



## Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/11392>

### To cite this version :

Foued ABROUG, Etienne PESSARD, Guénaël GERMAIN, Franck MOREL, Etienne CHOVE -  
Effet des défauts d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage Al7050. - 2016

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)

Effet des défauts d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage Al7050.

Foued ABROUG<sup>(a)</sup>, Étienne PESSARD<sup>(a)</sup>, Guenael GERMAIN<sup>(a)</sup>, Franck MOREL<sup>(a)</sup>,  
Etienne CHOVE<sup>(b)</sup>.

(a) LAMPA centre Angers – Arts et métiers ParisTech, 49035, Angers Cedex – France.

(b) Europe Technologies – 2, rue de la Fonderie – B.P. 20536, 44475  
CARQUEFOU CEDEX – France.

Mails : [foued.abroug@ensam.eu](mailto:foued.abroug@ensam.eu), [etienne.pessard@ensam.eu](mailto:etienne.pessard@ensam.eu),  
[guenael.germain@ensam.eu](mailto:guenael.germain@ensam.eu), [franck.morel@ensam.eu](mailto:franck.morel@ensam.eu),  
[e.chove@europetechnologies.com](mailto:e.chove@europetechnologies.com)

**Résumé :** Lors du fraisage UGV de pièces aéronautiques, certains défauts géométriques, tels que les ressauts et les marques de vibration, peuvent être générés. Pour obtenir une surface de bonne qualité, une opération de rectification (manuelle et coûteuse) est souvent conduite pour faire disparaître ces défauts d'usinage. Afin d'améliorer leur tenue à la corrosion, ces pièces subissent également un traitement de surface (décapage + anodisation) susceptible de générer des piqûres en surface. L'objectif de cette étude est d'identifier l'impact sur la tenue en fatigue de la présence des défauts de surface créés lors de l'usinage UGV ou du traitement de surface sur l'alliage d'aluminium 7050. Après avoir répertorié et reproduit les défauts de surface fréquemment observés sur les pièces industrielles, une campagne d'essais de fatigue en flexion plane est réalisée. Différents états de surface sont générés sur la surface d'un nombre suffisant de lots d'éprouvettes. Les premières caractérisations d'intégrité de surface réalisées tendent à montrer que l'effet de l'usinage sur les contraintes résiduelles et l'érouissage est peu marqué dans nos conditions. Seul l'aspect géométrique des surfaces étudiées est donc

considéré dans ce travail. L'objectif est dans un premier temps de hiérarchiser les défauts de surface en fonction de leur impact sur la tenue en fatigue tout en fixant des critères discriminants qui spécifient leur acceptabilité. Les résultats montrent qu'il est nécessaire de dégrader de manière importante l'état de surface pour observer un abattement de la tenue en fatigue. Par ailleurs, on constate bien que l'opération de ponçage manuelle permet de supprimer l'effet des défauts d'usinage sur le comportement en fatigue. Afin de prédire l'effet de l'état de surface sur la tenue en fatigue, une approche numérique est également développée. La topologie de surface est caractérisée expérimentalement pour être introduite dans un modèle éléments finis. La localisation de l'amorçage observée numériquement est en accord avec l'expérience. Les prédictions de différents critères en fatigue sont discutées sur une large gamme de défaut de surface.

**Mots clés:** défauts d'usinage, tenue en fatigue, alliage d'aluminium.

## 1 Introduction

Cette étude fait partie du projet de recherche FUI QUAUSI, qui porte sur le contrôle de l'usinage et du parachèvement des grandes pièces structurales destinées à l'aéronautique. Le matériau étudié dans cet article est l'Aluminium 7050-T7451. Lors de l'usinage UGV des pièces aéronautiques, des défauts macro-géométriques peuvent être créés. Des ressauts d'usinage peuvent être observés suite au décalage lors des passages successifs de l'outil d'usinage. Des marques de vibrations peuvent aussi apparaître lors du fraisage en roulant des pièces aéronautiques à parois fines.

