



La Thèse de doctorat

**LA FATIGUE GIGACYCLIQUE D'UN ALLIAGE
DE TITANE
(Résumé)**

Alexander Nikitin

Directeur de la Thèse..... Prof . Thierry Palin-Luc
Co-directeur de la Thèse..... Emeritus Prof. Claude Bathias
Co-directeur de la Thèse..... Prof. Andrey Shanyavskiy

Ville-d'Avray, 2014

Content

Introduction	2
Matériaux	3
Microstructure	5
Microdureté	9
La propriété mécanique	10
Les échantillons et les équipements expérimentaux	12
Les mécanismes d'amorçage de la fissure dans VT3-1 forgé	15
L'Anisotropie de la propriété mécanique de VT3-1 forgé	22
L'effet de la contrainte moyenne	24
La fatigue gigacyclique dans l'alliage de titane VT3-1 extrudé	25
La Torsion	30
Les conclusions	33
Literature	34

Introduction

L'étude présentée dans ce manuscrit s'est déroulée aux Laboratoire Energetique, Mécanique et Electromagnetisme (LEME, Ville-d'Avray), Laboratoire Matériaux Endommagement Fiabilité et Ingénierie des Procédés (LAMEFIP, Talence) et Laboratoire au Centre de Sécurité des Vols en Transport Aérien (Cheremetievo-1, Moscou) . La thèse été dirigé par Emeritus Prof. Claude Bathias (LEME), Prof. Thierry Palin-Luc (LAMEFIP) et Prof. Andrey Shanyavskiy (Cheremetievo-1). L'étude été réalisé en cooperation entre Paris Université 10 OUEST Nanterre La Defense et Moscou Université d'Aviation Technologique. Le financement a été accordée par l'entreprise dans LASUR dans le cadre de un bourse CIFRE.

L'objectif de ce travail été la problème de la fatigue dans un alliage de titane utilisé par l'industrie aéronautique. Le titane et ses alliages est largement utilisé dans le construction des avions et c'est pour ça il y a beaucoup des variations dans les types de chargement. Les alliages de titane sont utilisé pour fabrication les elements de la fuselage (resistance contre haut températures), train d'atterrissage (resistance contre la charge élevée et repétative), elements de turbine (la chargement avec haute frequence) [1]. En cas de les chargements répétitive élevée (la fatigue oligocyclique) et moyenne (la fatigue megacyclique), la problem de la fatigue est bien établi et étudié. La multitude des résultats expérimentaux sont disponible dans le literature pour le titane. Cependant, en cas de chargement avec haute fréquence, typiquement l'amplitude de contrainte est suffisent plus bas par rapport de la fatigue oligocyclique et megacyclique, mais le number de répétitions est très grand. Ce régime de chargement est s'appelle la fatigue Gigacyclique [2].

Ce domaine de la fatigue est nouveau et n'est pas encore bien étudié. Donc, il n'y a pas l'expérience suffisante pour déterminer les recommandations sur la conception contre la fatigue gigacyclique. Ce problème est devenu très grave dans l'industrie aéronautique. Dans le livre [2] c'était remarqué que la durée de la vie typique pour certains éléments de moteur d'un avion est approchée le 10^{10} cycles et plus. Les propriétés mécaniques des matériaux ne sont pas bien étudiées en raison des limites de la technique expérimentale classique. Les techniques expérimentales classiques pour l'essai de fatigue supposent la fréquence de chargement maximale et 100 Hz. Donc, un essai de fatigue jusqu'à 10^{10} cycles exige plus que 3 ans. C'est pourquoi le design des éléments pour un moteur était basé sur les concepts de la fatigue oligocyclique et mégacyclique. Cependant, cette approche ne permet pas de réaliser le fonctionnement de moteur sans fissuration de fatigue en service. En fin de 1990e, c'était rapporté une série de fissurations inattendues dans un disque de compresseur des avions [3]. L'analyse de ces fissurations a montré que la fatigue était provoquée par les vibrations en fréquence haute (pas moins de 1 kHz). Pour retrouver les raisons de fissuration dans un alliage de titane sous le chargement vibratoire et étudier les mécanismes d'amorçage de fissure à très grand nombre de cycles un alliage de titane aéronautique a été examiné dans le régime de fatigue gigacyclique.

Matériaux

Selon l'objectif de ce travail l'alliage de titane pour l'essai en fatigue a été obtenu de l'industrie aéronautique. C'est l'alliage de titane VT3-1 (Ti-6Al-4 Mo) traité en deux processus thermomécaniques différents: forgeage à chaud et extrusion. En cas de forgeage le matériau était formé dans un disque de compresseur de l'avion, Fig.1a. Le disque était utilisé sur un avion Tu-154 pendant 6000 vols à peu près. Après l'exploitation il était démonté du moteur et remplacé par un autre en service régulier. Le disque était bien vérifié par le contrôle non destructif et transféré à l'université pour l'essai de fatigue comme le disque non endommagé. Ce type de matériaux est rare et il est cher pour l'étude systématique. Le deuxième

type de traitements thermomécanique (extrusion) est moins cher et permet réalisé l'étude systématique. Cependant, il n'est pas clair est ce que c'est possible à extrapoler les results obtenu pour le titane extrudé sur le titane forgé. Ce étudié était réalisé dans ce projet là. Le titane extrudé était obtenu du les barres de l'alliage de titane VT3-1, Fig.1b. Les barres sont fabriqué par l'institut des alliages léger de la Russie (VILS) laquelle produit les alliage pour l'industries aeronautique.



(a)

(b)

Fig.1. Le matériaux pour l'essai en fatigue gigacyclique (a) le disque de compresseur de la moteur pour l'avion Tu-154, (b) les barres éxtrudé fabrique par l'institut des alliages legér.

La composition chimique de l'alliage de titane VT3-1 est la même pour le disque et les barres. La composition est presenté dans le table 1. Des éléments d'alliage principale pour le VT 3-1 sont aluminium, molybdène et chrome.

Table 1. La composition chimique de l'alliage de titane VT3-1

Fe	C	Si	Cr	Mo	N	Al	Zr	O	H	Ti
0.2-0.7	<0.1	0.15-0.4	0.8-2	2-3	<0.05	5.5-7	<0.5	<0.5	<0.015	Balance

L'aluminium est renforcé la phase alpha de le titane, tandis que le molybdène et le chrome sont renforce la phase beta. Donc, l'alliage de titane VT3-1 est deux-phases alliage avec le microstructure sensible à un traitement thermique. La

microstructure a l'influence très grave sur la propriété mécanique de le deux phases alliage de titane. L'alliage avec la même composition chimique peut être traité pour obtenir la globular or lamellar microstructures. Dans un étude sur l'influence de la microstructure sur les propriétés mécanique de Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo est montré la gros difference entre résistance de fatigue de la microstructure globular et lamellar. Cette différence est atteindré 300 MPa. Dont, l'étude sur la microstructure est nécessaire pour l'alliage de titane avant l'essai de fatigue.

Microstructure

Pour l'analyse de la microstructure plusieurs échantillons était prepare à partir du le disque de la turbine et les barres extrudé. Typiquement le processus de la forgeage favorise le développement de la fibrage dans l'object forgé. La fibrage peut être provoqué l'anisotropie dans les propriétés mécanique et changement de la morphologie du microstructure dans le directions et positions différent. En cas de l'extrusion, la microstructure de l'alliage a la symétrie axial et plus régular dans les sections different de la barre. C'est l'assomption général, laquelle était vérifié par l'analyse de la microstructure.

