

Evaluation des contraintes résiduelles induites par traitements mécaniques dans un alliage de titane bi-phasé par trois méthodes de dépouillement différentes

B. Voillot*^o, F. Hild*, P. Aimedieu*, P. Mella*.

^{*}*LMT-Cachan, ENS Cachan/CNRS UMR8535, 61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan, France.*

^o*Messier-Bugatti-Dowty, Inovel Parc Sud, 7 rue Général Valérie André, 78140 Vélizy-Villacoublay, France.*

Email : voillot@lmt.ens-cachan.fr

JL. Lebrun.

Ecole Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie (ESTP Paris), 28 avenue du Président Wilson, 94234 Cachan, France.

A. Cox.

Messier-Bugatti-Dowty, Cheltenham Road East Gloucester, GL2 9QH, England.

Mots clés : Diffraction des rayons X, DRX, Ti5553, intégrité de surface, modélisation de diffractogrammes

1 INTRODUCTION

Les trains d'atterrissage d'avions sont des structures conçues pour résister à des sollicitations mécaniques cycliques intenses dans un environnement corrosif. Grâce à leur résistance spécifique très élevée et à leur caractère inoxydable plusieurs alliages de titane ont été récemment introduits pour remplacer les aciers à très haute résistance utilisés pour fabriquer certaines grosses pièces forgées (sur Boeing 787 et Airbus A350 par exemple). Ces pièces de forme complexe sont complètement usinées puis grenaillées. La tenue en fatigue de ces pièces dépend de leur intégrité de surface, viz. de la microgéométrie de la surface et de l'état microstructural et mécanique du matériau en sous-surface.

L'objectif de ce travail est de contribuer au développement d'une méthode performante d'évaluation des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X (DRX) en sous-surface de pièces usinées et grenaillées dans un alliage de titane de type Ti5553. Un nouveau protocole de dépouillement grâce à la corrélation et à la modélisation de pics par une fonction choisie a priori a été développée.

2 ALLIAGE DE TITANE ET INTEGRITE DE SURFACE

L'un des alliages de titane à haute performance utilisés par Messier-Bugatti-Dowty, groupe Safran est la nuance Ti5553 dont la composition est donnée dans le tableau 1.

| Élément | Al | V | Mo | Cr | Fe | C | O | Ti |
|---------|----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|
| %wt | 5 | 5.2 | 5.2 | 2.7 | 0.4 | 0.009 | 0.154 | Bal. |

Tableau 1 – Composition chimique de l'alliage Ti5553

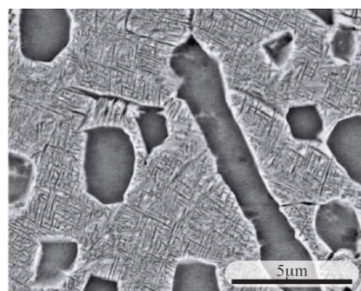


FIGURE 1 – Cliché MEB de la microstructure de l'alliage Ti5553 forgé de Messier-Bugatti-Dowty, (Duval, 2012)

La microstructure bi-phasée de cet alliage de titane est extrêmement complexe, ce qui rend très délicate l'évaluation des contraintes résiduelles par DRX. Comme illustré par la figure 1, la phase α de structure hexagonale compacte (60% massique) existe à la fois sous forme de nodules et de fines aiguilles dans une matrice de phase β de structure cubique centrée (40% massique). Après forgeage et usinage, la pièce est soumise à un grenaillage qui consiste à écrouir le matériau et à introduire des contraintes de compression grâce à des déformations plastiques induites par projection de billes. Cette opération a pour objectif d'améliorer la résistance de la pièce en fatigue. L'objectif final de ce travail est d'évaluer les contraintes résiduelles à différents stades de la fabrication de la pièce.