Afin de respecter les cahiers de charges sévères imposées par l'industrie aéronautique, une opération de parachèvement manuel est souvent réalisée pour rectifier ces défauts d'usinage.

L'usinage par le traitement thermomécanique local qu'il génère peut modifier l'intégrité de surface des pièces fabriquées et donc modifier leur tenue en fatigue. Les paramètres d'intégrité de surface modifiée lors de l'usinage les plus étudiés dans la littérature sont :

- la topologie de surface (Shahzad 2011), (Guillemot 2010)
- les contraintes résiduelles (Tang 2009), (Rao et al 2001)
- la microstructure (Campbell 2006)

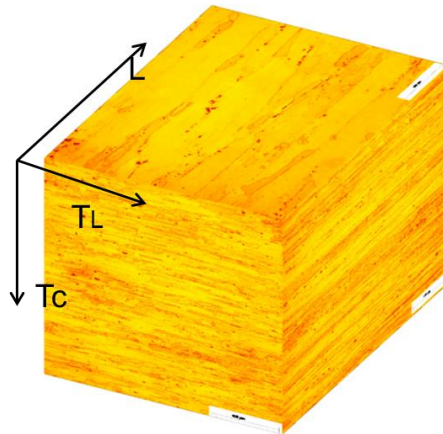
L'objectif de cette étude est d'identifier l'effet des défauts d'usinage sur la tenue en fatigue. Notre objectif est également de développer une méthode de prédiction robuste permettant de prédire la tenue en fatigue des pièces usinées sur une large gamme de défaut et d'état de surface.

## 2 Matériau et Procédé expérimental

### 2.1 Caractéristiques du matériau

Le matériau d'étude est l'aluminium 7050 qui est largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Cette nuance présente des caractéristiques mécaniques les plus élevées parmi les alliages d'aluminium ainsi qu'une très bonne résistance à la corrosion.

Le matériau brut dans lequel ont été prélevées les éprouvettes est une tôle d'épaisseur 30 mm. Pour cette gamme d'épaisseur le matériau présente un taux de recristallisation important. Les zones de regroupement de grains recristallisés et non-recristallisés peuvent atteindre quelques millimètres de longueurs. Les grains, quant à eux, ont des dimensions allant de 5 à 300 $\mu\text{m}$  dans les sens L et TL, et de 5 à 50 $\mu\text{m}$  dans le sens TC. Différents type d'inclusions intermétalliques sont présentes au niveau des joints des grains et dans les grains recristallisés ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{AlCuZn}$ , etc ...). Ces inclusions sont fragiles et peuvent constituer des sites d'amorçage des fissures en fatigue (Shahzad 2011).



**Figure 1: Microstructure de l'Alu 7050-T7451 (L= sens de laminage ; TL= transversale long ; TC= transversale court).**

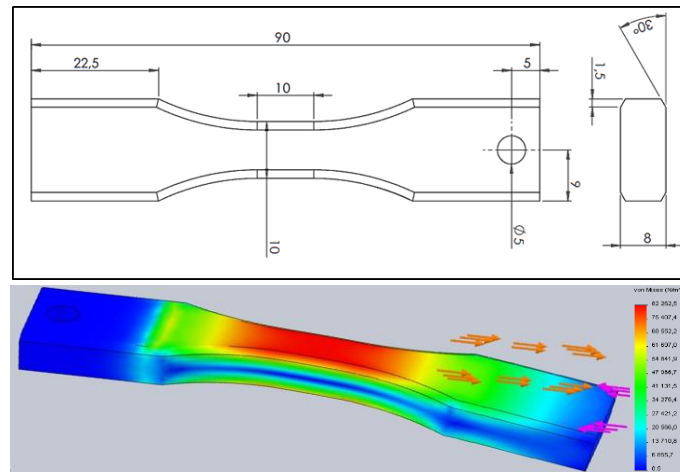
Des essais de traction monotone ont été effectués afin de déterminer les propriétés mécaniques du matériau à 0°, 45° et 90° par rapport au sens de laminage (tableau 1). L'anisotropie de comportement mécanique de la nuance étudiée est donc peu marquée et sa ductilité est limitée avec un allongement maximal de 13,9%.

