

Chapitre V : Amorçage et propagation des fissures par fatigue

V-1 Amorçage et étude des différents stades de propagation de fissures

Plusieurs définitions sont utilisées dans la littérature : variation de la rigidité de l'éprouvette, apparition d'une fissure de quelques microns, chute de la charge supportée par l'éprouvette. La phase d'amorçage est généralement constituée par la nucléation et la croissance de fissures «courtes» mais la longueur seuil de fissure à laquelle l'amorçage se produit manque de définition uniforme. Plusieurs auteurs pensent que la phase d'amorçage d'une fissure de fatigue est de durée négligeable et qu'il existe des « petites » fissures de taille comparable à celle d'un défaut microstructural. Ces fissures se manifestent dès les premiers cycles de sollicitation. Alors, la durée de vie associée à l'amorçage correspondrait en fait à la phase de propagation de ces fissures courtes avant qu'elles n'atteignent une taille détectable par les moyens de suivi usuels. D'autres auteurs estiment que la période d'amorçage de fissures dans un composant, à l'origine sans défaut, peut constituer une partie significative de sa durée de vie totale en fatigue. Bien que les défauts existent dans toutes les pièces soumises à la fatigue, irrégularités de surface ou inclusions, provoquant des concentrations de contrainte locales très élevées conduisant à la rupture rapide par formation de microfissures particulièrement dangereuses, ils ne sont pas les seuls sites d'amorçage des fissures. Dans de nombreux cas où le matériau est globalement soumis à des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité, il y a formation de bandes de glissement persistantes dans certains grains. Ces bandes de glissement peuvent donner lieu à des microfissures permanentes par formation d'intrusions et d'extrusions ou par réunion entre elles. L'atmosphère réagit avec les surfaces fraîches des plans de glissement et empêche la réversibilité de leur mouvement de va-et-vient, d'où un endommagement du métal. Le mécanisme de formation des intrusions et extrusions à la surface est illustré sur la figure 1.

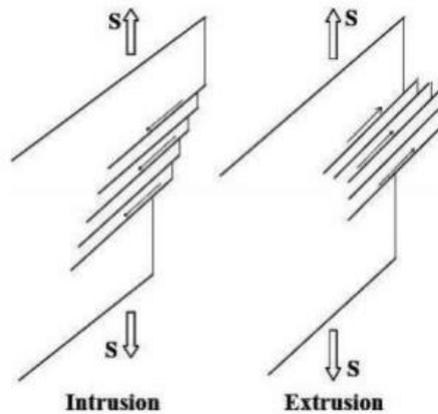


Figure 1. Formation d'intrusions et extrusions dans des bandes de glissement

V-1.1 Définition d'amorçage

Plusieurs définitions ont été données mais elles dépendent souvent des types de sollicitations qui intéressaient les chercheurs. Plus fréquentes sont les études concernant la fissuration par fatigue sur un élément de volume. Notons, pour ne citer que ceux-là, Lieurade, qui définit plusieurs étapes d'évolution des microfissures à la surface d'éprouvettes cylindriques lisses avant d'arriver à la coalescence de ces microfissures pour former une macrofissure principale. De même, C. Levallant a retrouvé les mêmes évolutions concernant l'acier 316L tôle SP à haute température et avec des essais de fatigue continue

V-1.2 Phase d'amorçage :

- Amorçage sur défaut

Les défauts qui sont susceptibles de conduire à l'amorçage d'une fissure de fatigue sont nombreux. Quelques exemples de défauts sont donnés ci-dessous, selon la méthode d'élaboration : Dans les pièces de fonderie les défauts principaux que l'on rencontre sont des ségrégations, des inclusions (figure 2(a)) ou encore des retassures. Dans les matériaux frittés, le défaut principal rencontré est la porosité du matériau due à une absence de cohésion entre grains de poudres (figure 2(b)).

Dans les pièces forgées, les défauts sont ceux du lingot, modifiés par la déformation de corroyage. Les inclusions par exemple, sont brisées et leurs fragments dispersés au cours du corroyage. Il peut aussi exister dans le matériau des fissures internes liées au procédé de mise en forme ou aux traitements thermiques. Ces fissures sont rares dans les alliages métalliques mais leur répartition n'est pas aléatoire et correspond souvent à un défaut du procédé de mise en forme.

