

ETUDE MICROSCOPIQUE DE LA FISSURATION PAR FATIGUE A HAUTE FREQUENCE

Par FRANÇOIS GIRARD

ONERA, France

INTRODUCTION

MALGRÉ de nombreuses études sur les conditions de la fissuration par fatigue, certains caractères de ce phénomène ne semblent pas encore nettement définis, notamment l'influence de la valeur de la contrainte de cisaillement sur les conditions de fissuration dans le cas du monocristal et du polycristal ainsi que le mode de progression du front de la crique.

Dans ces conditions, il a semblé utile de préciser ces divers caractères, dans le cas d'un alliage d'aluminium à 4% de cuivre, en utilisant un appareillage de fatigue à haute-fréquence en traction-compression⁽¹⁾ qui élimine tout risque d'écroûissage parasite et qui permet un examen visuel ou cinématographique de la progression de fissuration.

MICRO-MACHINE DE FATIGUE

Les essais décrits ont été effectués grâce à une micro-machine de fatigue à haute fréquence (90.000 Hz). Cet appareil destiné à effectuer des essais de fatigue en traction-compression alternée sur des alliages légers a été modifié de façon à obtenir l'immobilité de la zone de l'éprouvette la plus sollicitée, afin de permettre l'observation ou la cinématographie de la fissuration.

La valeur élevée de la fréquence de fonctionnement conduit à utiliser la formation d'ondes élastiques stationnaires longitudinales dans un ensemble comprenant un exciteur piézo-électrique, un amplificateur mécanique, et l'éprouvette (Fig. 1 et 2). L'exciteur est un tube de titanate de baryum dont les deux faces extrêmes argentées forment les électrodes. Il est fixé en son plan médian; sollicité par une tension électrique de fréquence égale à sa fréquence de résonance mécanique, il vibre longitudinalement en demi-onde. Sur une de ses faces extrêmes est collé un tronc de cône en duralumin qui joue le rôle d'amplificateur de mouvement et permet la fixation de l'éprouvette. Sa fréquence propre longi-

tudinale est égale à celle de l'excitateur et il vibre également en demi-onde. Le coefficient de surtension de cet ensemble est d'environ 70 et l'amplitude du mouvement longitudinal à l'extrémité du cône est d'environ 2μ pour une tension de 250 V efficaces appliquée au tube de titanate.

L'éprouvette est une tige de section rectangulaire 3×1 mm. Sa longueur est telle qu'elle vibre longitudinalement suivant deux demi-ondes succes-

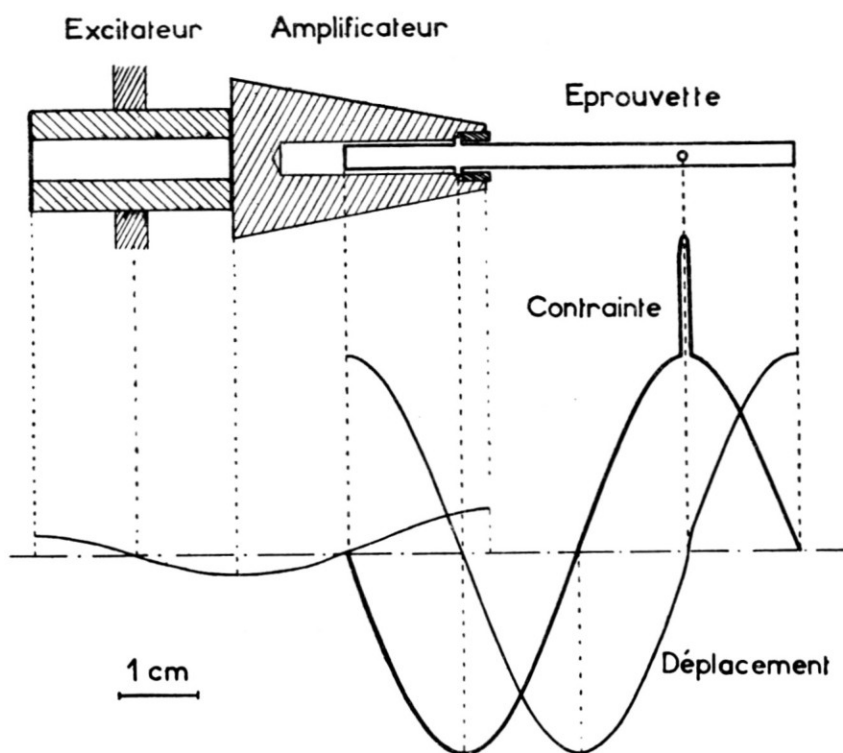


FIG. 1. Schéma de la micromachine de fatigue à 90 000 Hz .

sives à une fréquence sensiblement égale à celle de l'ensemble excitateur. Ce mode de vibration donne lieu à deux plans nodaux de vibration, situés respectivement au $1/4$ et $3/4$ de la longueur. Deux ergots permettent la fixation de l'éprouvette au cône au moyen d'une bague fileté. Pour réaliser une importante amplification de contrainte, cette liaison est réalisée en un plan très voisin mais distinct du plan nodal de l'éprouvette. Ainsi le mouvement excitateur faible de l'extrémité du cône engendre un mouvement vibratoire intense dans l'éprouvette (Fig. 1).