La complexité de la microstructure forgé exiger le 3D analyse de la microstructure dans la chaque position étudié. Pour ce faire les échantillons cylindrique était fabriqué à partir du position different dans le disque de compresseur. En suit, ces échantillons cylindrique était coupé en trois parties par des plans perpendiculaires, Fig.2. La même technique a été employé pour l'analyse de la microstructure de l'alliage extrudé.

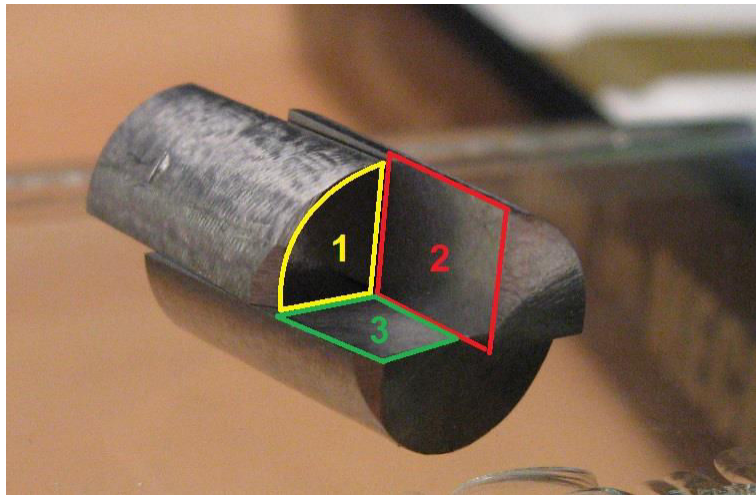


Fig.2. L'échantillon pour l'analyse de la microstructure en 3D (forgé et extrudé).

Chaque échantillon a été enrobé ou résine et a été poli mécaniquement. La surface poli a été attaqué par le KROLL (l'eau distillée 92 ml, HNO₃ 6 ml et HF 2 ml) pendant 40 sec pour l'observation de la microstructure. La microstructure typique de la titane forgé est représentée par la alpha-platelets élongé laquelle sont séparé par le couche mince de la phase beta, Fig. 3.

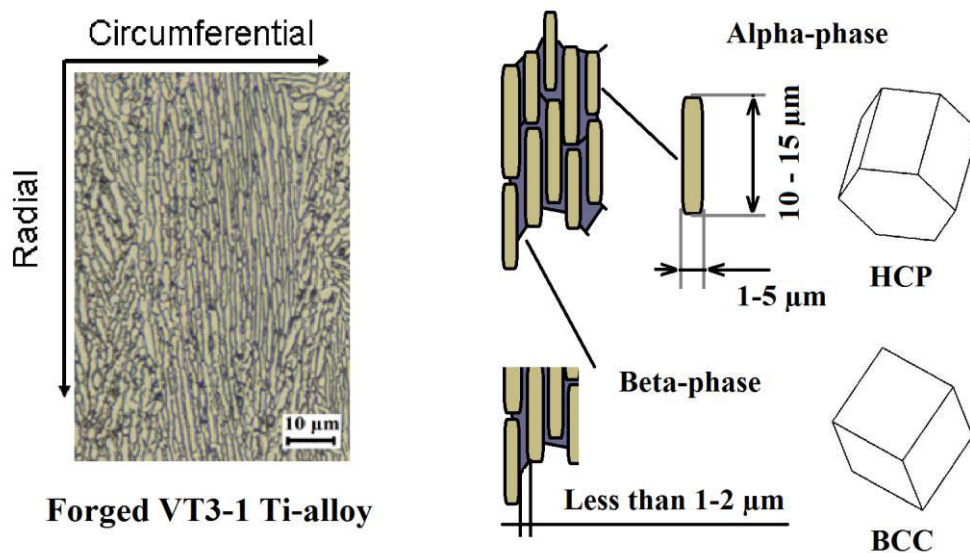


Fig.3. La microstructure typique de l'alliage de titane forgé

Les tailles caractéristique de la lamelles sont 1-2 μm par 10 - 15 μm dans la direction de l'allongement. La phase alpha (la système réticulaire hexagonal) est

blanc sur la Fig.3, tandis que la phase beta (la système réticulaire cubique) est marqué comme noir. La même morphologie a été trouvé dans chaque facette de 3D analyse. L'analyse a été fait dans plusieurs position dans la jante et le plateau de le disque de compresseur.

En case de la microstructure d'un alliage de titane extrudé la morphologie de la phase alpha est beaucoup plus fine et moins élongé. Sur la facette à travers de la direction de l'extrusion, les tailles caractéristique sont varié en cours de rayon. Au centre de la barre les tailles de la phase alpha sont plus ou moins $2 \times 2 \mu m$. Au bord de la barre les tailles de la alpha phase sont moins de $1 \mu m$ par $1 \mu m$ et la géométrie de la phase est presque round. En plus la microstructure au centre de la barre est bien perturbé par les defects produi par le process de le traitement thermomécanique. L'analyse de la microstructure sur la facette le long de l'axe d'extrusion a été montré la même variation de la taille de alpha phase en cours de rayon. La morphologie de la phase alpha est allongé le long de la direction de l'extrusion. Les 3D cartographies de la microstructure de l'alliage de titane forgé et extrudé sont présenté sur la Fig.4.

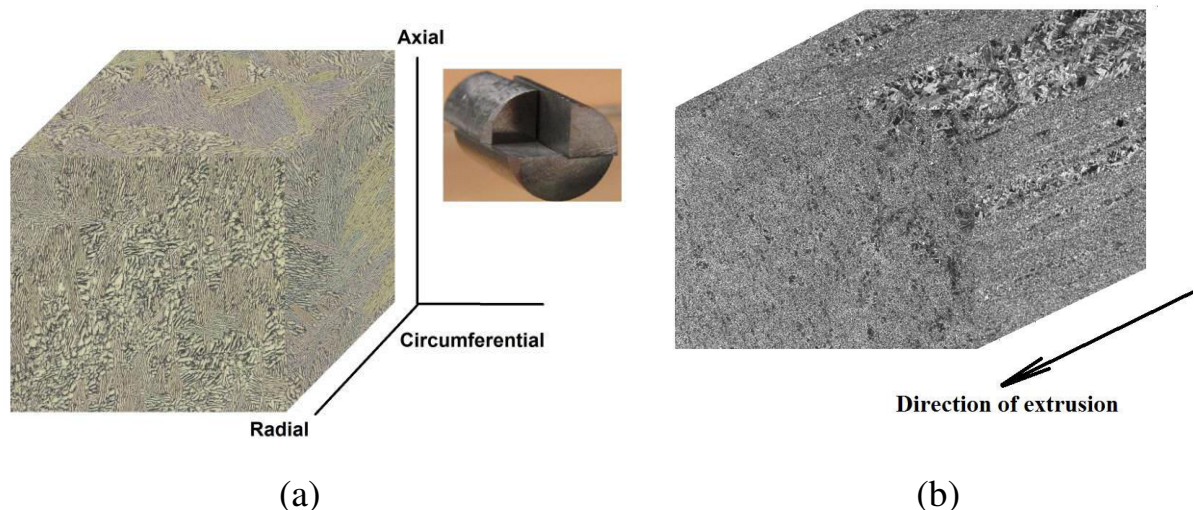


Fig.4. Les 3D cartographies de la microstructure (a) l'alliage de titane forgé, (b) l'alliage de titane extrudé

Le caractéristique particularité de la microstructure de le titane forgé est l'organisation des alpha lamelles dans les grand domaines de la similitude orientée

plaquettes. Ce domaine a été s'appellé le 'macro-zones' [4] et c'était remarqué l'influence de ces structures sur la résistance de fatigue en cas de la fatigue megacyclique. La taille de le 'macro-zone' est suffisant grand à partir de plusieurs centaines du micromètres au quelques millimètres, Fig.5. Typiquement les plaquettes de alpha phase laquelle se organisé dans un macro-zone sont plus fine par rapport de la taille caractéristique, Fig.3. Cependant, parfois il à y d'autre type de agglomération des plaquettes de la phase alpha dans laquelle la taille caractéristique est plus large par rapport de la taille normale. L'exemple de la zone avec les plaquettes rugueux est présenté au borde de la macro-zone sur la Fig.5 (sur la macrozone au milieu). C'est d'autre type de la defect grave de la microstructure de un alliage de tiane forgé.

