

MODÉLISATION À HAUTE TEMPÉRATURE D'UN SUPERALLIAGE OBTENU PAR MÉTALLURGIE DE POUDRES

P. Prigent [†], S. Kruch ^{*} et J. Devoucoux ^{*}

[†] Division Mécanique-Durée de Vie, SNECMA, BP 69, 77550 Moissy-Cramayel, France

^{*} Direction Résistance des Structures, ONERA, BP 72, 92322 Châtillon Cédex, France

Résumé. Une méthode de prévision de propagation de fissure dans les disques de turbine soumis à des sollicitations de service faisant intervenir notamment les effets du temps à 650°C est développée. La première phase repose sur un large programme expérimental, afin d'acquérir les données nécessaires pour décrire à l'aide d'un modèle les effets complexes superposés (interaction fatigue-fluage-environnement) pour un chargement variable à haute température. Parallèlement, des calculs en viscoplasticité ont été effectués avec un code Éléments Finis. Les phénomènes d'ouverture-fermeture de fissure et de redistribution des contraintes en pointe de fissure ont été étudiés. Une hypothèse de modélisation a été déduite de l'analyse des résultats expérimentaux et numériques. La deuxième phase concerne le développement et l'implantation du modèle de propagation de fissure dans un code de calcul. Un modèle, fondé sur la relaxation du Facteur d'Intensité des Contraintes Seuil au cours du temps a été développé dans le cadre de la Mécanique Linéaire de la Rupture.

Astraloy.

Abstract. A crack growth prediction method in turbine disks under service loading taking into account time effects at 650°C is developed. The first phase is a very important experimental program in order to acquire necessary data for describing superimposed complex effects (environment-creep-fatigue interaction) under variable amplitude loading at high temperature with a model. In parallel, viscoplastic finite-element computations have been used. Crack opening-closure and stress redistribution at crack tip were investigated. A modeling was deduced from experimental and numerical results analysis. The second phase is the crack growth modeling development and setting in a computational code. A model, built on Stress Intensity Factor relaxation during hold time has been developed in the framework of Linear Elastic Fracture Mechanics.

1. INTRODUCTION

L'objectif de cette modélisation est de permettre à la SNECMA de disposer d'un modèle de prévision de propagation de fissure pour les disques de turbine des moteurs avancés.

L'originalité de la méthode, réside dans la prise en compte des phénomènes complexes d'interaction fatigue-fluage-environnement. Le travail imparti à l'ONERA dans le cadre de cette étude consiste en un programme d'essais, des calculs en viscoplasticité sur une éprouvette numérique et le développement du modèle.

Une première partie est consacrée au descriptif et aux résultats des essais. Les influences de la surcharge, de la durée et du rapport de charge du temps de maintien et de la vitesse de mise en charge ont été plus particulièrement étudiées.

Dans une deuxième partie, des calculs sur une éprouvette numérique ont été effectués.

Le dépouillement et la visualisation des résultats ont permis de préciser les phénomènes de pointe de fissure: redistribution des contraintes, ouverture-fermeture.

Enfin, dans une troisième partie, le principe du modèle est

présenté.

Ce modèle phénoménologique utilise les outils classiques de la Mécanique Linéaire de la Rupture comme le Facteur d'Intensité des Contraintes "K" et la longueur de fissure "a".

Il est construit sur la relaxation du Facteur d'Intensité des Contraintes Seuil au cours des temps de maintien des essais complexes.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le montage a été décrit très précisément par Baudin [1] [2] et Policella [3], mais on peut toutefois préciser que:

- le superalliage utilisé est l'Astraloy.
- les essais se font à 650°C en atmosphère de laboratoire.
- l'éprouvette est sollicitée en flexion à l'aide d'un exciteur électrodynamique.
- les éprouvettes, de type SEN (*Single Edge Notch*), sont fournies par la SNECMA et usinées à l'ONERA.