Le second plan nodal de l'éprouvette correspond également à un maximum de contrainte. Un trou de diamètre 1 mm assure à cette contrainte une valeur supérieure à celle qui règne au plan de fixation. Cette zone

de l'éprouvette contient donc simultanément un plan nodal et un maximum absolu de contrainte, c'est-à-dire que la fissuration y prendra place et que le métal y sera immobile, conditions d'une observation directe de la fissuration. La contrainte maximum appliquée au métal est déduite par calcul de l'amplitude du mouvement de l'extrémité de l'éprouvette. Par exemple une éprouvette dont l'amplitude vibratoire de l'extrémité est 8μ subit une contrainte maximum de 10 kg/mm^2 . Un éclairage conve-

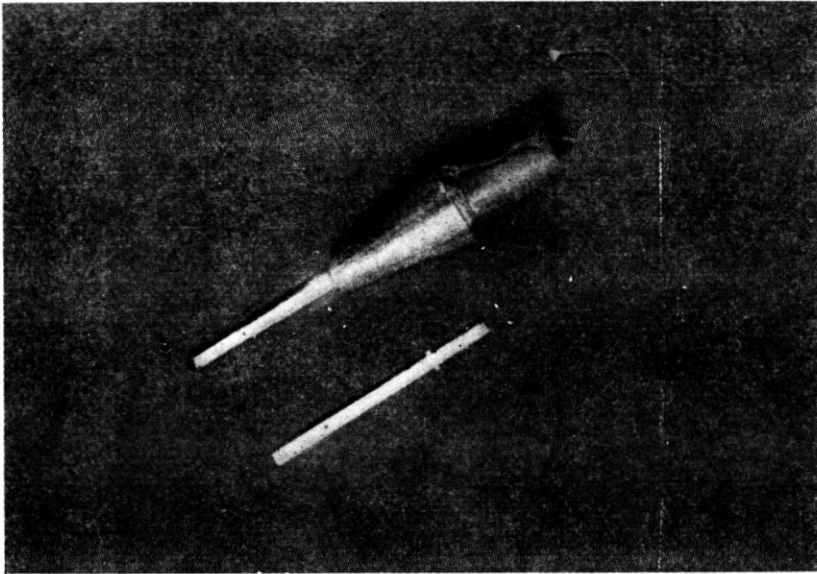


FIG. 2. Vue de l'ensemble exciteur et de l'éprouvette.

nable de cette extrémité fait apparaître de petits points brillants de dimension inférieure à $0,5\mu$. En vibration, ces points apparaissent comme des traits lumineux dont on mesure la longueur par le microscope qui équipe la machine.

Un microphone ultrasonore capte les ondes émises par l'extrémité de l'éprouvette; il délivre une tension sinusoïdale, à la fréquence de vibration de l'ensemble mécanique et proportionnelle à la contrainte dans l'éprouvette. Après amplification, cette tension est appliquée aux électrodes de l'exciteur, réalisant ainsi une auto-oscillation de l'ensemble du système à la fréquence de résonance de l'éprouvette, dont le coefficient de surtension est nettement plus grand que celui de l'ensemble exciteur. L'amplificateur comporte un système de stabilisation et régulation de l'amplitude de la contrainte. De plus des dispositifs annexes permettent la mesure de la fréquence, l'enregistrement de la contrainte, et l'arrêt de

la machine en fin de fissuration de l'éprouvette. Un éclairage stroboscopique permet également de suivre au ralenti le mouvement de l'extrémité de l'éprouvette.

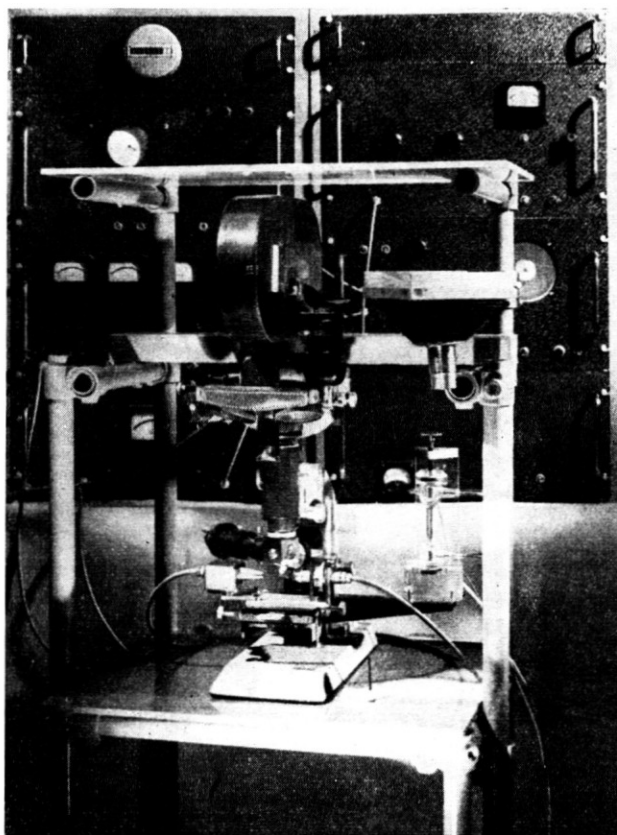


FIG. 3. Ensemble de la micromachine de fatigue.

Le microscope, déjà cité pour son rôle de mesure de l'amplitude de l'extrémité de l'éprouvette, est utilisé d'autre part pour l'observation de la fissuration. Il est alors surmonté, soit d'un système de projection sur écran, soit d'un appareil de prise de vue cinématographique (Fig. 3).

