



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 5256

To cite this document: Chieragatti, Rémy and Espinosa, Christine and Lacombe, Jean-Luc and Limido, Jérôme and Mabru, Catherine and Salaün, Michel *Détermination d'un Kt local associé à la rugosité de surface ; influence sur la tenue en fatigue.* (2010) In: 29èmes journées de printemps de la SF2M "Influence des procédés sur la tenue en fatigue, rôle des défauts", 19-20 May 2010, Paris.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr

Détermination d'un K_t local associé à la rugosité de surface ; influence sur la tenue en fatigue

R.CHIERAGATTI^a, C.ESPINOSA^a, JL.LACOME^b, J.LIMIDO^b, C.MABRU^a,
M.SALAUN^a

^a Université de Toulouse, Institut Clément Ader, ISAE 10 av. Édouard Belin
31055 Toulouse, France

^b IMPETUS Afea, Grenade sur Garonne, France

Résumé:

Nous proposons une nouvelle approche de la détermination du coefficient de concentration de contraintes locales K_t dans le cadre de l'étude en fatigue des surfaces usinées. Cette approche est basée sur les travaux de Suraratchai [1] dans lesquels la texture de surface est modélisée par éléments finis dans le but d'identifier le K_t généré par la texture de surface. Le principal apport de nos travaux consiste en une définition robuste de la surface utile pour le calcul par EF de K_t par l'utilisation d'un filtre gaussien. La longueur de coupure de ce filtre a été associée à une longueur caractéristique du matériau. Le K_t ainsi défini a été introduit dans le calcul de durée de vie en fatigue de Suraratchai. La validation a été effectuée sur des surfaces à grands et petits rayons de courbure locale. Notre démarche donne de bons résultats avec une erreur maximale d'environ 15% par rapport aux essais. Cela nous permet ainsi de valider notre définition de K_t , sur un grand domaine d'utilisation des surfaces fraisées.

1. INTRODUCTION

De nombreux auteurs ont déjà proposé des modèles pour estimer la durée de vie en fatigue en tenant compte de la rugosité de surface. Trois approches ont été identifiées:

- relations empiriques entre paramètres de rugosité et durée de vie [2]
- la rugosité vue comme une fissure [3]
- la rugosité vue comme un concentrateur de contrainte

C'est sur cette dernière approche qu'est construite notre proposition.

L'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue peut être considérée sous l'angle des concentrations de contraintes locales qu'elle génère. Deux classes de modèles la décrivent : les modèles basés sur l'effet d'entaille et les modèles basés sur la mécanique de la rupture. Les modèles basés sur l'effet d'entaille font intervenir un coefficient empirique appelé le coefficient effectif de concentration de contraintes de fatigue (K_f) calculé à partir du coefficient de concentration de contrainte de l'entaille (K_t) et de l'indice de sensibilité à l'entaille du matériau (q). Les modèles basés sur la mécanique de la rupture sont bâtis sur la théorie de la propagation des fissures. La rugosité des surfaces modifie les contraintes locales qui affectent la propagation des fissures.

Ces deux classes de modèles sont basées sur le coefficient de concentration des contraintes local lié à la rugosité. Il existe plusieurs manières de déterminer ce coefficient :

- les modèles à profils présumés : Neuber [4], Peterson [5] et plus récemment Arola et Williams [6] ont proposés des expressions simples de calcul du coefficient de concentration des contraintes à partir d'un rayon d'entaille. Ces modèles simples ne permettent cependant pas la prise en compte de défauts relativement peu périodiques. C'est pourquoi, des études récentes cherchent à déterminer le coefficient de concentration de contraintes par calculs numériques ou MEF. Andrews et al [7] calculent le facteur de concentration de contrainte par la modification de l'expression établie par Peterson pour une entaille unique. Ils le corrigent par un facteur en tenant compte des entailles multiples en réalisant un calcul numérique géométrique. Ce modèle prend en compte correctement des entailles non régulières mais simplifie trop fortement la géométrie réelle.
- les modèles à profils mesurés : As [8] et Suraratchai [1] proposent de créer un modèle EF directement à partir du résultat de la mesure de surface. Cette approche est intéressante car elle permet de considérer le profil réel et donc, d'espérer des résultats plus fiables que ceux obtenus par les modèles à profil préalables. C'est ce type de modèle que nous retenons ici.