**Table 1 : caractéristiques mécaniques de l'Al7050-T7451.**

Sens de laminage	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	Allongement %
0°	475	536	12.3
45°	428	496	13.9
90°	475	538	11.9

## 2.2 Conditions expérimentales



Les essais de fatigue sont réalisés sous un chargement de flexion plane purement alternée ( $R=-1$ ). Ce type d'essai, par le gradient de chargement qu'il génère permet de solliciter principalement la surface et donc de caractériser son effet sur le comportement en fatigue du matériau. La géométrie de l'éprouvette dimensionnée spécifiquement pour cette étude est présentée par la figure 2. Les essais de fatigue sont réalisés suivant la méthode d'escalier (StairCase) sur une machine de fatigue de type Rumul Cracktonic à température ambiante. 15 éprouvettes ont été utilisées par lot pour ces StairCase sauf pour les lots poncé et  $Ra4,9\mu m$  où 10 éprouvettes ont été utilisées. La fréquence est de l'ordre de 74 Hz. Le critère d'arrêt est l'apparition d'une fissure suffisamment longue (de taille supérieure à 5mm) détectée par une chute de fréquence de 0.75Hz), ou  $2.10^6$  cycles atteints.

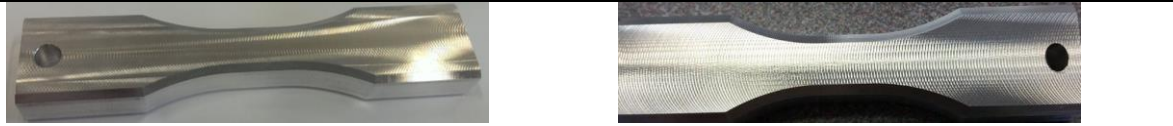


**Figure 2: a) géométrie de l'éprouvette de flexion plane, b) distribution de contraintes lors du chargement.**

Dans ce projet une étude préliminaire sur des composants aéronautique usinés par fraisage UGV a été conduite afin de définir différentes catégorie de défauts locaux (ressaut, vibration) et d'état de surface dégradés susceptibles d'apparaître industriellement. Le présent travaille se concentrera sur des états de surface réalisés en usinage en bout allant de l'état poli au  $Ra= 4,9$  microns en passant par l'état poncé. (table 2).

**Table 2 : états de surfaces testées en fatigue.**

7050-Polie	7050-Ra2.3
	
7050-Ra0.6	7050-Ra4.9



7050-Poncée



Les éprouvettes 7050-Polie ont été manuellement polies à l'aide de papiers abrasifs allant de grain 800 à grain 2400. L'usinage des éprouvettes présentant un état de surface « usiné » a été réalisé en fraisage en bout (figure 3). Les conditions de coupe ont été modifiées afin d'obtenir des rugosités différentes (tableau 3). Pour les éprouvettes poncées, les éprouvettes ont été parachevées par notre partenaire industriel Mecachrome selon les conditions industrielles.

L'ensemble des profils de ces états de surface est présenté par la figure 4.

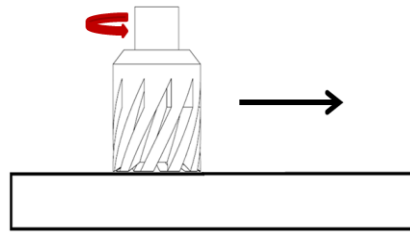


Figure 3: stratégie d'usinage des éprouvettes usinées.

Table 3 : conditions d'usinage des états de surfaces.