DESCRIPTION DES ESSAIS

Tous les essais présentés ont été effectués sur un alliage d'aluminium à 4% de cuivre (AU 4) de haute pureté. Le métal laminé en plaquettes de 1,1 mm d'épaisseur subit un traitement thermique comprenant: mise en solution de 1 h à 540 °C en bain de sel, trempe à l'huile à 20 °C, et vieill-

lissement à la température ambiante. La dureté Brinell est alors de 90 et la limite élastique de 25 kg/mm². La préparation des éprouvettes comporte d'abord un fraisage en paquet donnant des parallélépipèdes de 3 mm de largeur et 60 mm de long comprenant les ergots de fixation, l'épaisseur restant celle de la tôle, 1,1 mm. La mise à longueur des différentes sections et le perçage du trou de concentration de contrainte sont effectués individuellement d'après les mesures de fréquence propre, de façon à obtenir l'accord de l'éprouvette sur l'excitateur et la coïncidence exacte du plan nodal et du maximum de contrainte. Un polissage électrolytique en bain perchlorique, glycérine, alcool (1 A pendant 1 min) donne la préparation micrographique nécessaire à la surface de l'éprouvette. Les joints de grains sont rendus visibles par une attaque de 30 sec au réactif de Flick. Les grains ont ordinairement des dimensions de 0,3 à 0,4 mm. Quelques éprouvettes ont été préparées dans des monocristaux obtenus par écrouissage critique.

Le développement de la fissure devant être suivi au microscope il est nécessaire de provoquer une amorce préalable de fissure de fatigue, afin de placer dans le champ du microscope la zone de fissuration. A cet effet, l'éprouvette est soumise à une contrainte de 8 à 10 kg/mm² conduisant à un début de fissuration en 10⁶ à 10⁹ cycles. Le microscope est alors en position de mesure de l'amplitude, ce qui permet le réglage exact de la contrainte. La lecture permanente de la fréquence de fonctionnement permet de détecter l'apparition de la fissure et d'arrêter l'essai; une baisse de fréquence de 40 à 50 H_z en 1 à 2 min indique une fissure de 0,1 à 0,2 mm.

Cette amorce de fissure, située sur l'un des 4 bords possibles du trou de concentration, est alors placée dans le champ du microscope. L'essai peut être poursuivi, la contrainte étant repérée par l'amplitude du signal microphonique; le développement de la fissure est, soit directement suivi sur l'écran, soit enregistré par la caméra placée sur le microscope. L'essai est poursuivi jusqu'à fissuration complète de la demi-section intéressée de l'éprouvette.

La fissure obtenue traverse en général plusieurs grains et on est amené à chercher l'orientation de chacun, c'est-à-dire à placer la face et l'axe de l'éprouvette dans une représentation cristallographique de chaque grain. Des empreintes de dureté sous faibles charges (200 g à 1 kg) font apparaître 3 ou 4 lignes de glissement sur la surface polie. La projection sur un calque de la zone fissurée de l'éprouvette permet le report précis des directions des lignes de glissement de chaque grain et la confrontation de ces directions avec les directions des divers éléments de la fissure. Sur ce calque sont également effectuées les mesures angulaires des lignes de glissement entre elles et avec l'axe de l'éprouvette, nécessaire au dépouillement de l'essai.

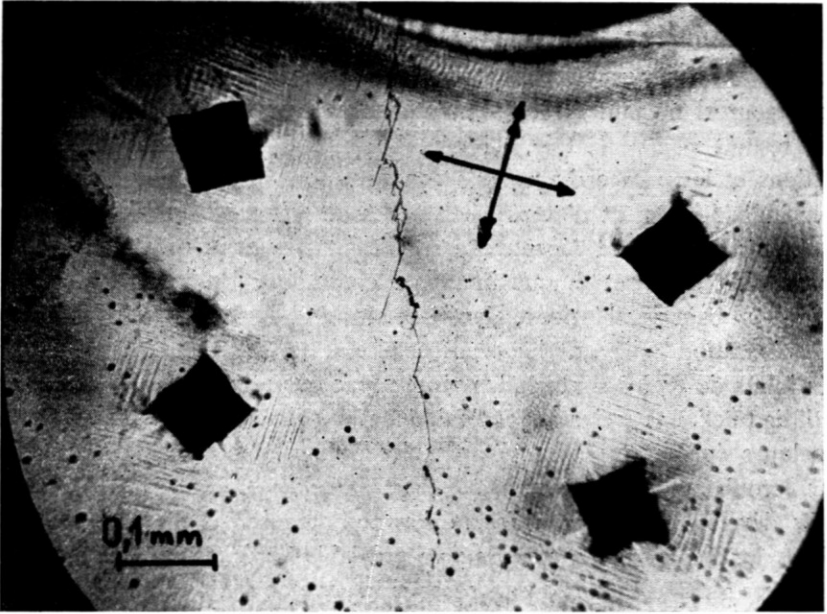


FIG. 4. Fissure de fatigue et lignes de glissement.

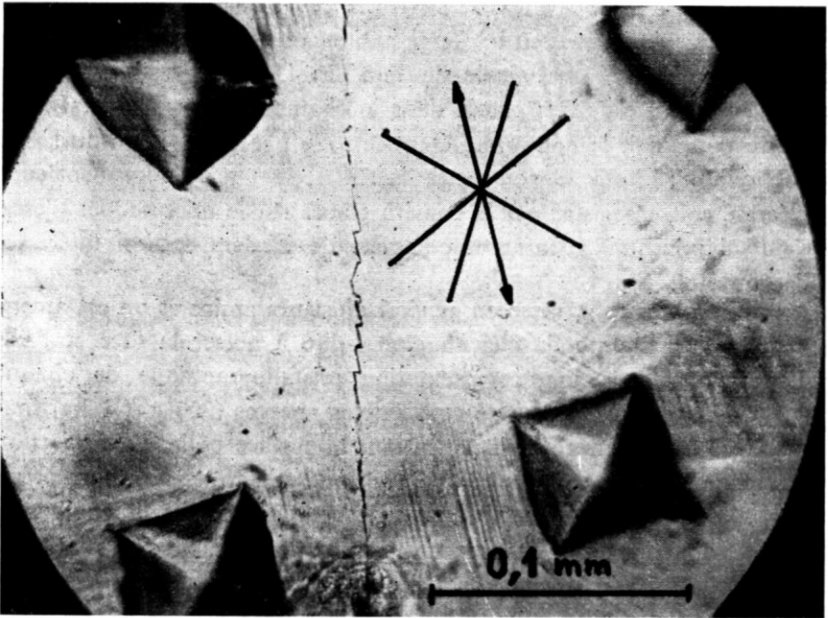


FIG. 5. Fissure formée d'éléments rectilignes suivant plusieurs directions.