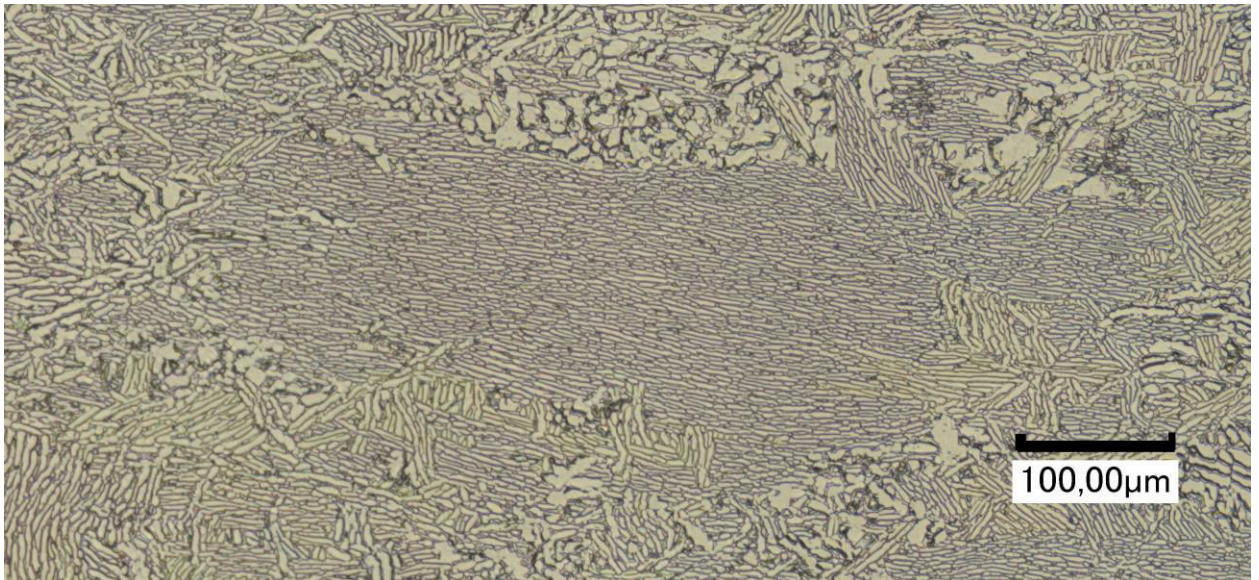
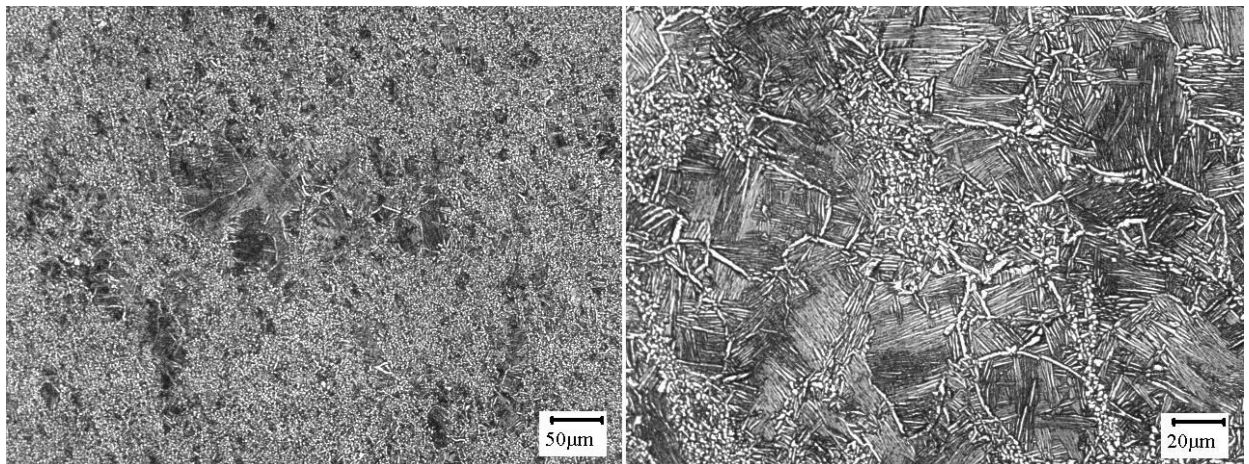


Fig.5. Le 'macro-zone' dans un alliage de titane VT3-1 forgé

Dans un alliage de titane extrudé la defect plus grave est la zone dans le centre de la barre. La morphologie de la microstructure ici est très sensible à la taille et geometrie de le grain de la phase beta. Très mince plaquettes de la phase alpha avec la même orientation remplir tout l'espace de grain bêta primaire, Fig.6.



(a)

(b)

Fig.6. La defect de la microstructure de un alliage de titane VT3-1 extrudé (a) l'apparition de la microstructure dans le centre de la barre et (b) les grains de la phase beta primaire sont rampli par les plaquettes de la phase alpha.

Finalement, les microstructures des alliages de titane forgé et extrudé sont consiste les defects grave. Chaque fois c'est l'agglomération des plaquettes de la phase alpha. En case de le titane forgé la variation dans la morphologie est plus important par rapport de le titane extrudé. En case de l'alliage forgé l'agglomération de la plaquettes fin et rugueux, 'macro-zones' et quelques autres défauts a été trouvé. Il est nécessaire de souligner, comment il n'y a pas aucune inclusion non métallique dans les deux alliage de titane. En cas d'un alliage de titane extrudé il à y juste une seul type de la defect grave c'est les plaquettes très fines de la phase alpha dans le grain beta primaire.

Microdureté

La microdureté a été étudié sur les échantillons coupé dans le trois planes perpendiculaire. La méthode d'essai était la mesure de dureté Vickers. Le poids utilisés est 500gr.; le temps de la penetration est 10 sec. Pour l'alliage de titane forgé toute les valeurs de microdureté trouvé sont presque la même pour chaque plan. La valeur moyenne de la dureté pour un alliage de titane forgé est 364 HV₅₀₀. La dureté dans la macro-zone est normalement en peu plus bas par rapport de la

valeur moyenne. Dans l'agglomérations de les plaquettes rugueux de la phase alpha, la microdureté est élevé.

En cas de l'alliage de titane extrudé la microdureté est en peu plus haute par rapport de le titane forgé. La valeur moyenne est 374 VH₅₀₀. La microdureté à la centre de la barre est plus bas, Fig.7.

