figure 5. Comparaison entre les limites de fatigue expérimentales des différents lots et la prédiction du critère non locale (courbe $\sigma^D = \sigma_0^D / K_f$)

Cette courbe illustre l'influence des défauts et du grenailage en fatigue et le caractère prédictif de la démarche développée. Elle montre également que l'approche adoptée permet de prédire la différence de tenue observée entre les 2 lots ayant subi une opération de Shot Peening. Afin d'expliquer l'origine de l'écart de tenue en fatigue de ces deux lots possédant des niveaux de contraintes résiduelles et d'érouissage très proches, des éprouvettes ont été scannées avant et après grenailage. Les simulations numériques conduites sur des défauts possédant des K_f proches avant et après grenailage montrent que le K_f du lot grenailé avec des billes $\varnothing 400\mu\text{m}$ n'est pas affecté par le grenailage alors que celui du défaut ayant subi un grenailage avec des billes $\varnothing 800\mu\text{m}$ est affecté (Figure 6). La conduite de ces calculs permet donc de montrer que la différence de topologie de surface locale dépend de la taille de bille employée et a in fine un impact non négligeable sur la tenue en fatigue.

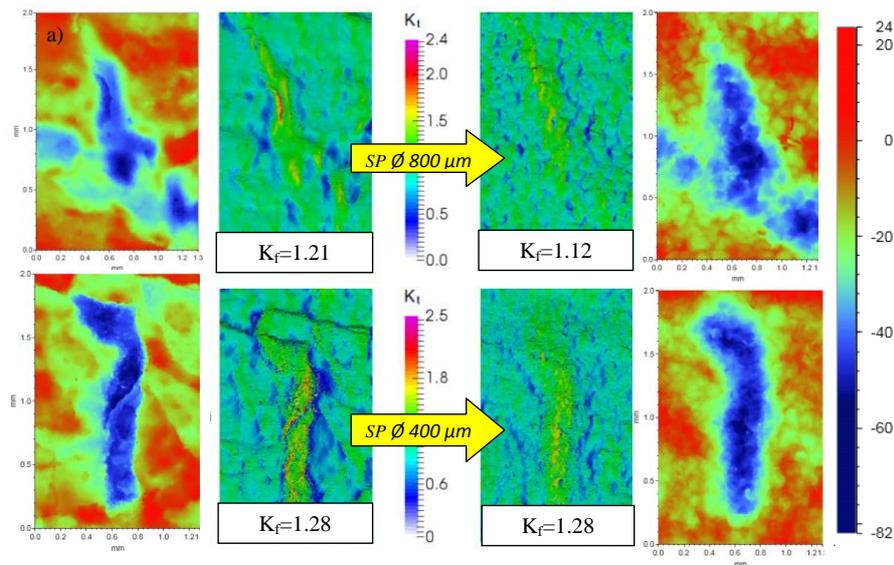


Figure 6. Comparaison de défauts avant et après grenailage shot-peening bille ϕ 800 μm et ϕ 400 μm . La surface scannée, le K_t en surface et le K_f obtenus par simulation sont indiqués.

Conclusion

Ces travaux permettent de montrer l'importance de la prise en compte de la topologie de surface et des contraintes résiduelles pour la prédiction de la tenue en fatigue des pièces forgées à chaud grenillées comportant des défauts naturels dus à l'incrustation de la calamine. La modélisation proposée doit mettre être employée en aval d'une simulation numérique de grenailage afin d'obtenir une chaîne numérique globale. Cet aspect du projet ANR DEFISURF est en cours de développement avec le CEMEF et a pour objectifs de prédire par simulation numérique l'écroutissage, les contraintes résiduelles ainsi que la topologie de surface issue du grenailage.

Références

- [1] Shahzad, M., Chaussumier, M., Chieragatti, R., Mabru, C., Rezai Aria, F., 2010, Influence of anodizing process on fatigue life of machined aluminium alloy, *Procedia Engineering*, 2: 1015–1024
- [2] Chomienne, V. (2014). Étude de l'influence de l'intégrité de surface en tournage de l'acier 15-5PH sur la tenue en fatigue en flexion rotative. PhD thesis, INSA, Lyon
- [3] Souto-Label, A., Guillemot, N., Lartigue, C., Billardon, R. Characterization and influence of defect size distribution induced by ball-end finishing milling on fatigue life, *Procedia Engineering*, V19, 2011.
- [4] Fathallah, R., Laamouri, A., Sidhom, H., & Braham, C. (2004). High cycle fatigue behavior prediction of shot-peened parts. *Int. J. of Fatigue*, 26(10), 1053 – 1067
- [5] Kim, J. C., Cheong, S. K., & Noguchi, H. (2013). Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel. *Int. J. of Fatigue*, 114 – 122
- [6] D. Shang, X. Liu, Y. Shan, E. Jiang, (2016) Research on the stamping residual stress of steel wheel disc and its effect on the fatigue life of wheel, *Int. J. of Fatigue*, 93, 173–183
- [7] Dehmani, H., Brugger, C., Palin-Luc, T., Mareau, C., Koechlin, S. 2016 Experimental study of the impact of punching operations on the high cycle fatigue strength of Fe-Si thin sheets, *IJF* 82, 721-729
- [8] Peterson, R. E. (1974). *Stress Concentration Factors*. New York : John Wiley and Sons.
- [9] Murakami Y. *Metal fatigue: effects of small defects and non-metallic inclusion*. London: Elsevier; 2002.
- [10] Dang Van, K. (1993). Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue. In D. McDowell & J. Ellis (Eds.), *Advances in Multiaxial Fatigue* (pp. 120 – 130). ASTM STP1191.