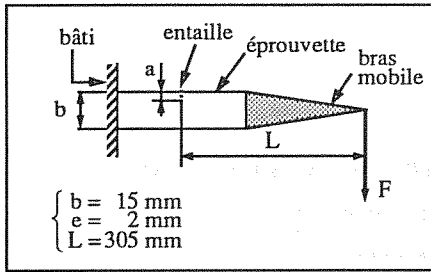


Fig. 1. Géométrie de l'éprouvette et montage

Elles sont pré-fissurées jusqu'à 0,3 mm avec un usinage par électro-érosion à fil, puis initiées en fatigue jusqu'à 0,5 mm. Le calcul du K, le FIC (Facteur d'Intensité des Contraintes), se fait avec la formule suivante, d'après la formule de Bui [4]:

$$K(F, a) = F \times \left(\frac{6L}{eb^2} \right) \times \sqrt{\pi a} \times \left(\sum_{i=0}^4 c_i \times \left(\frac{a}{b} \right)^i \right)$$

avec $c_0 = 1.122$ $c_1 = -1.400$ $c_2 = 7.330$
 $c_3 = -13.080$ $c_4 = 14.000$

Étude de plusieurs facteurs:

Au cours du programme expérimental, nous avons étudié particulièrement l'influence de 4 facteurs:

- l'effet d'ordre, ou l'effet du temps de maintien placé à la descente (d) ou à la montée (m) en charge.
- le rapport $x = F_{tm} / F_M$ entre la force F_{tm} à laquelle s'exerce le temps de maintien et la force F_M de la charge maximale du cycle.
- la durée du temps de maintien
- la vitesse de mise en charge

Types des essais:

Nous avons retenu trois formes génériques pour les essais afin d'étudier les différents facteurs:

1)

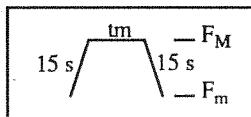


Fig. 2. Essai 15s-tm-15s

$t_m = 0, 90, 300$ et 900 s valeur du temps de maintien.
 $F_M = 10$ daN forces appliquées au bout
 $F_m = 0.4$ daN du bras mobile (Fig. 1).

2)

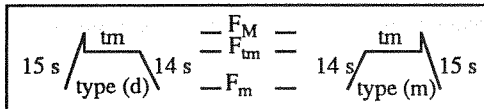


Fig. 3. Essai 15s-1s-tm-14s ou essai 14s-tm-1s-15s

$t_m = 90, 300$ ou 900 s
 $F_{tm} = 0.4, 5, 8, 9$ ou 9.5 daN force appliquée pendant t_m .
 $x = 4, 50, 80, 90$ ou 95%

3)

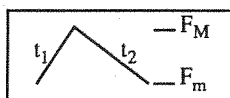


Fig. 4. Essai t_1-t_2

avec $t_1 + t_2 = 330$ s

- Les résultats ont été dépouillés avec trois moyens classiques:
- les courbes longueur de fissure "a" en fonction du nombre de cycle "N".
 - les courbes da/dN (ou da/dt pour le fluage) en fonction du FIC maximum " K_M ".
 - les enregistrements directs du suiveur de fissure [2] [3] qui nous donnent a en fonction du temps "t".

Principaux résultats:

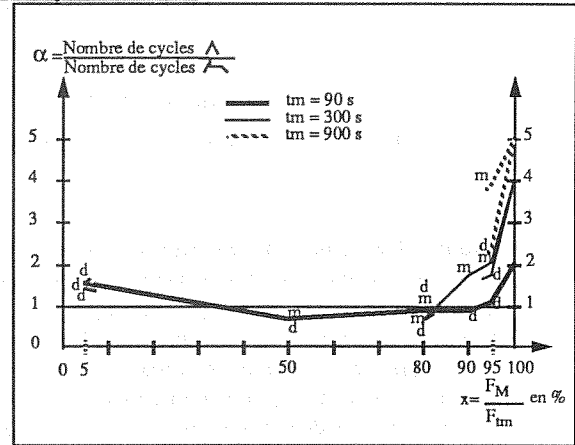


Fig. 5. Durée de vie en fonction du rapport de charge "x"

La figure 5 récapitule l'ensemble des résultats concernant les trois premiers facteurs.

- Le rapport x est porté en abscisse.
- Le rapport des durées de vie en cycle de l'essai 15s-0s-15s (essai de référence) et des essais type (d) ou (m) (fig. 3.) est porté en ordonnée.

L'effet d'ordre

C'est un facteur important dont l'évidence apparait pour des valeurs de $t_m \geq 300$ secondes et pour $x \geq 90\%$ (fig. 5.).