Etat de surface	N (tr/mn)	Fz (mm/dent)	Z (dents)	Rbec (mm)	D (mm)
Ra 0,6 $\mu$ m	24000	0.15	4	4	Ø20
Ra 2,3 $\mu$ m	10000	0.55	2	0.2	Ø20
Ra 4,9 $\mu$ m	10000	0.55	2	0.2	Ø20

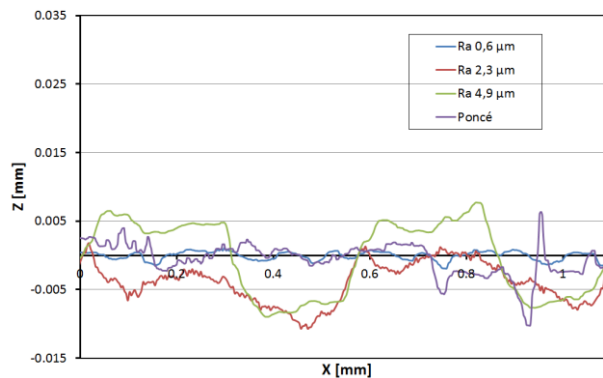


Figure 4: profil extrait des différentes éprouvettes.

Pour le matériau étudié qui présente une texture de laminage marquée et contient des grains de grande taille, la caractérisation des contraintes résiduelles n'est pas aisée. Des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées sur les différents états de surface. Il est difficile de conclure sur l'ensemble des valeurs obtenues. Les analyses des contraintes résiduelles se sont montrées concluantes uniquement pour les l'état de surface poli et Ra 2,3 µm. Les résultats ont montré que sur ces lots, il n'y avait pas de contraintes résiduelles en surface.

Concernant la topologie de surface, les paramètres de la hauteur et les paramètres fonctionnels de surface ont été caractérisés (Griggiths 2001). Ces paramètres sont :

$$S_a = \frac{1}{S} \iint_S |Z(x,y)| dx dy \quad (1)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S (Z(x,y))^2 dx dy} \quad (2)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \iint_S (Z(x,y))^4 dx dy \quad (3)$$

$$S_{vi} = \frac{1}{S_q} \frac{V_v(h_{0.8})}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} \quad (4)$$

Avec : Sa hauteur moyenne arithmétique de la surface ; Sq : hauteur efficace de la surface ; Sku : facteur d'aplatissement de la surface ; S<sub>vi</sub> : indice fonctionnel de la surface et V<sub>v</sub>(h<sub>0.8</sub>) : le volume du vide au fond des stries d'usinage qui représente le pourcentage entre 80% et 100%.

### 3 Résultats et discussions

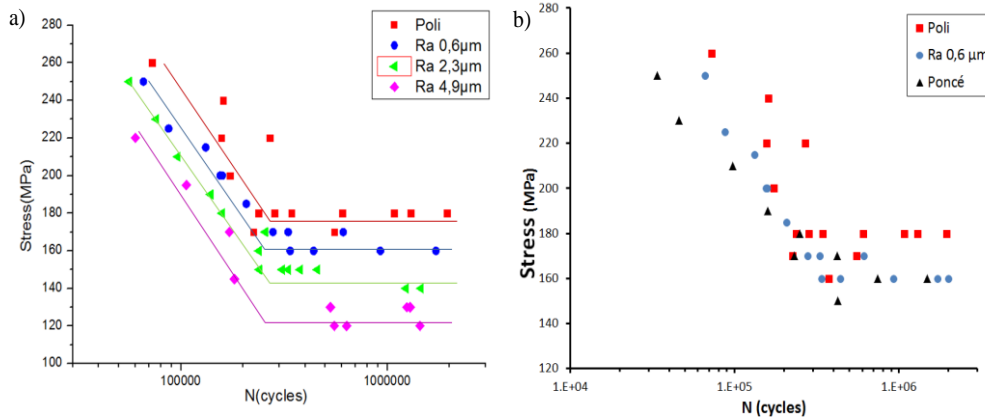
Les essais de fatigue ont permis de mettre en évidence l'effet de chaque état de surface sur la limite en fatigue. L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 4.