RESULTATS DES OBSERVATIONS

Le simple examen du parcours de la fissure sur la surface de l'éprouvette permet de confirmer le fait déjà observé (2) (3) (4) que les différents éléments de la fissure sont parallèles aux lignes de glissement créées, traces des plans de glissement (III) sur la surface de l'éprouvette. L'examen de la trace de l'amorce de la fissure sur la tranche de l'éprouvette et quel-

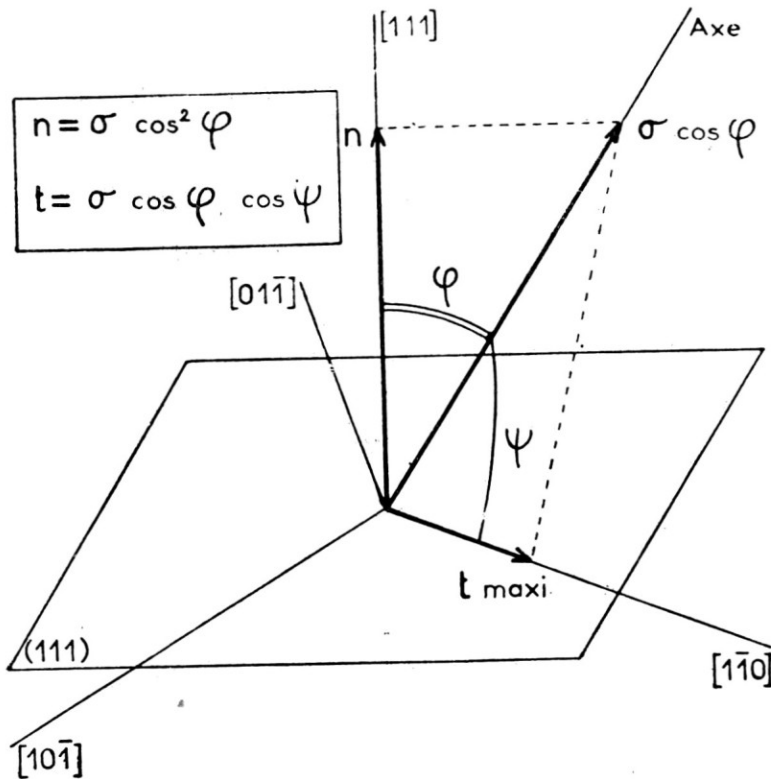


FIG. 6. Calcul des contraintes sur les éléments de glissement.

ques observations obtenues après séparation des deux morceaux de l'éprouvette montrent bien que les plans de rupture eux-mêmes coïncident avec les plans (III) du cristal.

La fissure peut comporter plusieurs aspects: portions rectilignes, parcours sinueux ou zones à grand enchevêtrement. Toutefois à un grossissement suffisant, tous ces aspects se résolvent toujours en éléments rectilignes parallèles aux traces des plans de glissement sur la surface (Fig. 4 et 5). Il a paru intéressant de relier ces différents aspects morphologiques de la fissure à une donnée mesurable, qui doit être évidemment la valeur de la contrainte de cisaillement sur les plans de glissement corres-

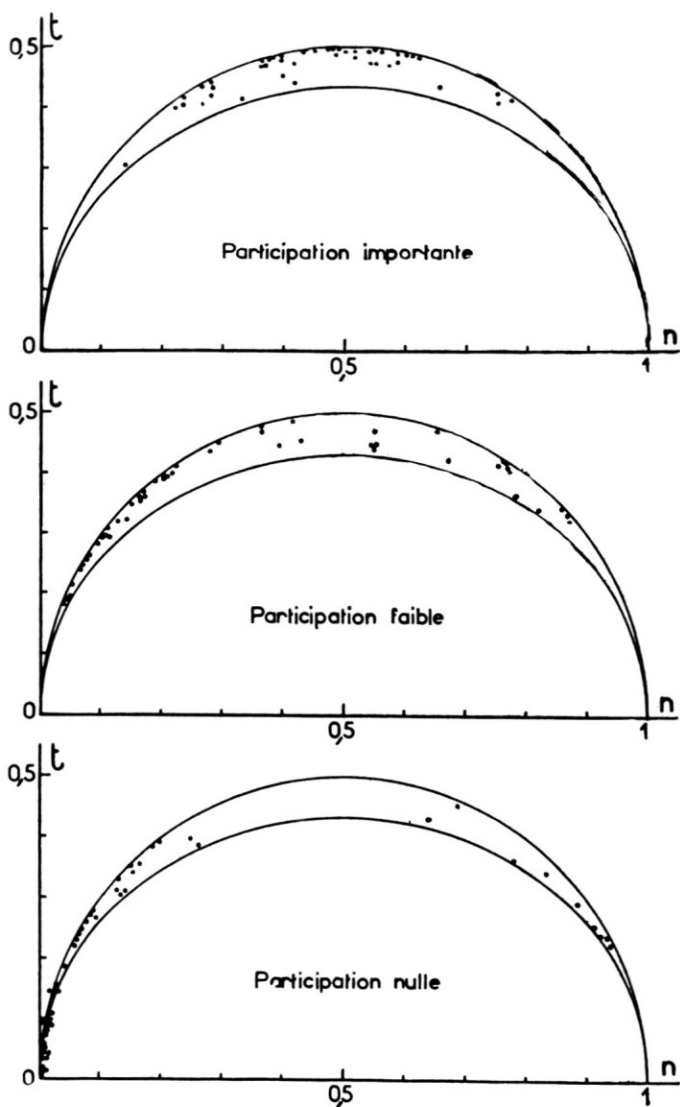


FIG. 7. Contrainte maxima sur les plans de glissement classés suivant leur participation à la fissuration.

pendant à chaque élément, valeur calculée dans les directions de glissement de chaque plan.