3 ANALYSE DE CONTRAINTES RESIDUELLES PAR DIFFRACTION DES RAYONS X

Les matériaux métalliques sont en général polycristallins et chaque grain est caractérisé par une famille de plans cristallins $\{hkl\}$ distants d'une valeur nommée distance interréticulaire. Lorsque cette distance est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des ondes incidentes (quelques dizaines de nanomètres), il y a apparition de phénomènes de diffraction.

En accédant aux variations des distances interréticulaires par l'intermédiaire de l'étude du déplacement d'un pic de diffraction, on déduit les déformations du réseau cristallin. La figure 2 illustre la relation entre les contraintes résiduelles et le déplacement d'un pic sur un diffractogramme. Ces phénomènes

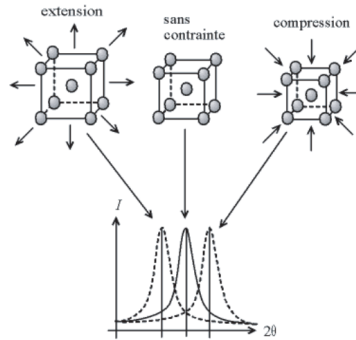


FIGURE 2 – Illustration de l'effet des contraintes sur une raie de diffraction

de diffraction vérifient la loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

où, λ représente la longueur d'onde incidente des rayons X, d la distance entre 2 plans atomiques qui diffractent, θ l'angle d'incidence du rayon incident par rapport à la normale au plan, n l'ordre de diffraction. En comparant les distances interréticulaires dans un matériau sans contrainte aux distances mesurées sur la pièce étudiée, on obtient une expression de la déformation. Ensuite en considérant la loi de comportement élastique, on détermine les contraintes associées aux déformations. On fait en général l'hypothèse d'isotropie du matériau sur le petit domaine polycristallin étudié par DRX.

Dans le cas des alliages de titane, on observe un étalement des pics de diffraction dû à une hétérogénéité de l'état de contrainte dans la zone exposée au rayonnement X. En utilisant les notation de la figure 3, on introduit le rapport

$$R = \frac{\eta}{I_{max} - I_{Bdf}} \quad (2)$$

où η représente l'amplitude du bruit blanc gaussien de l'acquisition, I_{max} la hauteur totale du pic et I_{Bdf} l'estimation du bruit de fond d'acquisition dû à la fluorescence du matériau.

Plusieurs auteurs notent la difficulté posée par les alliages de titane lorsqu'il s'agit de déterminer une position de pic de diffraction (Deleuze, 2010 et Lefebvre, 2009). Cela est dû aux phénomènes d'étalement de pics et de fluorescence (engendrant un rapport R élevé) propres aux alliages de titane. Comme on le constate dans la norme française (NF 15305, 2009), différentes méthodes de dépouillement sont utilisées dans les différents laboratoires équipés de diffractomètres. Nous allons en comparer trois pour déterminer quelle est celle qui est la plus adaptée pour l'analyse de pics présentant un rapport R élevé :

- la méthode du barycentre centré ;
- une méthode de corrélation de pics dont l'objectif est de déterminer la position d'un pic par rapport à un autre pic tous deux réels ;
- une méthode de régression suivant une loi de profil (Gauss, Voigt, Lorentz, etc) pour chaque pic mesuré. Cela consiste à déterminer la position d'un pic réel grâce à la régression d'une interpolation connue a priori.

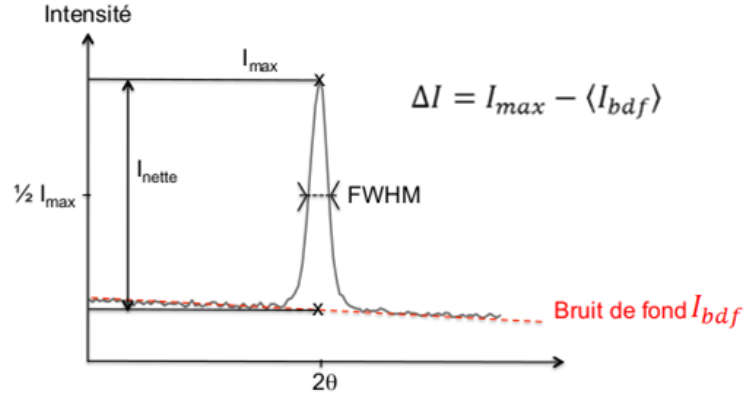


FIGURE 3 – Représentation de l'intensité diffractée en fonction de la position 2θ du détecteur et des grandeurs associées au pic de diffraction (Deleuze, 2009)