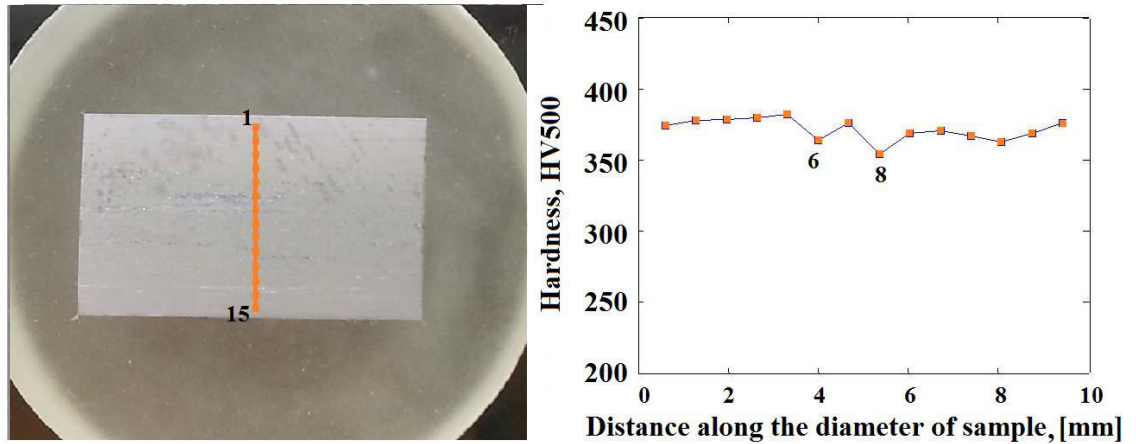


Fig.7. La microdureté d'un alliage de titane extrudé

Si la point de mesure de la microdureté est dans un grain de la phase beta primaire, la valeur est suffisant plus bas par rapport de la valeur moyen, Fig.8.

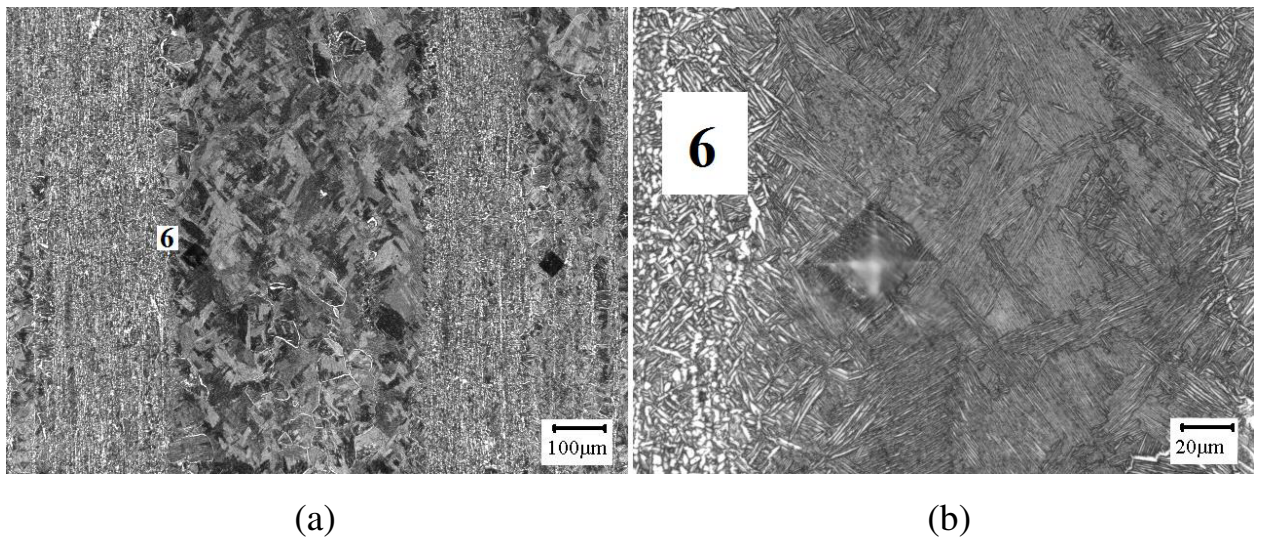


Fig. 8. Le point N° 6 de la mesure de la microdureté présenté sur la figure 7.

C'est remarquable comment la microdureté dans une zone avec les plaquettes fin de la phase alpha toujours montre la microdureté plus bas par rapport de la valeur moyen. La valeur moyen est plus haute pour le titane extrudé.

La propriété mécanique

La propriété mécanique a été étudiée pour les deux alliages de titane sur le même mini-échantillon de traction quasi-statique, Fig.9. L'essai a été effectué sur une machine de traction INSTRON avec électromécanique activateur.



Fig.9. Le mini-échantillon pour l'essai de traction quasi-statique

La déformation prévue pour un alliage de titane VT3-1 est normalement limitée par la valeur de 10 % pour le titane extrudé et 6 pour le titane forgé. Pour mesurer cette déformation, un extensomètre avec la base outille de 25 mm a été engagé. Le chargement a été contrôlé en un mode de contrôle des déplacements. La vitesse de chargement était 0.075 mm/min pour chaque échantillon. Les résultats de l'étude sur la propriété mécanique sont présentés sur la Fig.10 et résumés dans le tableau 2.

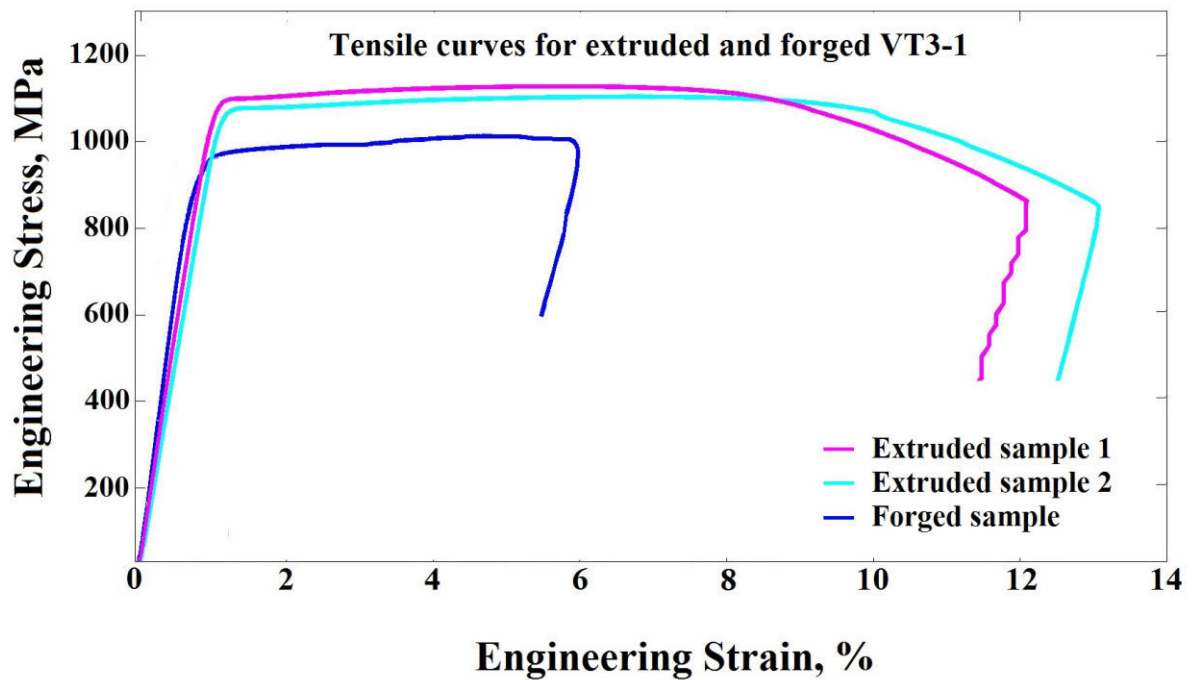


Fig.10. Les courbes de traction pour les alliages de titane forgé et extrudé.

Paramètre	E, (GPa)	Rp _{0.2} , (MPa)	Rm, (MPa)	ϵ_R , (%)
Ti-forgé	116	960	990	6
Ti-extrudé	109	1050	1107	13

Le deux alliages de titane sont montre bonne propriété mécanique avec clear plateau de la plasticité. La valeur de 6% est typique pour un alliage de titane VT3-1 forgé. La ductilité et toute les propriétés mécaniques d'un alliage extrudé sont plus haute par rapport de l'alliage forgé. Cependant la différence dans les limites d'elasticite est moins de 100 MPa.