Le calcul de ces valeurs nécessite la connaissance de l'orientation du cristal par rapport à l'axe de l'éprouvette, direction de la contrainte principale σ . La mesure précise des angles des lignes de glissement entre elles permet, grâce à un abaque convenable⁽⁵⁾, de placer le plan de la surface de l'éprouvette sur un diagramme stéréographique représentant le cristal

et d'y porter la direction de l'axe de l'éprouvette. Sur ce diagramme, on détermine aisément les angles ϕ de l'axe avec la normale à chaque plan (III) et ψ de cet axe avec les directions de glissement ($\bar{1}\bar{1}0$) de ces plans.

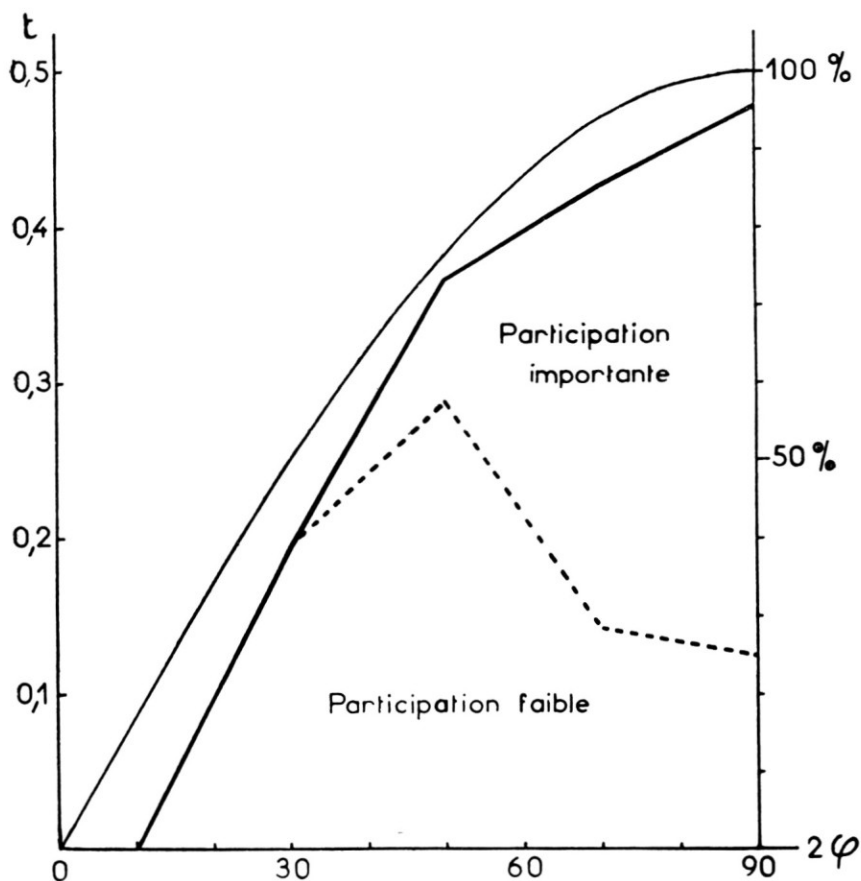


FIG. 8. Correspondance entre la contrainte de cisaillement et la participation des plans de glissement à la fissuration.

Les valeurs de la contrainte de cisaillement t et de la contrainte normale n se calculent à partir de ces angles (Fig. 6)

$$t = \sigma \cos \phi \cos \psi$$

$$n = \sigma \cos^2 \phi$$

On dispose ainsi de toutes les valeurs des contraintes sur les plans de glissement et dans les directions de glissement.

Il importe alors de définir un critère pour confronter ces valeurs quantitatives aux différents aspects morphologiques de la fissure. On a choisi, pour cela, de classer les directions des parties rectilignes élémentaires de la fissure dans un grain, en 3 classes:

- direction de l'amorce de la fissure ou direction de propagation prépondérante.
- direction suivie accessoirement par la fissure.
- direction jamais suivie par la fissure.

Les résultats sont présentés par la Fig. 7. Chaque point correspond à un plan de glissement (III) sur lequel on a calculé la contrainte normale n et la contrainte de cisaillement t dans la direction de glissement ($1\bar{1}0$) la plus favorable. Les points sont placés dans une représentation de Mohr et classés dans l'un des trois graphiques selon la participation de ces directions à la fissuration d'après les trois catégories définies. On voit que ce classement indique une correspondance nette entre la valeur de la contrainte de cisaillement t et l'importance de la fissuration dans cette direction.

Afin de préciser cette correspondance d'une façon plus quantitative, on a porté en fonction de l'orientation générale des cristaux, d'une part la contrainte t , d'autre part la proportion des plans contenus dans chacune des 3 classes de participation à la fissuration. La correspondance, déjà visible dans la représentation précédente est cette fois très rigoureuse (Fig. 8). Ces résultats portent sur 19 éprouvettes rompues, comprenant 37 grains orientés c'est-à-dire 148 plans de glissement.

Ces observations permettent donc de conclure que non seulement la fissure de fatigue suit les plans de glissement, fait bien connu, mais encore que la valeur de la contrainte de cisaillement conditionne le développement plus ou moins important de la fissure sur tel ou tel de ces plans, à l'amorce, et au cours de sa propagation à l'intérieur du métal.