2. PROBLÉMATIQUE DE LA DÉTERMINATION DE K_t PAR EF

La détermination par EF d'un coefficient de concentration de contraintes locales (K_t) associé à la texture mesurée de surface nécessite de définir une échelle de modélisation et pose deux questions :

- Faut-il chercher à représenter la surface avec la plus grande précision possible ?
- Le modèle EF utilisé est-il encore valable à cette échelle ?

As [8] et Suraratchai [1] ont des réponses différentes à ces questions.

Le premier considère qu'il faut mesurer de manière très précise la surface par des moyens optiques. Le modèle EF mis en œuvre sur la base des profils ainsi mesurés conduit à des tailles de mailles d'environ $1 \mu\text{m}$ afin d'atteindre la convergence. Cette taille de maille est en général inférieure aux longueurs caractéristiques de la microstructure. Représenter des gradients de contraintes basés sur la mécanique des milieux continus (MMC) à cette échelle est donc discutable.

Le second se contente d'un profil mesuré par un rugosimètre à palpeur. Ce profil est ensuite grossièrement approximé dans un modèle EF dont la taille de maille est fixée à $30 \mu\text{m}$. Dans le cas de l'alliage étudié par cet auteur, les gradients obtenus sont en accord avec le cadre de la MMC mais l'approximation de la surface ne trouve pas de justification claire et la taille de maille fixée à $30 \mu\text{m}$ ne permet pas forcément la convergence du calcul dans toutes les situations. En fait, cette approche n'est valide que tant que les rayons de

courbure locale de la texture de surface sont grands comme ceux des surfaces générées par étau limeur avec outil à grand rayon. Dans le cas des surfaces fraisées en bout, les rayons de courbure locale peuvent être très faibles. L'approche de Suraratchai pour le calcul de K_t devient alors peu adaptée car les résultats obtenus sont fortement dépendants des points de la surface choisis par la discrétisation qu'il opère.

Notre approche est basée sur une représentation EF de la surface qui permet de traiter le cas des surfaces à grands rayons de courbure locale et le cas des surfaces à faibles rayons de courbure locale. Elle s'appuie sur l'introduction d'une longueur critique permettant de fixer une échelle d'étude et sur le filtrage robuste des données de la surface.

3. DÉFINITION DE LA SURFACE « UTILE » : LONGUEUR CRITIQUE ET FILTRE

Définition de la longueur critique

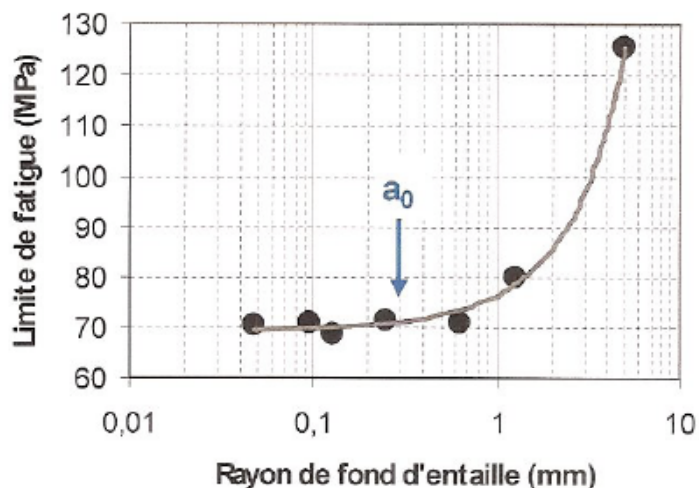


Figure 1. Résultats expérimentaux de l'influence du rayon de fond d'entaille sur la limite de fatigue d'un acier pour une longueur de fissure donnée [9]