Les échantillons et les équipements expérimentaux

L'objectif de ce thèse est la fatigue dans un alliage de titane à très grand number des cycles (jusqu'à 10^{10} cycles). Depuis le fin des années 1980 de la machines ultrasons sont engagé pour l'essai de fatigue à très grand numbers des cycles [2]. Le principe de toutes machines ultrason est basé sur un concept de la machine du Mason. Le concept et la première machine a été construit à l'année

1950, mais la diffusion de ce machine dans les laboratoires du le Monde était limité à cause de mauvais controles des parameters d'essai. Donc, la première machine ultrason pour l'essai de fatigue avec les contrôles par l'ordinateur était la machine construit dans la laboratoire de Prof. C.Bathias. Le schéma principale de ce machine est représenté sur la Fig.11

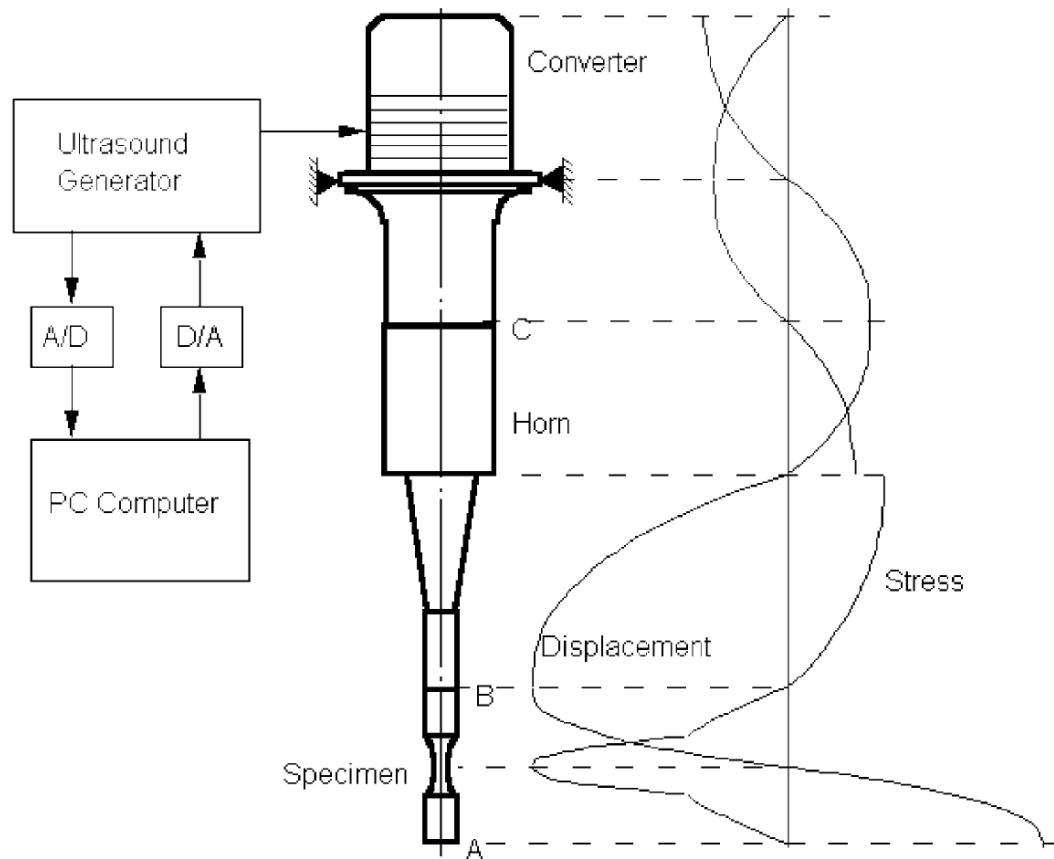


Fig.11. Le Le schéma principale du machine ultrason pour l'essai de fatigue

La principe de fonctionnement de ce machine a été dessiné par Prof. C.Bathias et elle a été s'appelle 'Le concept gigacyclique' [2]. L'excitation de l'échantillon est réalisé par les ondes élastiques à la fréquence de les vibrations naturel de l'échantillon. En ce condition l'onde stationnaire est formé dans l'échantillon. L'échantillon est dessiné de la manière à le sablier et une node de déplacements est trouvé au milieu de l'échantillon, Fig.11. Pour garder ce conditions de vibration toutes éléments de la machine sont dessiné à la manière d'avoir la même fréquence de les vibration naturel. La machine est piloté par l'ordinateur avec la réaction i.e.

en cas de les deviations des paraméters de vibrations le logiciel va corriger ces paraméters automatiquement.

Une machine ultrason dessiné dans la laboratoire de Prof.C.Bathias a été utilisé pour l'essai de fatigue gigacyclique sur l'alliage VT3-1. Ce machine était adopté pour l'essai avec un rapport de contrainte positive. Pour ce faire un soutien a été utilisé pour monter la machine ultrason sur une machine de traction INSTRON. Le charge statique était appliqué sur les nodes des vibrations de la machine. Pour protéger de les modes de vibration un couche de la résine a été introduit dans la zone du contact.

Les échantillons. Le deux types des échantillons a été utilisé pour l'essai de fatigue gigacyclique en chargement longitudinal: l'éprouvette avec une filetage pour l'essai en traction-compression, Fig.12a et avec les deux filetages pour l'essai en traction-traction, Fig.12b. La géométrie des échantillon était dessiné pour chaque matériaux (forgé et extrudé) pour avoir une vibration naturel à la frequence d'operation de la machine.

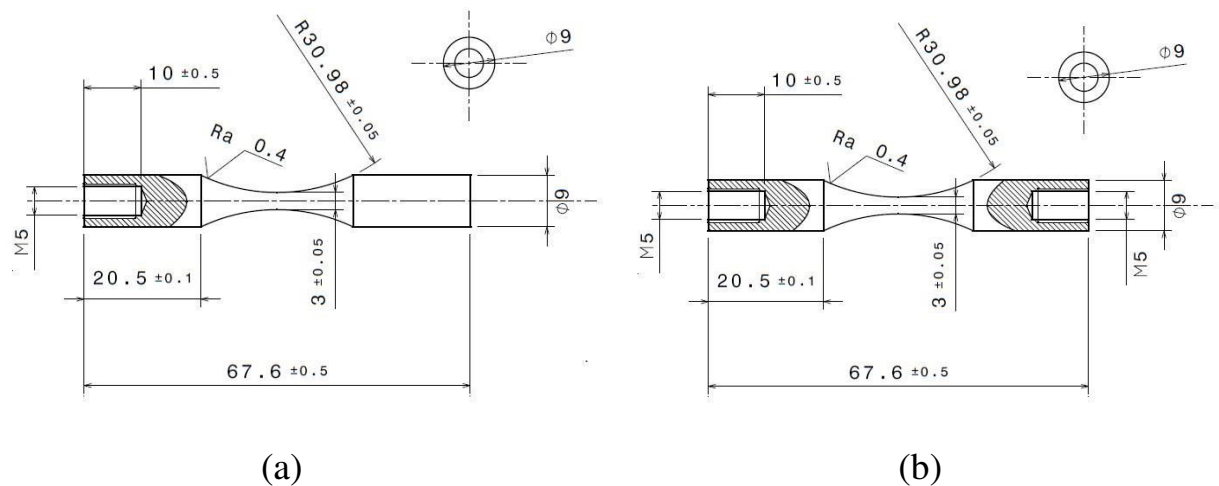


Fig.12. Les schemes des éprouvettes pour l'essai de la fatigue ultrason

Pour étudier l'anisotropie de la résistance de fatigue de l'alliage de titane VT3-1 forgé plusieurs jeux des échantillons a été fabriqué du le disque de compresseur. Ils sont étaient nommé: 0AXX (22 éprouvettes), 1AXX (10), 2RXX (8), 3RXX (7) et 4CXX (7). La total number des échantillons est 54. La nom est consiste de le numéro de jeux (0, 1, 2 et i.e.), la référence d'orientation de l'échantillon (A - axial,

R - radial et C - circumferential), Fig. 13 et le numéro de l'éprouvette (01, 02, ... XX).