**Table 4 : résultats des essais et de prédiction de la limite en fatigue.**

Surface	Sa [µm]	Sku	Sq [µm]	S <sub>vi</sub>	Kf	σ <sub>D</sub> [MPa] (expérimental)	σ <sub>D</sub> [MPa] (calcul)
poli miroir	≤0.04	3.55	≤0.05	0.12	1	174	174
Ra0.6	1.106	2.499	1.187	0.088	1.026	160	169.6
Poncé	3.839	2.768	4.54	0.087	1.109	157	156.8
Ra2.3	4.243	7.36	6.414	0.051	1.241	141	140.24
Ra4.9	5.511	1.943	5.74	0.042	1.047	119	164.81

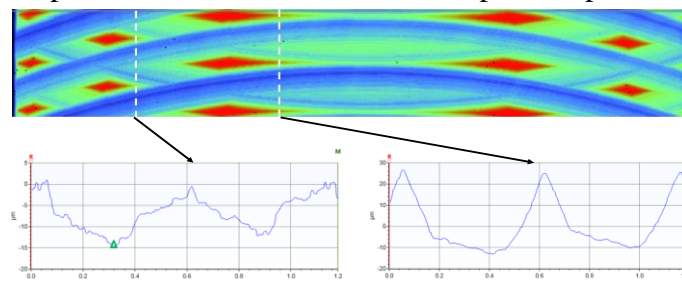
La limite de fatigue baisse progressivement en augmentant la rugosité de surface (figure 5-a). L'opération de parachèvement permet de supprimer les stries d'usinage

ainsi que les défauts d'usinage. La limite de fatigue pour cet état de surface est égale à celui de l'usinage classique Ra0,6 $\mu\text{m}$ (figure 5-b).



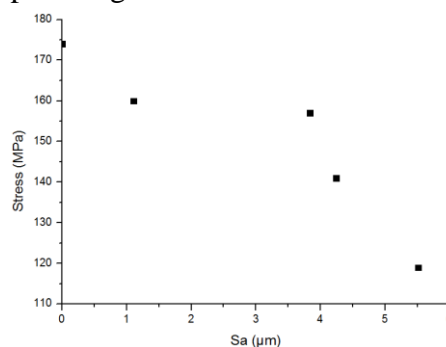
**Figure 5: courbe de Wöhler présentant l'influence a) de la rugosité de surface et b) du parachèvement sur la limite d'endurance.**

De nombreux critères tentent de relier l'état de surface à la tenue en fatigue. L'inconvénient de ces critères est qu'ils se basent tous sur un profil mesuré sur une ligne et qu'il est difficile d'extrapoler ces critères aux états de surface hétérogène pouvant être obtenu en fraisage en bout (figure 6). L'utilisation des paramètres de caractérisation de surface présentés précédemment semble donc être plus adaptée.



**Figure 6: variation du profil obtenu en fonction de la ligne de mesure.**

L'évolution de la limite d'endurance en fonction de la hauteur moyenne arithmétique de la surface  $S_a$  est présentée par la figure 7.



**Figure 7: évolution de la limite d'endurance en fonction de  $S_a$ .**



D'après la figure 6 le paramètre Sa semble bien corrélérer avec la tenue en fatigue des différents lots testés. La limite d'endurance diminue lentement pour les faibles valeurs de Sa puis chute plus brutalement lorsque le Sa dépasse une valeur seuil de 3,5µm.

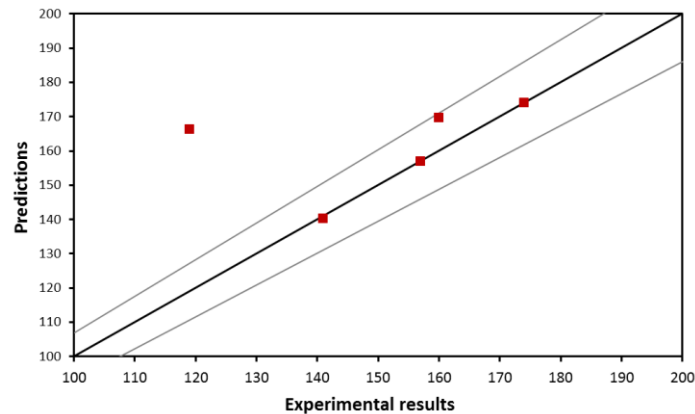
L'approche proposée par (Souto-Lebel 2014) est un des rares approches se basant sur des paramètres surfaciques et non linéiques. Elle repose sur le calcul d'un facteur effectif de concentration de contraintes dépendant de plusieurs des paramètres de surface :