Dans l'étude du comportement en fatigue des pièces entaillées, Taylor et Wang [9] ont montré que si l'on représente l'effet du rayon de fond d'entaille sur la limite de fatigue, il existe un rayon critique à partir duquel il y a un changement de comportement (Figure 1). En fait, si l'on prend comme référence la limite de fatigue associée à une éprouvette entaillée dont le fond d'entaille est de rayon nul, nous constatons qu'il faut augmenter sensiblement le rayon d'entaille jusqu'à un rayon critique pour que la limite de fatigue commence à croître. Taylor a montré expérimentalement que ce rayon critique est égal à la longueur caractéristique a_0 proposée par Kitagawa [10].

Cette longueur caractéristique peut être déterminée par l'équation 1 proposée par El Haddad [11].

Équation 1
$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

$\Delta \sigma_0$: limite d'endurance de référence

ΔK_{th} : seuil de propagation

La valeur de a_0 calculée pour l'alliage d'aluminium 7010-T7451 étudié par Suraratchai est d'environ $50\mu\text{m}$.

Proposition d'utilisation de la longueur critique: surface utile

Nous considérons la texture de surface comme un concentrateur de contraintes. Or nous venons de voir qu'il existe un rayon de fond d'entaille critique en dessous duquel il n'y a plus d'évolution de la limite de fatigue. Il est donc raisonnable de penser que seulement une partie des longueurs d'onde contenues dans la texture d'une surface modifie le comportement en fatigue de la pièce « texturée » par rapport à une pièce polie. Nous proposons de considérer que le profil de la surface utile pour le calcul (linéaire élastique) de K_t ne doit pas contenir d'information d'une longueur d'onde inférieure à la longueur caractéristique a_0 définie par l'Équation 1. Il s'agit de réaliser un filtre passe-haut (en longueur d'onde) dont la longueur de coupure sera précisément a_0 . Cet outil existe déjà pour séparer des profils classiquement utilisés pour la détermination des profils de rugosité et est décrit dans la norme [ISO 4288 96].

Séparation des profils par filtrage

Cette norme décrit la méthode servant à extraire d'un profil de mesure de surface brut, le profil d'ondulation et le profil de rugosité.

Le principe est d'utiliser un filtre gaussien qui a les propriétés de ne pas produire de distorsion et de ne pas créer de déphasage. La fonction de pondération de ce filtre est définie par l'Équation 2. Elle est fonction de la longueur de coupure (L_c).

Équation 2
$$s(x) = \frac{1}{L_c \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}} e^{-\pi \left(\frac{x}{L_c \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}} \right)^2} \quad (2)$$

s : fonction de pondération

x : abscisse du profil

L_c : longueur de coupure

Dans notre cas, la longueur de coupure de ce filtre est choisie égale à la longueur critique a_0 .

Un exemple d'utilisation de cette méthode est donné en Figure 2. Le profil brut a été obtenu par mesure (rugosimètre Mahr) d'une surface réalisée par étau limeur. L'application de la méthode de séparation permet d'obtenir, à partir du profil P, le profil filtré. La différence entre profil brut et profil filtré permet d'illustrer l'information que nous ne prenons pas en compte dans notre définition de K_t . Sur la base de cette définition de la surface utile au calcul de K_t , nous pouvons mettre en œuvre un modèle EF permettant de déterminer K_t numériquement.