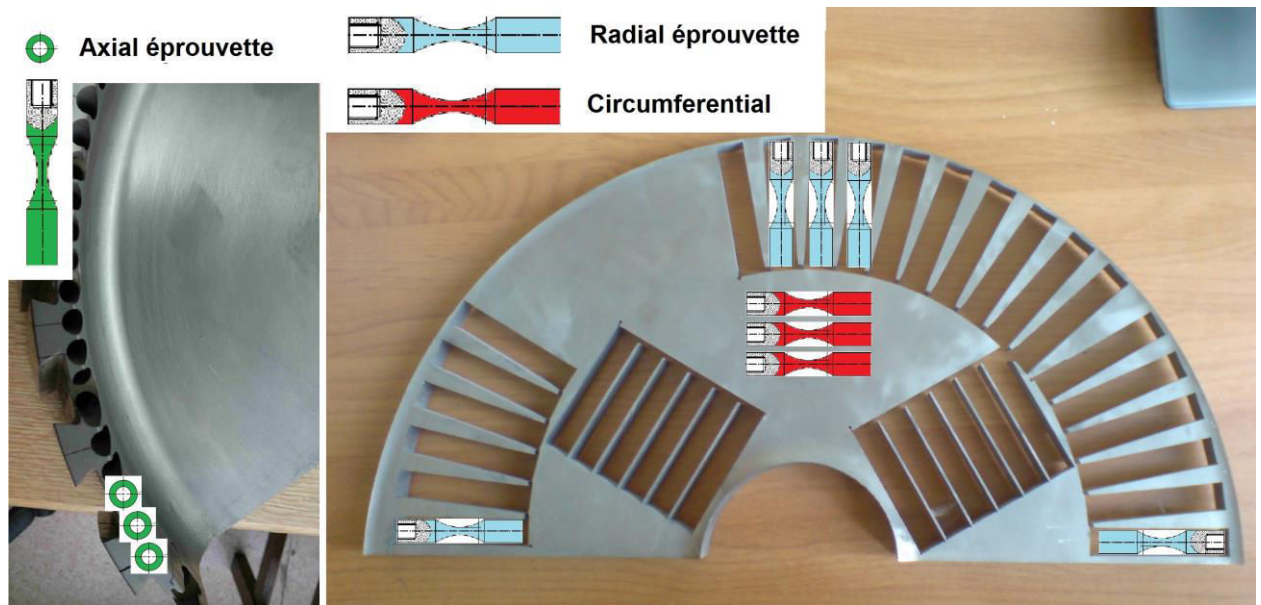


Fig.13. La position des échantillons dans un disque de le compresseur

Le plus grand jeux des échantillons (0AXX) a été dessiné pour l'étudier la résistance de fatigue générale de l'alliage de titane VT3-1 et la mécanisme d'amorçage d'une fissure en traction-compression ($R=-1$), Fig.12a. En suit, les jeux des échantillons 1AXX et 2RXX sont dessiné pour l'étudier un effet d'anisotropie. La géométrie (Fig.12a) et la régime de chargement sont la même pour le deux jeux des échantillons, la position dans le disque est différent, Fig.13. Pour étudier l'effet de la charge statique (la contrainte moyen) sur la propriété mécanique et la mécanisme d'amorçage d'une fissure de fatigue, les deux jeux des échantillons (2RXX, Fig.12a et 3RXX, Fig.12b) était utilisé. La position et l'orientation des éprouvettes sont la même (la plateau de le disque et l'orientation radial) mais les régimes de chargement sont different: $R=-1$ pour 2RXX et $R=0.1$ pour 3RXX. Au fin pour l'étudier l'anisotropie dans la plateau de le disque de compresseur les deux dernier jeux des échantillon était dessiné: 3RXX et 4CXX. La géométrie pour ces échantillons est la même (Fig.12b), la régime de chargement est aussi la même ($R=0.1$), la position est la même (la plateau de le disque), mais l'orientations sont different: radial pour 3RXX et circumferential pour 4CXX.

Donc, basé sur ces études la conclusion pour l'effet de la charge statique et l'anisotropie sur la propriété mécanique et le type de la mécanisme d'amorçage d'une fissure de fatigue peut être apportées.

Pour comparer les propriété mécanique de l'alliage de titane VT3-1 procédé en technique forgé et extrudé les trois jeux des échantillons était fabriqué à partir de la barres de titane extrude. La première jeu (R-1-Ext-XX) des éprouvettes est dessiné pour l'essai en régime traction-compression ($R=-1$), la géométrie est présenté sur la Fig.12a. Les deux jeux des échantillons supplémentaire (R01-Ext-XX et R05-Ext-XX) sont dessiné pour l'essai avec le chargement statique, Fig.12b, ($R=0.1$ et $R=0.5$ respectivement). La comparaison des propriété mécanique et les mécanismes d'amorçage est peut être effectué basé sur les resultats des essai en régimes de $R=-1$ et $R=0.1$. Les résultats d'essai avec $R=0.5$ sont utilisés pour tracer la tendance résistance de fatigue de l'alliage de titane VT3-1 sous la rapport de contrainte élevé.

Les résultats des essais

L'

L'essai sur l'alliage de titane forgé a été effectué à la temperature et sous le niveau de contrainte autour de 'la limite de fatigue' classique. Le premier résultats sont obtenu sur la jeux des échantillon 0AXX en traction-compression. Les résultats d'essai sont présenté sur la Fig.14. La caractéristique particularité des résultats sur l'alliage de titane VT3-1 est la dispersion grave de la durée de la vie. Sous le certain niveau de contrainte ce dispersion atteindre le trois ordres de grandeur. Pour Pour étudier la dispersion les surfaces de fissure sont observé par microscopie électronique à balayage (MEB).