$$K_f = 1 + S_{vi} \cdot S_{ku} \cdot \frac{S_q}{a_c} \quad (5)$$

Avec  $a_c$  est une taille critique de défaut qui peut être déterminée par recalage. La limite en fatigue des éprouvettes usinées est alors prédite en se référant à la limite en fatigue d'un matériau sans défaut de surface, dans notre cas la référence polie :

$$\sigma_{D_{usinées}} = \frac{\sigma_{D_{polie}}}{K_f} \quad (6)$$

La taille critique de défaut  $a_c$  permettant de réduire les erreurs de prédictions pour nos différentes lots est égale à 10 µm. L'ensemble des résultats sont présentés dans le tableau 4), la figure 8 permet de comparer les prédictions obtenus par cette approche et les résultats expérimentaux obtenus :



**Figure 8: comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction suivant la méthode de Souto-Lebel.**

D'après la figure 8 l'approche de Souto-Lebel est efficace pour les 4 lots possédant les plus faibles rugosités. L'erreur maximale est alors inférieure à 7%.

En revanche, la prédiction de la limite en fatigue de l'état de surface Ra4,9 est trop optimiste.

Une approche numérique est en cours de développement afin de mieux prendre en compte la distribution de contrainte au fond des stries d'usinage pour la prédiction de la tenue en fatigue d'une large gamme d'état et défaut de surface. Dans cette nouvelle approche, la topologie de surface est caractérisée expérimentalement pour être ensuite

introduite dans un modèle éléments finis. Les premiers résultats sont prometteurs, la localisation de l'amorçage observée numériquement est entre autre en accord avec les expériences menées.

#### **4 Conclusion**

En se basant sur une campagne d'essais de fatigue en flexion plane réalisée sur l'Al7050T7451 en présence de différents états de surfaces, les conclusions de cette étude sont les suivantes:

1. Pour l'Al7050-T7451, Il faut dégrader de manière importante l'état de surface pour observer un abattement significatif de la tenue en fatigue
2. L'opération de parachèvement de type ponçage permet d'obtenir une bonne tenue en fatigue.
3. Le paramètre Sa est bien corrélé avec la limite d'endurance des différents lots testé. Au-delà d'une valeur de Sa de 3,5  $\mu\text{m}$ , la limite en fatigue baisse plus fortement.
4. Le calcul du facteur effectif de concentration de contraintes de Souto-Lebel permet d'obtenir une bonne prédiction de la limite en fatigue pour les états de surface usinée sauf pour le lot Ra4,9 étudié où les stries d'usinages ont une faible acuité et une grande taille.

#### **Remerciements**

Ce travail a été réalisé au sein du projet FUI QUAUSI avec le soutien de partenaires industriels (Dassault, Europe Technologie, Figeac Aéro, Mecachrome, Spring Technologie, Precise, GEBE2, CETIM) et académiques (IRCCyN-IUT Carquefou).

#### **References**

C.E. Campbell, L.A. Bendersky , W.J. Boettinger , R. Ivester; Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining. Materials Science and Engineering A 430 (2006) 15–26.

Nicolas Guillemot, Prise en compte de l'intégrité de surface pour la prévision de la tenue en fatigue de pièces usinées en fraisage, ENS Cachan 2010.

Griffiths, B., 2001. Manufacturing Surface Technology: Surface integrity and Functional Performance. London: Prenton Press.

B. Rao, Y. C. Shin, Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 1763–1781.

M. Shahzad, M. Chaussumier, R. Chieragatti, C. Mabru, F. Rezai Aria, Influence of surface treatments on fatigue life of Al7010 alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1821–1826

Souto-Lebel, A., 2014. Rôle de l'intégrité de surface dans la tenue en fatigue d'un acier bainitique après fraisage de finition, Cachan: ENS Cachan.

Z.T. Tang, Z.Q. Liu, Y.Z. Pan Y. Wan, X. Ai. The influences of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 4502–4508.