3.1 Méthode du barycentre

L'une des méthodes les plus utilisées pour l'analyse des contraintes résiduelles (NF 15305, 2009) consiste à calculer l'abscisse du barycentre de la surface formée autour du pic de diffraction. Le calcul du barycentre est effectué en soustrayant a priori le bruit de fond dû à la fluorescence du matériau au rayonnement X. On peut ensuite affiner cette méthode en itérant et réduisant la surface prise en compte autour de l'abscisse du barycentre, d'où son appellation de "méthode du barycentre centré". La robustesse de cette méthode de dépouillement varie suivant l'influence du bruit de fond sur la mesure (cf. figure 4).

3.2 Corrélation pic à pic

Après avoir déterminé la position absolue d'un pic grâce à l'interpolation par un signal de référence connu a priori, on peut déterminer le décalage relatif entre le pic de référence et un autre pic de la même série. Pour connaître la position d'un pic par rapport à un autre pic, tous deux mesurés, on minimise la distance entre les fonctions représentatives des deux pics f et g

$$\min_{a,b,u} \sum_x [(1+b)f(x) + a - g(x+u)]^2 \quad (3)$$

où f désigne le signal de référence, g le signal à corrélérer, $1+b$ le facteur multiplicatif de f pour atteindre une évolution comparable à g , a le décalage en intensité du signal, x la position en canal sur le capteur linéaire du diffractomètre et u le décalage recherché.

3.3 Modélisation par une fonction connue a priori

Dans ce troisième protocole de dépouillement des mesures de DRX, on modélise chaque pic par une loi de profil connue a priori. Pour trouver la position et les caractéristiques de la fonction (une gaussienne ici) qui caractérise le mieux le pic, il s'agit de minimiser :

$$\min_{I_b, D, \Delta I, x_0, \sigma_0} \sum_x \left[\frac{f(x) - I_b - Dx}{\Delta I} - g\left(\frac{x - x_0}{\sigma_0}\right) \right]^2 \quad (4)$$

où f représente le signal mesuré, g la gaussienne unitaire que l'on essaye de superposer au signal, $I_{bdf}(x) = I_b + Dx$ le bruit de fond de la mesure et $\Delta I = I_{max} - \langle I_{bdf} \rangle$ la hauteur de pic se détachant du bruit de fond. Les deux grandeurs importantes sont x_0 la position du pic et σ_0 la largeur du pic.

4 ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE DEPOUILLEMENT

Au cours de ce travail on a comparé les trois méthodes de dépouillement décrites précédemment. Il s'agit de qualifier et quantifier la robustesse des méthodes pour des pics plus ou moins bruités. Tout

d'abord des pics peu bruités comme ceux des aciers (avec un rapport $R = \frac{\eta}{I_{max} - I_{Bdf}} = 0.05$ entre le bruit et la hauteur de pic) ou ceux de l'alliage de titane plus bruités (avec un rapport $R = 0.2$). Au vu de la prédominance de la phase α (60% massique), il a été décidé de considérer cette phase pour analyser les contraintes résiduelles présentes au sein des éprouvettes d'alliage Ti5553. On a ainsi créé un ensemble de diffractogrammes correspondant à une série de pics dont la contrainte résiduelle associée est choisie telle que $\sigma = 100\text{MPa}$. On a ensuite traité ces séries de diffractogrammes grâce aux différentes méthodes d'analyse. Lors d'une étude probabiliste dont les données d'intérêt sont l'écart entre la contrainte simulée (100MPa) et la contrainte évaluée grâce aux différentes méthodes, on s'est particulièrement intéressé à l'écart type de ces résultats.