ÉTUDE CINÉMATOGRAPHIQUE

Ces observations relatives à l'aspect final de la fissure sont complétées par une étude cinématographique qui permet de préciser quelques points de la formation même de la fissure. Pour 7 éprouvettes la propagation de la fissuration a été filmée à la cadence normale de 24 images/sec. Le dépouillement de ces films permet des observations qualitatives et des mesures de vitesse de propagation sur divers éléments de la fissure.

Dans les grands éléments rectilignes de la fissure, la vitesse de propagation est sensiblement constante. Pour les contraintes utilisées de 8 à 10 kg/mm² on a noté des vitesses de 15 à 30 μ /sec. Dans les portions sinueuses de la fissure, qui sont formées de petits éléments rectilignes parallèles à plusieurs directions de glissement, la vitesse moyenne dans la direction générale de propagation de la fissure est plus faible, de l'ordre de 10 à 20 μ /sec.

Mais l'intérêt de ces observations réside surtout dans l'observation des zones où la fissure semble très tourmentée et présente un enchevêtrement de plusieurs branches (Fig. 9). En effet, la formation de ces zones est due à des fissurations secondaires multiples se produisant en dehors de la fissure principale et dont l'extension conduit au raccordement de ces éléments entre eux et avec la fissure principale. Ces éléments apparais-

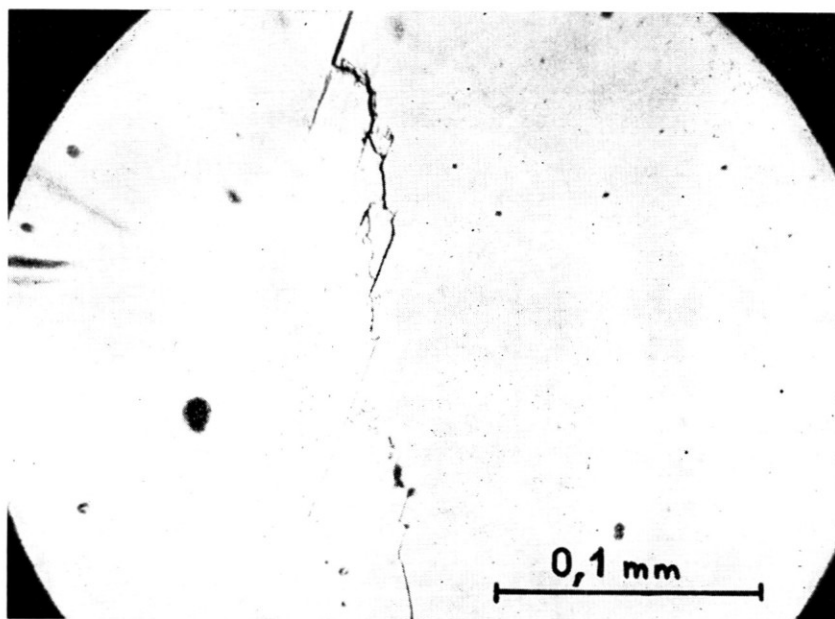


FIG. 9. Zone de fissuration tourmentée.

sent d'abord sous forme de points qui s'étendent dans les deux sens à une très grande vitesse ($100 \mu/\text{sec}$) qui diminue régulièrement quand la dimension de l'élément s'accroît.

Ces particularités montrent que la rupture n'a pas lieu dans ce cas à la surface, mais qu'il s'agit d'une rupture sur un plan de glissement à l'intérieur du métal, qui vient percer la surface en se développant. Ainsi la fissure ne se forme pas dans ce cas à la façon d'un sillon progressant à la surface du métal mais par succession d'éléments de rupture sur des plans favorables, se produisant en désordre, soit à la surface, soit à l'intérieur du métal. Ce processus expliquerait le fait que la fissure ne se poursuive que rarement suivant une longue ligne droite dans une direction même très favorable, mais forme le plus souvent une ligne brisée partagée entre deux directions.

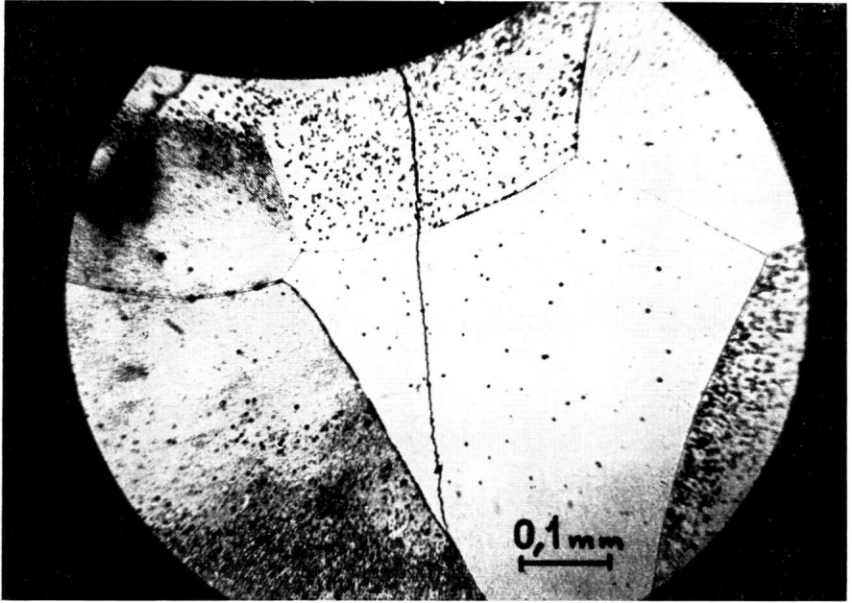


FIG. 10. Fissure traversant un joint de grain.