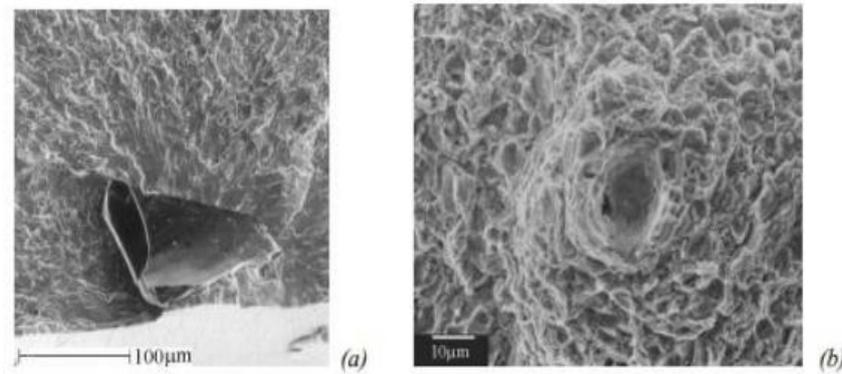


Figure 2. Amorçage d'une fissure de fatigue, (a) sur une inclusion de céramique surfacique, (b) sur une porosité, alliage à base de Nickel N18 élaboré par métallurgie des poudres.

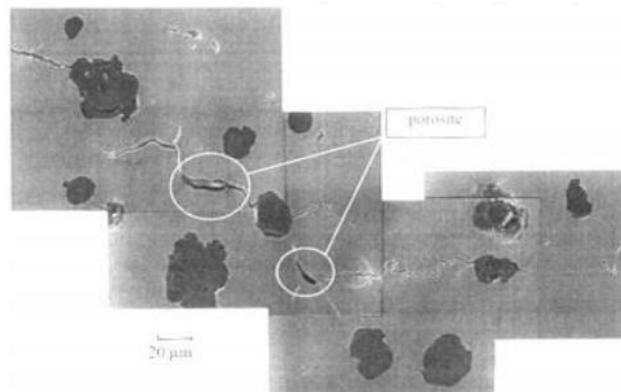


Figure 3. Amorçage de micro-fissures de fatigue dans une fonte à graphite sphéroïdal, les fissures s'amorcent sur les nodules ou sur les porosités, les porosités sont sévères.

Les « défauts » peuvent aussi être des constituants du matériau, tels que des particules de seconde phase ou les joints de grains. Sur la figure 3, on peut voir des micro-fissures de fatigue qui se sont formées à la surface d'une fonte à graphite sphéroïdal. Ces microfissures proviennent de porosités et de nodules de graphite. Pour terminer, l'amorçage est aussi couramment associé aux effets de l'environnement. Comme on le voit sur la figure 4 (a), des fissures de fatigue peuvent s'amorcer en surface sur une piqûre de corrosion. D'autre part, il a été montré par Murakami, qu'une espèce fragilisant (ici l'hydrogène) en solution dans des inclusions, peut être libérée peu à peu dans le métal sous l'effet de la sollicitation mécanique et du temps. Une zone fragilisée se forme alors autour des inclusions, dont la dimension augmente avec le nombre de cycles et dont la frontière avec la fissure de fatigue est repérable par une modification du contraste en microscopie optique (figure 4 (b)). Lorsque cette zone est suffisamment grande, une fissure de fatigue peut se propager jusqu'à la rupture, et cela même pour un niveau de contrainte très faible. Ce mécanisme conduit à des ruptures d'éprouvettes pour des durées de vie supérieures à 10^7 cycles.

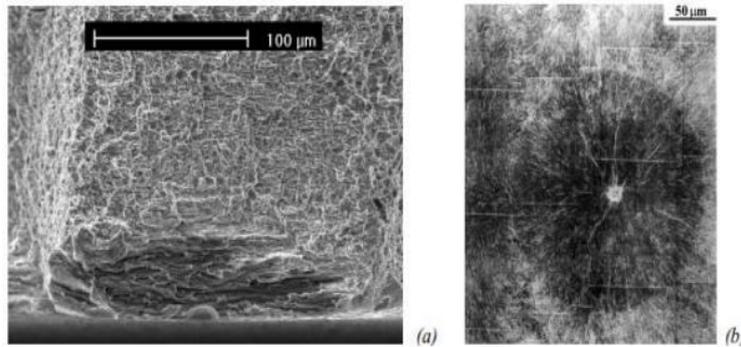


Figure 4. (a) Amorçage d'une fissure de fatigue par corrosion sous contrainte, (b) optically dark area

V-1.3 Période d'amorçage :

Les phénomènes mis en jeu de cette période sont de très grande finesse et seuls des moyens puissants de laboratoire sont capables de mettre en évidence les signes annonciateurs d'un endommagement. En effet, jusqu'à un certain seuil de ce dernier il est possible, par de judicieux traitements mécaniques et (ou) thermiques, de faire disparaître celui-ci et donc de revenir à un état initial non endommagé. Lorsque cette opération reste infructueuse, la structure subit un endommagement irréversible et commence d'entrée dans la période de propagation à partir des microfissures formées.