On peut penser que, dans le cas du temps de maintien placé à la montée en charge (essai type (m)), le temps de maintien crée une zone plastique qui est nettement augmentée par la surcharge qui suit.

Inversement, la zone plastique créée par une surcharge exercée en premier avant le temps de maintien, n'est pratiquement pas "dépassée", ou dans des proportions moindres, par une zone plastique créée pendant le temps de maintien placé immédiatement après (essai type (d)).

Le rapport r

- plus x augmente, plus le cycle est endommageant.
- en revanche, pour $t_m \leq 90$ s, le cycle est plus endommageant pour $x = 4\%$ (charge minimale) que pour $x = 50$ ou 80% , ce qui n'est pas le cas de l'Inconel 718 [5].

On peut expliquer l'effet endommageant de ce cycle par une cause mécanique.

Lors de la décharge, la fissure se renferme puis, lors du temps de maintien, des forces de compression apparaissent qui abaissent le K_S (FIC seuil, pour la progression de fissure).

Lors du cycle suivant, le $\Delta K_{eff} = K_M - K_S$, pendant la charge, est plus grand que pour un cycle de fatigue seule.

La progression en fatigue de la fissure en est augmentée.

La durée du temps de maintien

C'est un facteur qui a surtout été étudié pour le rôle qu'il joue dans la mise en évidence des autres facteurs d'études. On peut grâce à lui constater l'importance de l'effet d'ordre et du rapport r.

La vitesse de mise en charge

Différents essais de type $t_1 - t_2$ (fig. 4.) de 330 secondes ont été effectués.

Les essais sont classés, sur le dessin, du moins au plus endommageant (durées de vie en cycle):

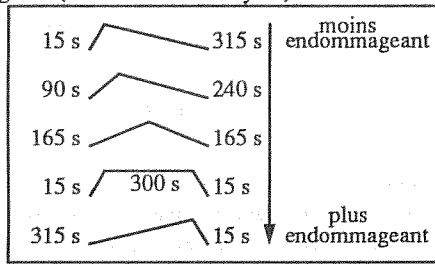


Fig. 6. Classement des essais en fonction du temps de charge

- plus le temps t_1 de mise en charge augmente, plus l'essai est endommageant
- une rampe de la charge minimale à la charge maximale (essai 315s-15s) est plus endommageante qu'une charge exercée au maximum pendant le temps de maintien (essai 15s-300s-15s)

L'essai 315s-15s est le plus endommageant car la mise en charge progressive pourrait empêcher la relaxation des contraintes en pointe de fissure qui s'observe dans le cas d'un essai avec temps de maintien exercé à la charge maximale. Une autre explication serait que, durant la montée en charge, un effet du fluage se ferait sentir, qui s'ajouterait à la fatigue. Dans le cas du cycle 315s-15s, la rampe part du niveau le plus bas ($x=4\%$) et va jusqu'au niveau maximum ($x=100\%$). La diminution en durée de vie, par rapport au cycle 15s-300s-15s est de 17%, ce qui n'est pas négligeable.

3. NUMÉRIQUE

Des calculs numériques par Éléments Finis ont été effectués sur une éprouvette modélisée pour obtenir des compléments d'information. Nous avons particulièrement étudié les phénomènes d'ouverture-fermeture, de redistribution et de relaxation des contraintes en pointe de fissure au cours de la progression d'une fissure en contraintes planes.

Le code d'Éléments Finis utilisé est EVPCYCL développé à l'ONERA par l'équipe de J-L. Chaboche [6].

La loi de viscoplasticité utilisée est la loi à cinq paramètres de J-L Chaboche [7] (loi avec un écrouissage cinématique non linéaire).

Voici son expression en multiaxial:

$$(2) \quad \dot{p} = \left\langle \frac{J(\sigma - X) - k}{K} \right\rangle^n$$

$$(3) \quad dX = \frac{2}{3} Ca d\epsilon_p - CX dp \quad \text{avec} \quad X(0) = 0$$

il n'y a pas d'écrouissage isotrope

Les valeurs numériques des paramètres n , K , k , C et a ont été identifiées par le Département Matériaux et Procédés de la SNECMA, pour la température de 650°C et sont présentées dans le tableau suivant.