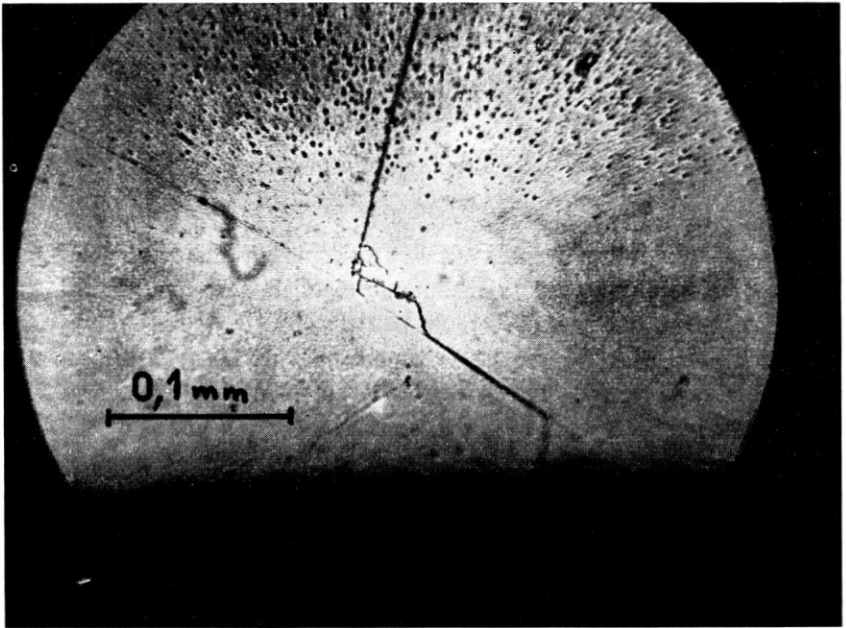


FIG. 11. Fissure suivant un joint de grain.

COMPORTEMENT AUX JOINTS DE GRAINS

Le passage d'un grain à un autre du métal se fait pratiquement toujours sans particularité notable. Si la fissure est rectiligne dans un grain et se poursuit de la même façon dans le grain suivant, on constate une sorte de réfraction au joint de grain, la fissure passant d'une direction à une autre. Dans le cas d'une fissure sinueuse, elle se poursuit dans la même direction générale, seul l'examen plus précis des éléments rectilignes élémentaires indique alors le changement d'orientation du cristal (Fig. 10).

Dans quelques cas la fissure suit le joint de grain pendant un certain temps avant de s'en éloigner à nouveau dans le second cristal; mais dans ce cas, on trouve toujours que le joint de grain est parallèle à une direction de glissement de l'un ou l'autre cristal (Fig. 11).

FISSURATION D'UN ENSEMBLE POLYCRISTALLIN

La relation étroite observée entre la fissuration et la valeur de la contrainte de cisaillement sur les plans de glissement permet de se demander quel sera le comportement d'un ensemble polycristallin. En effet on peut

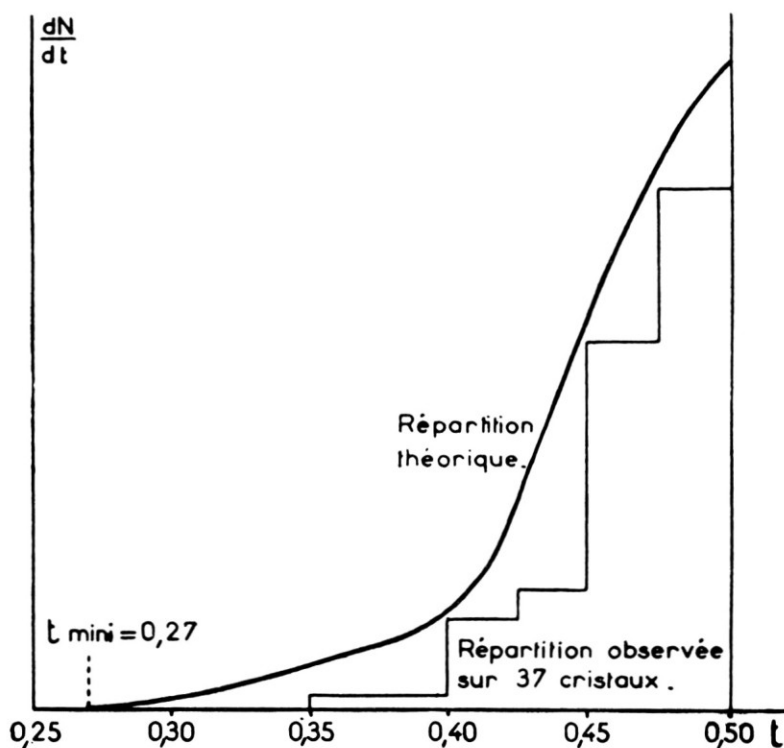


FIG. 12. Répartition de la contrainte de cisaillement maxima pour un ensemble polycristallin.

supposer que les orientations variées des divers cristaux apporteront une grande irrégularité dans la propagation de la fissure. Il a donc paru intéressant d'examiner quel serait la répartition des valeurs de la contrainte de cisaillement sur le plan de glissement le plus favorablement disposé de chaque cristal d'un ensemble polycristallin dont l'orientation est répartie uniformément dans l'espace; autrement dit, il s'agit de calculer la fréquence avec laquelle se rencontre une valeur donnée de t/σ . L'orientation la plus défavorable (contrainte dans la direction (III)) donne:

$$t/\sigma = 0,27$$

c'est-à-dire que ce rapport sera toujours compris entre 0,27 et 0,50.

La Figure 12 représente la fréquence d'apparition d'un rapport t/σ donné. Elle montre que, par exemple, pour 89%, la contrainte de cisaillement maximum est comprise entre 0,40 et 0,50. Ce fait explique le comportement quasi homogène d'une éprouvette polycristalline à l'égard de la fissuration. La figure indique de plus la répartition en t/σ des 37 cristaux observés. On voit que cette répartition suit sensiblement la répartition théorique.