V-1.4 Amorçage par micro-plasticité cyclique :

La seconde famille de mécanismes d'amorçage comprend les différents mécanismes d'amorçage associés à une déformation plastique cyclique en surface. De très nombreux auteurs ont discuté des mécanismes permettant la formation des fissures par micro-plasticité cyclique. La formation d'intrusions et d'extrusions en surface, est généralement invoquée pour expliquer ce mécanisme. Lorsque le matériau est déformé dans son domaine d'élasticité macroscopique, il existe néanmoins des grains qui sont favorablement orientés pour le glissement ou qui sont soumis à une surcontrainte locale et qui entrent en plasticité. Comme cette déformation plastique reste très localisée, elle est quasi indétectable à l'échelle macroscopique, on parle alors de micro-plasticité.

Alors comme la déformation plastique est localisée sur des plans de glissements « intenses » des dislocations, des extrusions et intrusions se forment en surface. Au pied de ces reliefs, se forment progressivement des fissures qui se propagent ensuite par fatigue.

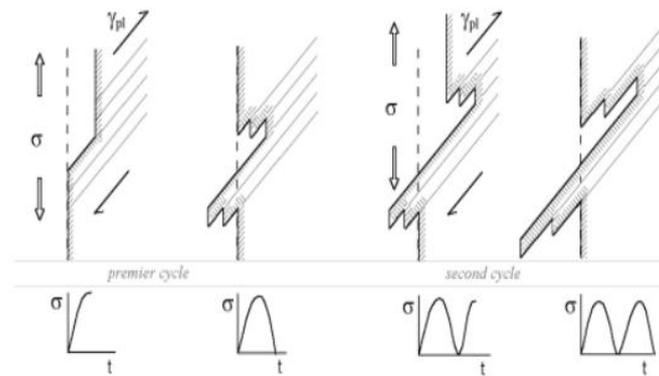


Figure 5. Mécanisme de formation d'extrusion et intrusion à la surface d'un échantillon sollicité en fatigue sous l'effet d'une déformation plastique cyclique localisée et présentant une certaine irréversibilité.

V-1.5 Propagation d'une fissure de fatigue

Le principe de base de cette démarche est qu'un corps contenant un défaut initial subit un endommagement progressif lorsque soumis à un chargement cyclique, même pour des niveaux de contraintes appliquées bien en deçà des limites statiques. Au cours des cycles de fatigue, la microfissure initiale devient grande par rapport à la taille du grain, et les différentes microfissures vont coalescer. Une macro-fissure apparaît ainsi et sa direction est généralement imposée par les contraintes d'ouverture, maximum des contraintes principales de traction.

V-1.6 Stades de fissuration par fatigue

Dans une pièce mécanique il ya différents stades de fissuration par fatigue où les défauts peuvent se développer dans une partie initialement saine (non endommagée) puis se propager de façon stable jusqu'à la rupture, Le développement de cet endommagement peut se décrire de la façon suivante:

- Un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- Un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte.
- Un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale.

V-2 Lois de propagation de fissures : loi de Paris

Les courbes de Wölher donnent seulement des informations sur la durée de vie des matériaux soumis à des cycles de contrainte. Elles ne renseignent en rien sur les mécanismes

d'initiation et de propagation des fissures. L'initiation des fissures dans un matériau soumis à des cycles de fatigue relève de processus complexes qu'il est difficile de modéliser.

Nous verrons par la suite comment on peut les décrire qualitativement. En revanche, on sait modéliser analytiquement avec une bonne précision les phénomènes de propagation des fissures après qu'elles aient été amorcées. Généralement, le paramètre estimé est la vitesse de propagation de la fissure que l'on détermine en exploitant les résultats d'un essai de tolérance au dommage.

L'essai consiste à générer, typiquement au droit d'un trou, une pré fissuration en soumettant le matériau, sous la forme d'une éprouvette plate par exemple, à des cycles de fatigue.