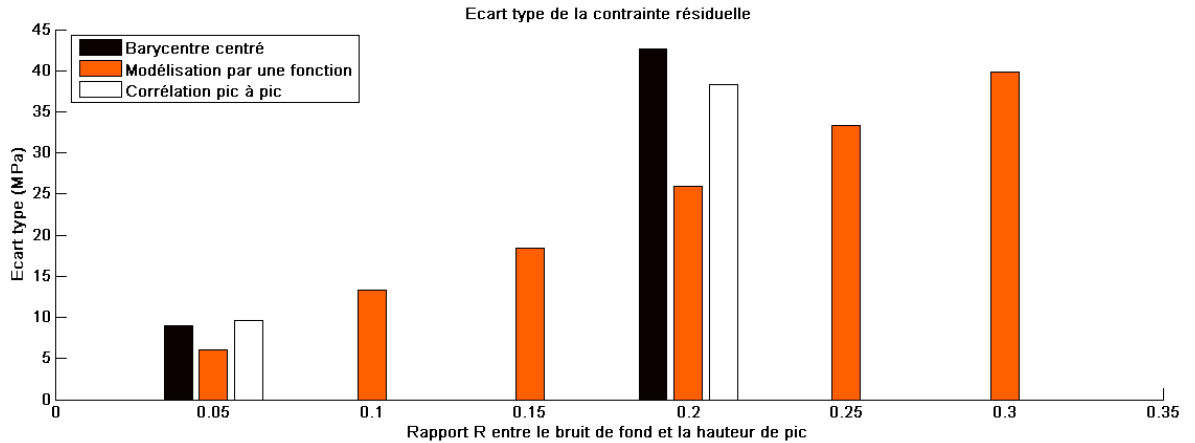


FIGURE 4 – Valeur de l'écart type pour les différentes méthodes d'analyse de contraintes

La méthode du barycentre apparait légèrement plus efficace lorsque le bruit est faible ($R = 0.05$) alors que la méthode de corrélation pic à pic est plus performante pour $R = 0.2$. On constate que la méthode de modélisation par une fonction est la plus robuste pour $R = 0.05$ et $R = 0.2$. Deux caractéristiques supplémentaires sont à relever :

- Les rapports entre les écarts types des méthodes de corrélation pic à pic et de modélisation par une fonction valent respectivement 1.41 et 1.58 pour les rapports $R = 0.2$ et $R = 0.05$, des valeurs proches de $\sqrt{2}$. En effet pour la méthode de corrélation de pics, la variance est proportionnelle au double de la variance du bruit d'acquisition alors qu'elle est proportionnelle à la variance du bruit d'acquisition pour la méthode de modélisation par une fonction ;
- l'écart type de la méthode de modélisation de pic augmente linéairement avec le rapport R.

Ce travail sera poursuivi en intégrant à l'étude d'autres modèles de fonction comme le Pearson-VII ou le pseudo-Voigt.

5 CONCLUSION

Cette étude nous a permis de montrer que le choix de la méthode de dépouillement des diffractogrammes a une influence sur la qualité de l'analyse des contraintes résiduelles. Pour de futures études sur l'alliage Ti5553 présentant des pics de diffraction fortement bruités, nous utiliserons la méthode qui s'est avérée la plus robuste i.e. la modélisation par une fonction connue a priori.

REFERENCES

- NF EN 15305, "Méthode d'essai pour l'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X", (2009).
- T. Duval, "Analyse multi-échelles des relations microstructures - propriétés mécaniques sous sollicitation monotone et cyclique des alliages de titane beta-métastable" thèse de doctorat de l'ENSMA, (2012).
- F. Lefebvre *et al.*, "External reference samples for residual stress analysis by X-ray diffraction", *Materials Science Forum*, 681, 215, (2011).
- C. Deleuze, "Méthodologie d'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X sur des pièces d'alliages de titane de nuance Ti-10V-2Fe-3Al" thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2010).