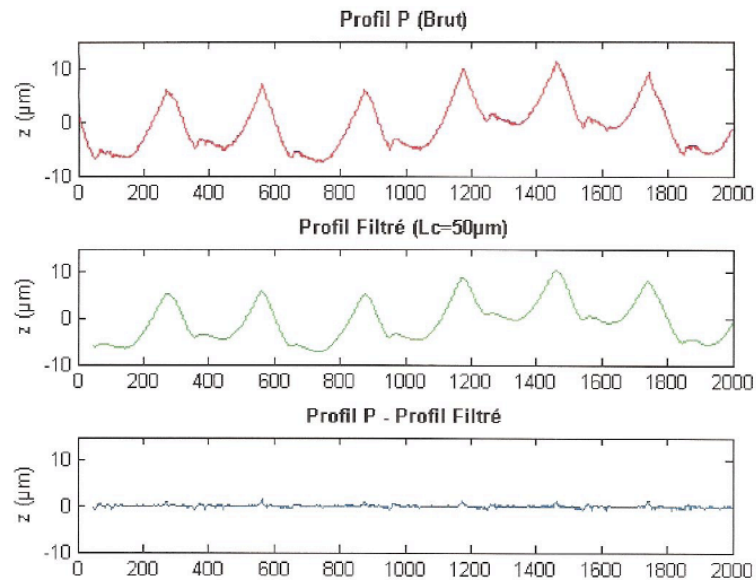


Figure 2. Exemple de séparation de profils de surface pour le calcul de K_t .

4. CALCUL EF DU COEFFICIENT DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES LOCALES.

Description du modèle

Le profil obtenu après filtrage est importé dans un code EF de façon analogue à celle proposée par Suraratchai dans un modèle 2D linéaire élastique soumis à un chargement virtuel. Les éléments finis utilisés sont des triangles à interpolation quadratique. La convergence est assurée par remaillage adaptatif basé sur un critère a posteriori en énergie : l'utilisation d'une taille de maille d'environ $20\mu\text{m}$ conduit à des résultats très proches de la solution convergée (écart inférieur à 4%). Le K_t est alors le rapport entre la contrainte maximale obtenue loin des bords du domaine et la contrainte nominale. Il correspond à celui généré par la partie filtrée du profil de surface : dans le cas d'une surface polie, notre méthode conduit à une valeur de K_t égale à 1. Ce résultat est très différent de celui que nous obtiendrions avec la méthode de As [8]. Notre approche est finalement assez proche de celle de Suraratchai [1] du point de vue de l'idée générale. Néanmoins, cette nouvelle mise en œuvre permet d'étendre le champ d'application de l'approche K_t aux surfaces fraisées et permet d'obtenir des résultats plus robustes. Deux aspects fondamentaux ont ainsi été pris en compte: une définition robuste du filtrage et la convergence systématique du calcul EF.

5. Modèle de fatigue des surfaces usinées

L'approche utilisée pour la détermination de la tenue en fatigue est basée sur les travaux de Suraratchai [1]. La tenue en fatigue est divisée en deux domaines : le domaine des grandes durées de vie et le domaine des faibles durées de vie. L'application d'un critère de seuil de propagation permet d'estimer la limite de fatigue dans le domaine des grandes durées de vie. Dans le domaine des faibles durées de vie, la MLER est utilisée pour estimer la durée de vie en propagation et une loi de type puissance permet d'évaluer la durée de vie en amorçage. Le K_t intervient dans toutes les phases du calcul de la durée de vie.

6 VALIDATION

Cette phase de validation s'appuie sur les travaux expérimentaux réalisés par Suraratchai [1].

Application étai linaire: surfaces à grands rayons de courbure locale

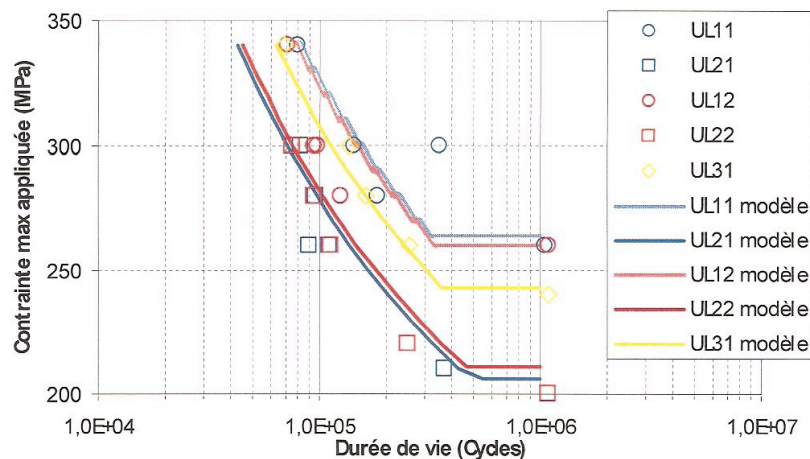


Figure 3. Comparaison des résultats d'essais [1] avec le modèle de prédiction de durée de vie.