CONCLUSION

Ces essais effectués à haute fréquence, dans le domaine élastique du métal et sans perturbation plastique parasite, permettent de vérifier ou d'établir les conditions suivantes:

- les sollicitations alternées n'ont produit dans ce cas aucun effet de déformation plastique visible.
- les divers éléments de la fissure coïncident avec les plans de glissement (III).
- la valeur de la contrainte de cisaillement sur les plans de glissement et dans les directions de glissement conditionne la participation de ces plans à la fissuration d'une façon plus ou moins accentuée suivant la valeur de cette contrainte.
- la fissuration ne progresse pas uniformément, mais se produit sur divers plans, à partir de la surface ou à l'intérieur du métal; le raccordement ultérieur de ces divers éléments produisant une fissure continue.
- dans le cas étudié, les joints de grains ne semblent pas apporter de perturbation autre qu'un changement d'orientation du réseau cristallin.
- la fissuration assez régulière d'un ensemble polycristallin peut être attribuée à la régularité de la contrainte de cisaillement maximum due à la répartition statistique de l'orientation.

Ces quelques observations, obtenues dans des conditions expérimentales bien définies, doivent pouvoir constituer une base pour des études

plus complètes, tant de l'influence de divers facteurs sur le comportement à la fatigue que de la compréhension du mécanisme de rupture par fatigue à l'échelle des défauts du cristal.

BIBLIOGRAPHIE

1. GIRARD, F. et VIDAL, G., Micromachine de fatigue en traction-compression à 92 000 alternances par seconde. *Rev. Mét.* LVI, n° 1, 1959, 25-39.
2. GOUGH, H. J., Crystalline Structure in Relation to Failure of Metals Especially by Fatigue. *Proc. ASTM*, Vol. 33, 1933, 3-114.
3. GOUGH, H. J., A Study of the Fatigue Characteristics of Three Aluminium Specimens. *J. Inst. Metals*, Vol. 58, pt 1, 1936, 97-112.
4. WEINBERG, J. G. and BENNETT, J. A., Effect of Crystal Orientation on Fatigue Crack Initiation in Polycrystalline Aluminium Alloys, NACA, T.N. 3990, Aug. 1957.
5. SEBILLEAU, F., Détermination de l'orientation des cristaux cubiques par la trace des plans (III) sur la surface. *Bull. Soc. Franc. Minér. Crist.*, 1958, LXXXI, 241-2.

DISCUSSION

J. F. CUSS: Can the author please say whether in the series of tests which he has described, he found a scatter in the results which was similar to that which one has been led to expect from general fatigue work; on account of which, one divides the life by a factor of about 5, to get a safe structure or member. If the scatter is as wide in the author's tests as is usual in other fatigue work, does his method of examination offer any explanation for this phenomenon?

F. GIRARD: Dans tous les essais effectués à haute fréquence (90 000 Hz) et en particulier dans des essais sur éprouvettes de révolution classiques, destinés à déterminer des couches de WOHLER, nous avons obtenu un comportement comparable à celui des essais à basse fréquence, tant du point de vue des durées de vie à chaque contrainte, que de celui de la dispersion.

Mais l'étude présentée ici étant orientée vers la progression de la fissuration, alors que la dispersion est liée à l'amorçage de la fissure, nous n'avons aucune observation nouvelle à indiquer sur le phénomène de la dispersion.

B. J. LAZAN: In view of the very high frequency of vibration the temperature increase in the specimen caused by internal damping can be significant. The specimen used by Mr. Girard has a rather high stress concentration and the stress gradient is correspondingly large. Thus, if a temperature increase is caused by damping it would probably occur in a very limited region of the specimen. Similarly, a large stress gradient exists at the crack front; thus, the temperature increase is again likely to be very local in character. I should like to ask Mr. Girard about: (a) the magnitude of the stress gradient at the edge of the hole (or, for example, how far in from the edge of the hole is the stress reduced (20%)), (b) the method used to measure specimen temperature and the area over which the temperature is averaged, and (c) if this method is sensitive to local temperature at the edge of hole (say, for example, over a distance in which the stress is 20% of maximum).

F. GIRARD: La forme particulière de l'éprouvette présentée ici ne permet pas, en effet, de tirer de conclusions valables sur l'échauffement du à l'amortissement intrinsèque;

le coefficient de concentration de contrainte varie de 2,3 au bord du trou à 0,57 au bord de l'éprouvette (distants de 1 mm) et ainsi, le gradient transversal de contrainte, de même d'ailleurs que le gradient longitudinal, est très élevé.

Toutefois, l'intérêt de ce problème nous a conduit à faire des essais particuliers sur un autre type d'éprouvette. Nous avons utilisé une éprouvette cylindrique vibrant en demi-onde (90 000 Hz) dans laquelle la répartition de l'amplitude de la contrainte est sinusoïdale et sans concentration locale. Dans le cas du duralumin, soumis à une contrainte de 12 kg/mm², l'énergie dissipée par cycle de 4.10^{-6} J/mm³, valeur usuelle à basse fréquence, a d'abord été supposée constante avec la fréquence. L'intégration dans toute l'éprouvette, conduirait à une puissance dissipée de 18 W. L'échauffement adiabatique de la zone la plus sollicitée serait de 70°C/s et la température d'équilibre prise par l'éprouvette, de plusieurs centaines de degrés. Devant l'impossibilité de déceler le moindre échauffement de l'éprouvette, nous avons conclu à une diminution importante de l'amortissement interne lorsque la fréquence augmente.

D'autre part, nous n'avons jamais observé, au voisinage du front de crigue, des traces d'échauffement très localisé, comme des colorations d'oxydation indiquées par certains auteurs.