Table 1. Valeurs des coefficients de la loi à 5 paramètres

exp. visco	coeff. résis.	lim. élast.	écroui. cin.	écroui. cin.
n	K	k (MPa)	C	a
11	380	455	1400	550

Le principe du calcul est le suivant:

- application de cycles de fatigue (15 s-0s-15 s) pour intégrer les données relatives à une traînée plastique.
- libération par "déboutonnage" d'un élément du maillage tous les 3 cycles de fatigue, pour faire progresser la fissure. Trois cycles sont nécessaires pour obtenir la stabilisation des contraintes après chaque libération.

Le calcul a été fait sur une éprouvette maillée pour une fissure dite "longue".

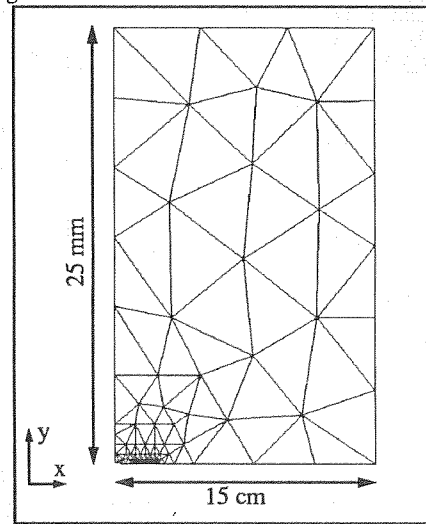


Fig. 7. Maillage de la demi-éprouvette.

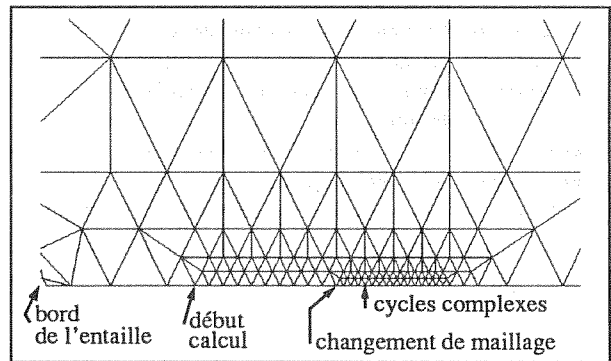


Fig. 8. "Zoom" sur la zone fine du maillage.

La valeur du "déboutonnage" est d'un élément physique, soit de deux nœuds car le maillage est constitué de triangles isoparamétriques à six nœuds.

La base des éléments est de 70 µm au début du calcul et de 35 µm dans la zone fine du maillage.

Après cette première partie du calcul, la fissure a progressé de 1.0375 mm, début du calcul (fig. 9), à 1.8775 mm, début d'application des cycles complexes (les cycles des figures 2 et 3). Le calcul a été fait avec, d'abord, 42 cycles de fatigue et 13 libérations d'éléments et ensuite, 4 cycles 15s-300s-15s.

Les principaux enseignements sont de deux types dans l'état des calculs.

- Les instants d'ouverture et de fermeture de la fissure au cours du calcul:
 Le critère utilisé est un test de contact entre les nœuds libérés appartenant à la base du maillage ($y \neq 0$ au cours de la charge des cycles) et la ligne imaginaire de base ($y = 0$). Dans les parties grossière et fine du maillage, le test est donc fait, respectivement, à 35.0 et 17.5 μm de la pointe de fissure. Le résultat est évidemment très dépendant de la taille des éléments du maillage. On peut le constater pour les valeurs des forces d'ouverture et de fermeture avant et après le changement de maillage (fig. 10.). La valeur de la force d'ouverture augmente et la valeur de la force de fermeture diminue dès que le maillage se raffine. Mais, on peut considérer que la valeur d'ouverture est comprise entre 30 et 35% et la valeur de fermeture entre 20 et 25%.