Les essais de référence étudiés sont de type flexion quatre points. La surface en tension des éprouvettes a été réalisée par étai linaire pour les éprouvettes UL11, UL12, UL21, UL22 et par balayage pour les éprouvettes UL31. Dans tous ces cas, les stries générées par l'usinage sont perpendiculaires à la direction de chargement et de grands rayons de courbure locale de la texture de surface ont été obtenus. Pour chaque éprouvette, le coefficient de concentration de contraintes locales K_t a été calculé selon la méthode décrite en section 4. Les durées de vie associées ont été déterminées via l'approche présentée en section 5.

La comparaison des résultats du modèle d'estimation de la durée de vie avec l'expérience est présentée en Figure 3. Nous pouvons constater que le modèle permet de décrire correctement l'ensemble de la courbe de Wolher pour des états

de surface aux rugosités très différentes. Les limites de fatigue prédites sont en bon accord avec l'expérience, une erreur inférieure à 10% est observée. Les résultats obtenus sont très proches de ceux du modèle de Suraratchai [1]. Ceci est dû au fait que l'étau limeur génère des surfaces pour lesquelles les rayons de courbures locales sont grands car en rapport direct avec le rayon d'outil (400 μ m). Le modèle de détermination de Kt de Suraratchai est alors suffisant.

Application fraisage: surfaces à petits rayons de courbure locale

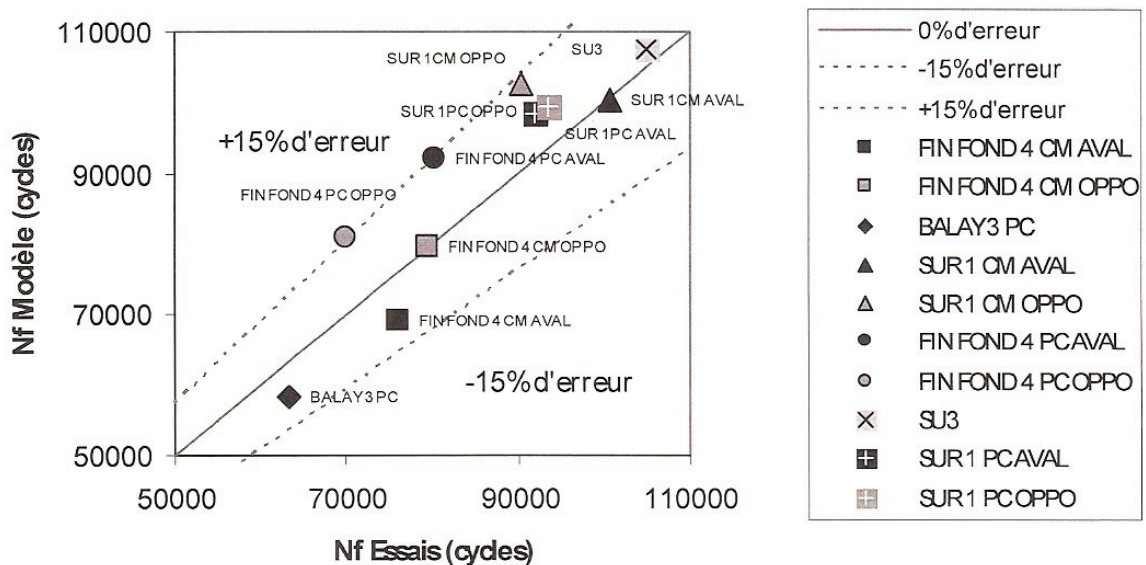


Figure 4. Comparaison des résultats d'essais avec le modèle de prédiction de durée de vie.