L'idée est d'initier au sein du matériau une fissure susceptible de se propager au cours des cycles de chargement cumulés qui suivent.



Figure 6. Essai de tolérance au dommage : éprouvette de type Irwin

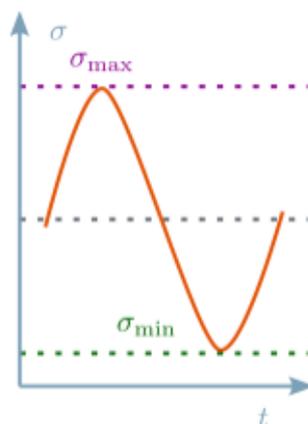


Figure 7. Essai de tolérance au dommage : forme du chargement

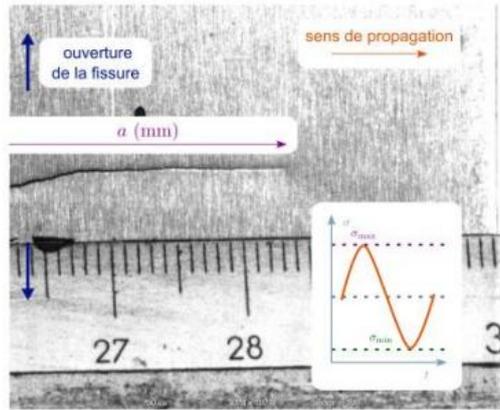


Figure 8. Essai de tolérance au dommage : progression d'une fissure dans un alliage Aluminium Cuivre

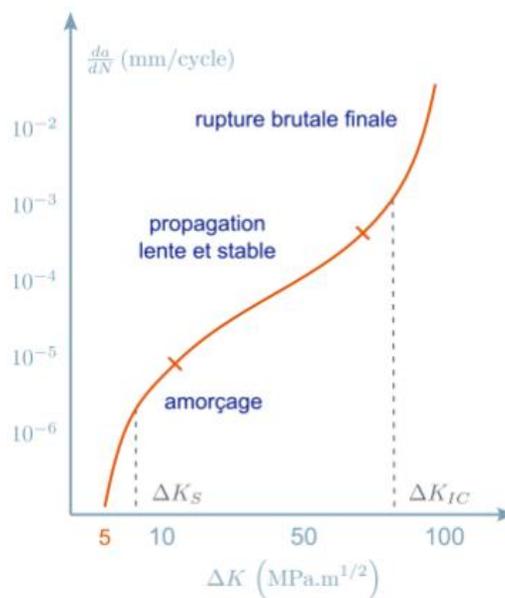


Figure 9. Essai de tolérance au dommage : courbe de propagation

La longueur de la fissure, notée "a", est mesurée en fonction du nombre de cycles dans le cadre de l'essai de tolérance au dommage. Cette mesure peut être effectuée de différentes manières, notamment optiquement à l'aide de caméras ou électriquement en exploitant les variations de résistance électrique. Cette résistance est préalablement calibrée de manière à être sensible aux changements de dimensions du ligament de l'éprouvette, à travers lequel un courant électrique passe. En surveillant ces variations, la longueur de la fissure peut être déterminée. La vitesse de propagation de la fissure, exprimée en millimètres par cycle, est ensuite calculée directement. La vitesse de propagation de la fissure augmente progressivement depuis son amorçage jusqu'à la rupture finale brutale et catastrophique de l'éprouvette. Cependant, cette évolution de la vitesse de propagation suit une loi

relativement simple dans la période intermédiaire, où la propagation est lente, stable et prédictible. Cette loi est gouvernée par la loi de Paris, qui s'exprime comme suit :

$$\frac{da}{dN} = C. \Delta K^m$$

ou C et m sont des constantes caractéristiques du matériau et ΔK est la variation du facteur d'intensité de contrainte. Il vient :

$$\frac{da}{dN} = C. \Delta \sigma^m . \pi^{m/2} . \alpha^{m/2}$$

et donc

$$\frac{da}{dN} = \frac{da}{\lambda . \alpha^{m/2}}$$

avec

$$\lambda = C. \alpha^m . \Delta \sigma^m . \pi^{m/2}$$

Le nombre de cycles $\Delta N = N_2 - N_1$ nécessaires pour accroître la taille d'une fissure de $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ s'écrit donc :

$$N_2 - N_1 = \frac{1}{\lambda} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{da}{\alpha^{m/2}}$$