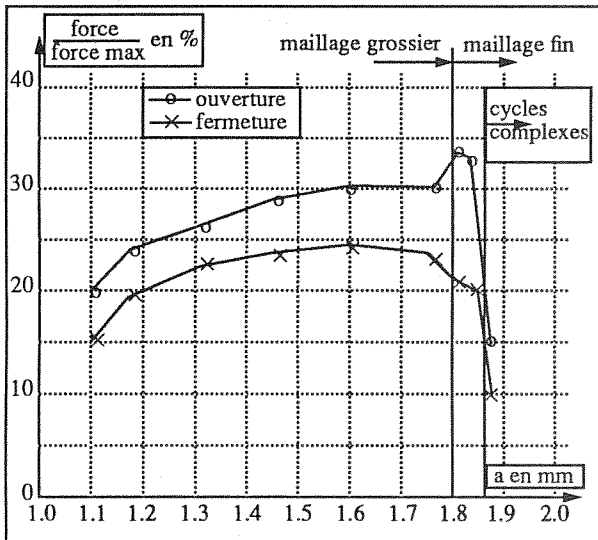


Fig. 9. Forces d'ouverture et de fermeture au cours de calcul

- La relaxation des contraintes au cours des cycles à temps de maintien (fig. 2.), que l'on observe sur la fig. 10.
 Le dépouillement suivant concerne le quatrième cycle appliqué. La contrainte σ_{yy} est maximale pour la flexion au nœud en pointe de la fissure. On constate que σ_{yy} subit une relaxation rapide au début du temps de maintien, jusqu'à $t = 15\text{s}$, pour ensuite diminuer lentement jusqu'à $t = 300\text{s}$.

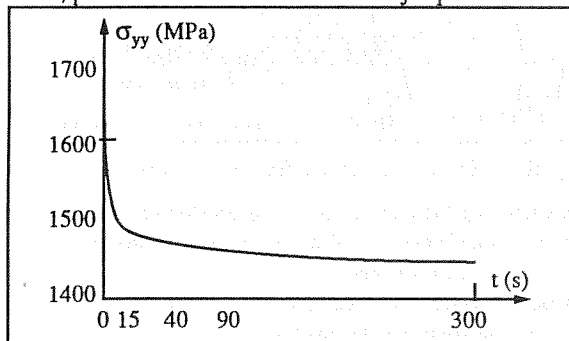


Fig. 10. Évolution de la contrainte en pointe de fissure au cours de 300 secondes de temps de maintien d'un cycle 15s-300s-15s.

4. MODÉLISATION

La partie modélisation de cette étude est la synthèse de tout le travail expérimental et numérique fait jusqu'à présent. Cette synthèse doit permettre d'affiner l'équation générale de base:

$$da = C_F [K_M - K_S(tm,h)]^{\eta_F} dN + \int_0^{tm} C_C [K^*(t) - K_S(t,h)]^{\eta_C} dt$$

- C_F constante du matériau en propagation de fatigue
- C_C constante du matériau en propagation de fluage
- η_F constante du matériau en propagation de fatigue
- η_C constante du matériau en propagation de fluage
- K_M valeur maximale du FIC
- K_S valeur seuil du FIC
- K^* FIC relaxé au cours du fluage
- tm valeur du temps de maintien
- h paramètre d'histoire
- t temps

L'hypothèse de modélisation suppose que le K^* et le K_S ont une évolution, au cours du temps de maintien, similaire à celle de la relaxation des contraintes. On suppose que la différence $[K^*(t) - K_S(t,h)]$ reste constante au cours du temps de maintien. Le principe est que la relaxation du K_S pendant le temps de maintien conduit à une augmentation de la valeur $(K_M - K_S)$ à prendre en compte lors du cycle suivant, lors de la partie fatigue, d'où une augmentation de Δa_F . Cette augmentation de la valeur $(K_M - K_S)$ est considérée comme équivalente à une surcharge. Nous avons déterminé, d'après les essais, les valeurs de K_S au début de la partie fatigue et de la partie fluage de chaque cycle 15s- tm -15s.