Nous restons dans le cadre d'essais de fatigue en flexion quatre points sur le même type d'éprouvette que précédemment. La surface en tension des éprouvettes a été réalisée par fraisage en bout à grande vitesse. Pour ce faire, deux fraises ont été utilisées dans de nombreuses configurations d'usinage sur une fraiseuse à commande numérique UGV. Les conditions de coupe étudiées sont représentatives de configurations d'usinage utilisées en production de pièces avion (les surfaces et les essais de fatigue ont été réalisés par AIRBUS)

Les Kt et les durées de vie associées ont été calculés pour chaque éprouvette comme dans le cas des éprouvettes à grands rayons de courbure locale. Les essais ont été réalisés pour un unique cas de chargement correspondant à une sollicitation de 330MPa. Les résultats du modèle d'estimation de la durée de vie sont comparés avec les résultats expérimentaux (figure 4). L'erreur maximale du modèle par rapport aux essais est d'environ 15% dans les cas étudiés. Ces résultats démontrent la robustesse de l'approche développée pour l'étude en fatigue de surfaces fraisées en bout.

7. SYNTHÈSE

Nous avons proposé une nouvelle approche de la détermination du coefficient de concentration de contraintes locales Kt dans le cadre de l'étude en fatigue des

surfaces usinées. Cette approche est basée sur les travaux de Suraratchai [1] dans lesquels la texture de surface est modélisée par éléments finis dans le but d'identifier le K_t généré par la texture de surface.

Nous avons mis en œuvre un filtre gaussien dont la longueur de coupure a été associée à une longueur caractéristique du matériau. Celle-ci représente un seuil de transition de comportement des fissures en fatigue (comportement en endurance illimité à comportement en endurance limitée). Le K_t ainsi défini a été introduit dans l'approche de Suraratchai permettant le calcul de la durée de vie en fatigue. La validation a été effectuée sur des surfaces à grands rayons de courbure locale (comme en usinage à l'étau limeur) et pour des surfaces à petits rayons de courbure locale, qui sont présents dans la plupart des surfaces fraisées. Dans les deux cas, notre démarche donne de bons résultats avec une erreur maximale d'environ 15% par rapport aux essais sur éprouvettes fraisées. Cela nous permet ainsi de valider à la fois notre définition de K_t , mais aussi l'utilisation de cette définition pour l'extension du domaine de validité aux surfaces fraisées en bout de l'approche de Suraratchai.

8 REFERENCES:

1. M. Suraratchai., J.Limido , C. Mabru C.,R.Chieragatti, Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy ». International Journal of Fatigue, vol. 30 (n° 12). pp. 2119-2126. ISSN 0142-1123,2008.
2. C.Wiesner, H.U.Kunzi; B.Ilschner, Characterization of the topography of turned surfaces and its influence on the fatigue life of AL-7075, Materials Science and engineering, A145,PP.151-158,1991.
3. Y.Murakami, Metal Fatigue : Effects of small defects and nonmetallic inclusions, Elsevier Science, 2002.
4. H. Neuber, Theory of notch stresses: principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material, deuxième édition : Springer Verlag (1958)
5. Peterson; Stress concentration factors, New York,John Wiley and Sons, 1974
6. D.Arola, C.L.Williams, Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surface, International Journal of Fatigue, Vol 24, pp923-930, 2002.
7. S.Andrews, H.Sehitoglu, A computer model for fatigue crack growth from rough surface, International Journal of Fatigue, Vol 22, pp 619-630, 2000
8. As SK, Skallerud B, Tveiten BW, Holme B, Fatigue life prediction of machined components using finite element analysis of surface topography, International Journal of Fatigue vol 27, 1590-6, 2005
9. Taylor D., Wang G., The validation of some methods of notch fatigue analysis, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 23, pp. 387-394, (2000)
- 10.H. Kitagawa and S. Takahashi. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage, Proceedings of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials (1976) 627-31
- 11.El Haddad, N.F.Dowling, T.H.Topper, K.N.Smith, J integral applications for short fatigue cracks at notches, International Journal of Fracture, Vol 16, N°1, pp 15-24, 1980