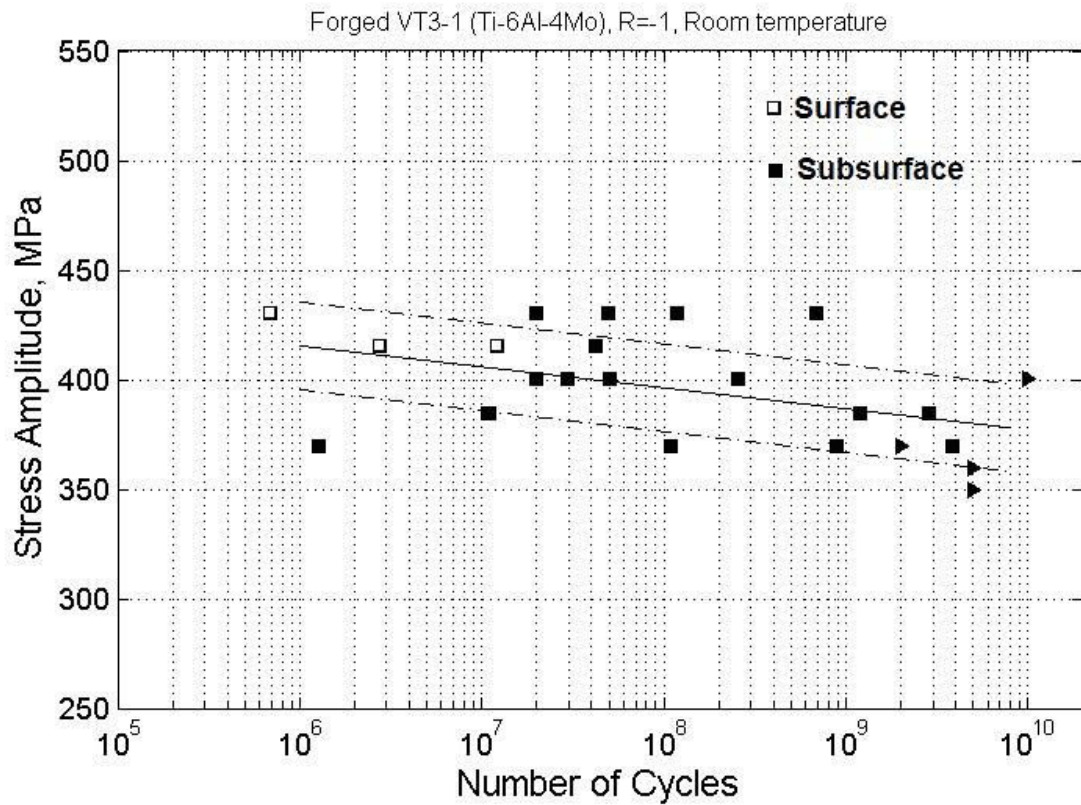
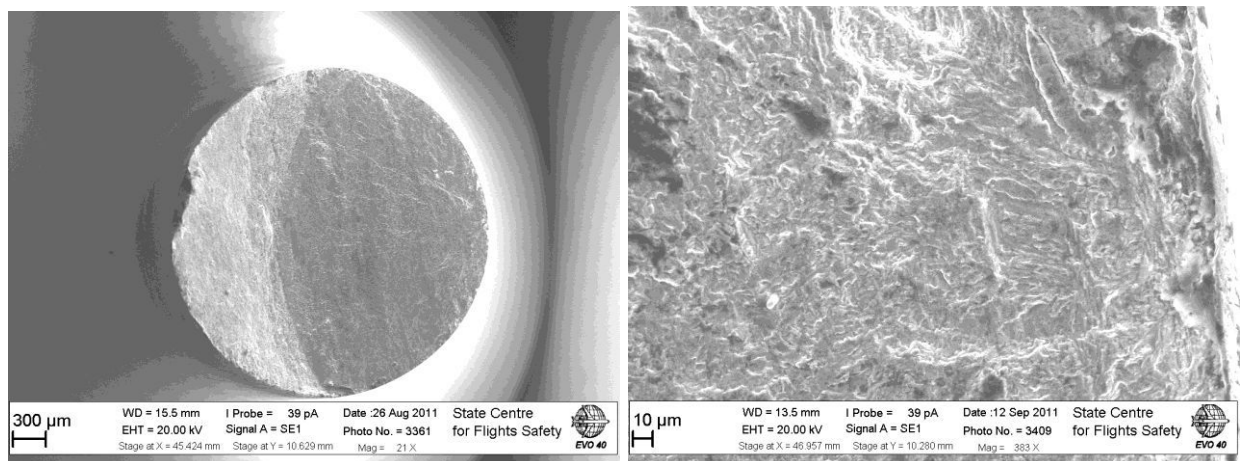


Fig.14. Les résultats d'essai de fatigue sur l'alliage de titane VT3-1 forgé, R=-1

L'analyse de la surface de fissure était montré la changement dans la mécanisme d'amorçage d'une fissure. Sous le niveau de contrainte élevé l'amorçage se produit par la surface d'échantillon, Fig.14 et 15. Typiquement, la durée de la vie est plus courte pour l'initiation surfacique par rapport d'autres échantillons.



(a)

(b)

Fig.15. L'amorçage de la fissure surfacique dans l'alliage de titane VT3-1,

$$\sigma_a = 415 \text{ MPa}, N_f = 1.2 \times 10^7 \text{ Cycles}$$

Sous le niveau de contrainte plus bas, l'amorçage de fissure se produit à l'intérieur de l'échantillon et associé à un défaut de la microstructure. C'était trouvé comment sous le même niveau de contrainte la durée de la vie était plus courte pour l'échantillon dans laquelle l'amorçage se produit à cause de l'agglomération des plaquettes de la phase alpha rugueuse, Fig.16.

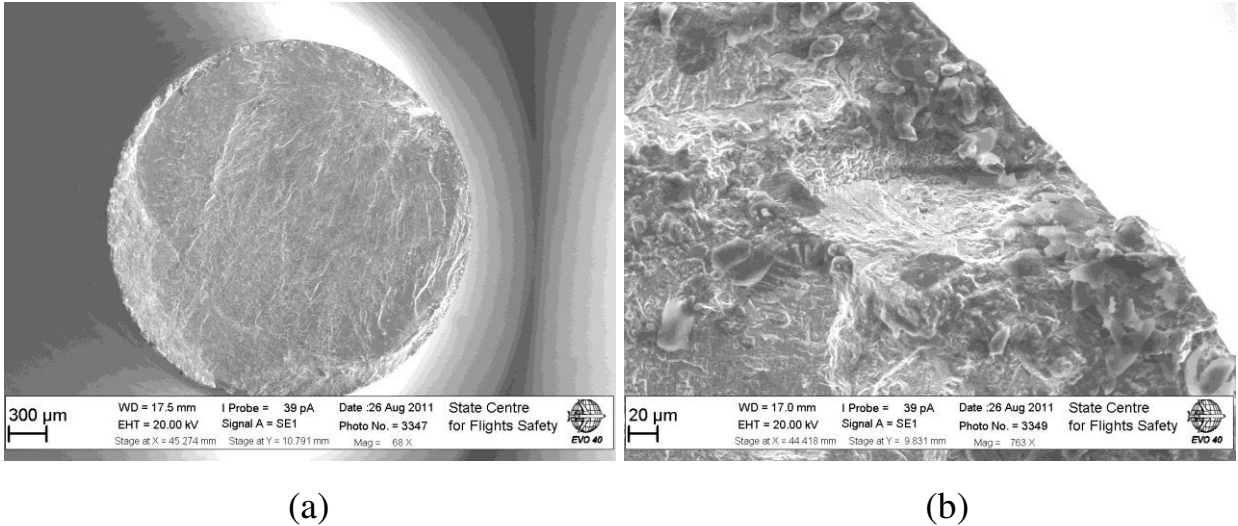


Fig.16. L'amorçage de la fissure se produit à cause de l'agglomération des plaquettes de la phase alpha rugueuse, $\sigma_a = 400 \text{ MPa}$ $N_f = 2.98 \times 10^7 \text{ Cycles}$

En ce cas l'amorçage de fissure est associé avec le clivage de l'agglomération. Un autre type de défauts laquelle est aussi la cause d'amorçage de fissure tôt sont les macro-zones, Fig.17.