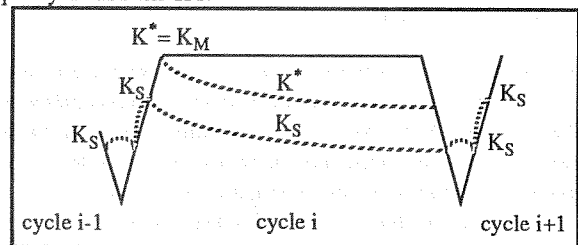


Fig. 11. Évolution du K_S au cours d'un cycle 15s- tm -15s

Nous pouvons ainsi connaître à tout instant la valeur du K_S , en supposant connue la valeur initiale du rapport K_S/K_M . Nous appliquons les mêmes cas de chargement au modèle qu'à nos éprouvettes. Le K_S va évoluer progressivement à partir de sa position initiale, qui a été fixée à la moitié du K_M , dans un premier temps, pour tendre vers ses deux valeurs limites stabilisées, à la fin et au début du temps de maintien. Le but est de décrire avec une équation l'évolution du rapport K_S/K_M par cyclage jusqu'à sa stabilisation à ses deux valeurs limites.

Ce modèle utilise une extrapolation du modèle ONERA de fissuration à température ambiante développé par Baudin[8].

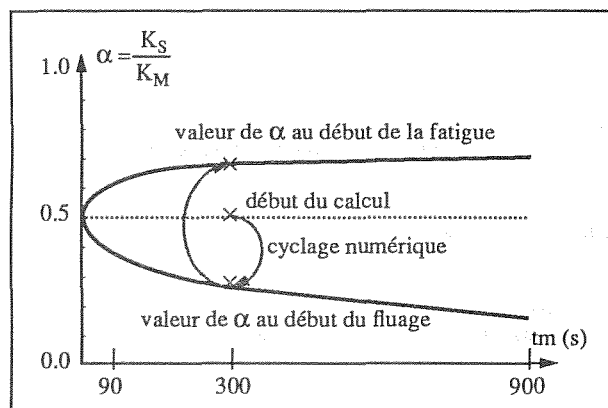


Fig. 12. Valeurs de K_S au début de la fatigue et du fluage pour les cycles 15s-tm-15s obtenues par cyclage numérique.

5. CONCLUSION

D'un point de vue expérimental, cette étude a donné une série de résultats significatifs concernant: l'effet d'ordre, l'effet du rapport de charge "x", l'effet du temps de maintien et la vitesse de mise en charge.

D'un point de vue numérique, une étude des seuils d'ouverture-fermeture a été réalisée. Elle est, maintenant, à compléter par une étude systématique de l'évolution des seuils pour tous les types de cycles avec un temps de maintien et à comparer avec les résultats des essais de détermination de seuil. La relaxation et la redistribution des contraintes ont, de même, été étudiées.

Enfin, un modèle phénoménologique utilisant la relaxation du FIC seuil est en voie d'élaboration. Il sera à compléter, avec des informations concernant l'environnement, si l'hypothèse d'ordre purement mécanique utilisée jusqu'à présent se révélait insuffisante pour prédire la propagation des fissures.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Baudin G., Lemaître J. et Robert M., "Intérêt de l'essai de fissuration en flexion pour la détermination des lois de progression de fissures de fatigue", *La Rech. Aérop.*, 6, pp. 349-358 (1976)
- [2] Baudin G. et Policella H., "Nouvelle méthode de mesure électrique de longueur de fissure", *La Rech. Aérop.*, 4, pp. 195-203 (1978)
- [3] Policella H., Baudin G. et Cailletaud G., "Mesure de longueur de fissure, déformation et endommagement par une technique de potentiel électrique", 60th Meetings of the Structures Panel AGARD Specialists Meetings, San Antonio, Texas, USA, (22-26 Avril 1985)
- [4] Bui H.D., "Mécanique de la Rupture Fragile", Masson, Paris (1978)
- [5] Weerasooriya T. et Nicholas T., "Hold-time effects in elevated temperature fatigue crack propagation", AFWAL-TR-84 4184, University of Dayton, Res. Ins., Dayton, Ohio, USA (1985)
- [6] Chaboche J-L., "EVPCYCL: Un code d'Éléments Finis en viscoplasticité cyclique", *La Rech. Aérop.*, 2, pp. 91-112 (Mars-Avril 1986)
- [7] Chaboche J-L., "Sur les lois de comportement des matériaux sous sollicitations monotones ou cycliques", *La Rech. Aérop.*, 5, pp. 363-375 (Sep-Oct 1983)
- [8] Baudin G. et Robert M., "Crack growth life-time prediction under aeronautical type loading", Proceedings of 5th European Conference on Fracture, ECF5, Lisbonne, Portugal (17-21 Septembre 1984)