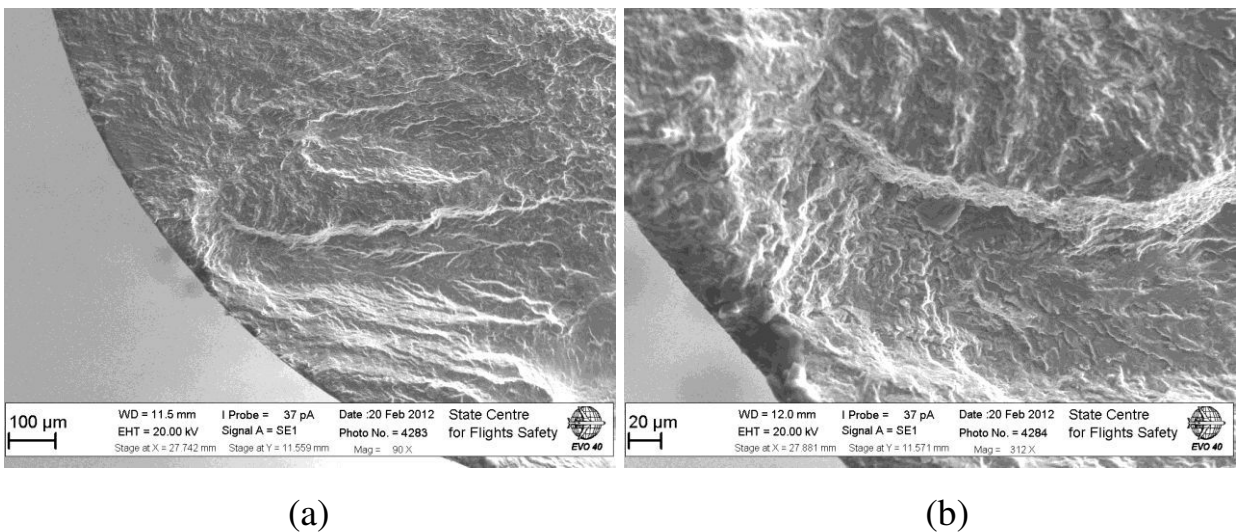


Fig.17. L'amorçage de la fissure à cause de la macro-zone, $\sigma_a = 385 \text{ MPa}$, $N_f = 1.08 \times 10^7 \text{ Cycles}$

En cas de l'amorçage de la fissure par la macro-zone la mécanisme est associé à l'accumulation d'endommagement par la fatigue sur la bord de la macro-zone. Probablement l'accumulation est plus intense entre les deux macro-zones avec le misorientation grave. L'analyse l'EBSD sur l'alliage de titane VT3-1, Fig.18 a été montré l'existance du macro-zones dans l'alliage avec misorientation jusqu'à 80 degré.

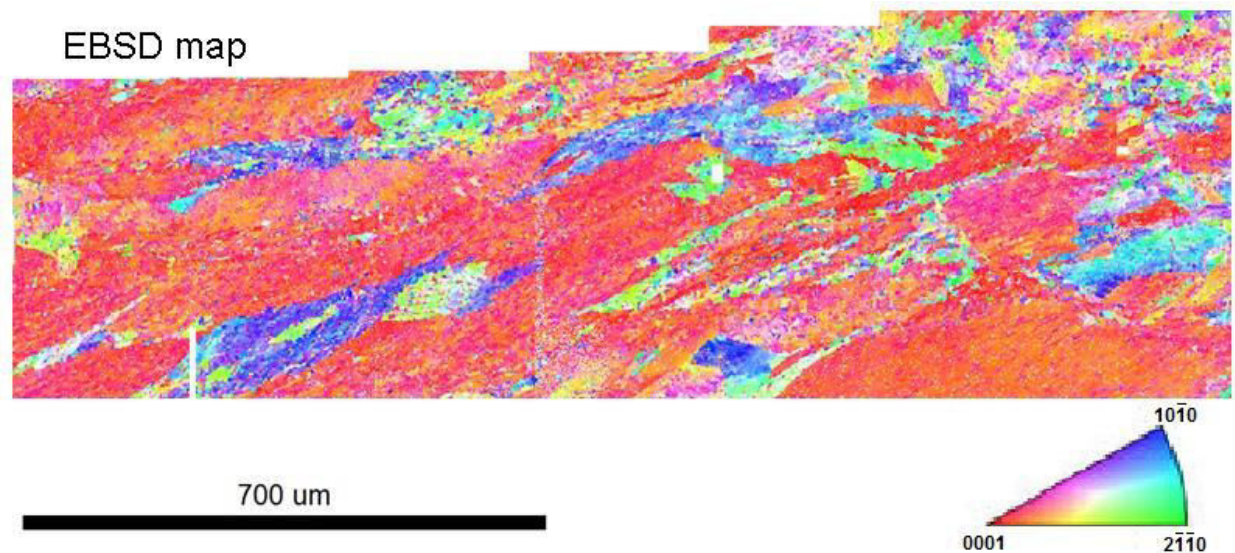
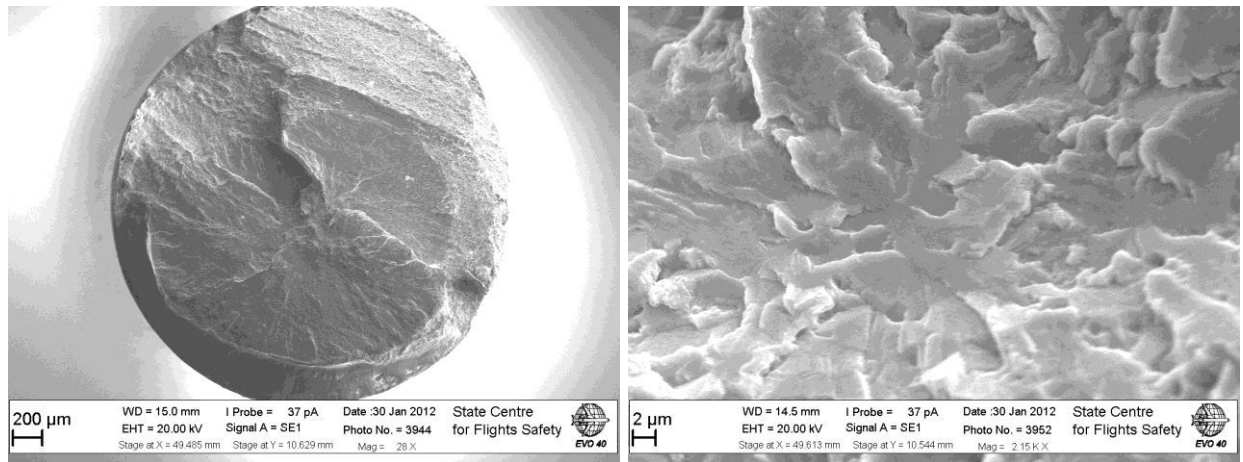


Fig.18. L'analyse l'EBDS sur l'alliage de titane VT3-1 forgé

L'amorçage de la fissure dans un alliage de titane par les bords de la hétérogénéité de la microstructure est typique pour la chargement repetative sous l'amplitude bas. En cas de le titane forgé la taille et la misorientation des macro-zones sont très varié que produit la dispertion grave de la durée de la vie comme même entre les resultats avec la même type d'initiation de fissure. La plus courte durée de la vie pour l'échantillon amorçé par le macro-zone est 10^7 cycles, tandis que plus long est 10^9 cycles. Le moyen durée de la vie avec l'amorçage de fissure par la macro-zone est 3 - 4 fois 10^7 cycles.

Quand la durée de la vie est plus long que 10^8 cycles, l'amorçage de la fissure est typiquement produit par la particularité de la microstructure avec la taille caractéristique est beaucoup plus petit par rapport de la taille de la macro-zone, Fig. 19. En ce cas la facettes fragile sont se trouve dans le site d'initiation de une fissure de fatigue. La taille caractéristique de ces facettes est varié entre 1-2 et

5-10 micromètres. La morphologie n'est pas la même pour ces facetts: les plus petite facetts sont plus platn, Fig. 19; les plus grande (5-10 micromètres) facetts sont plus rayée, Fig.20.

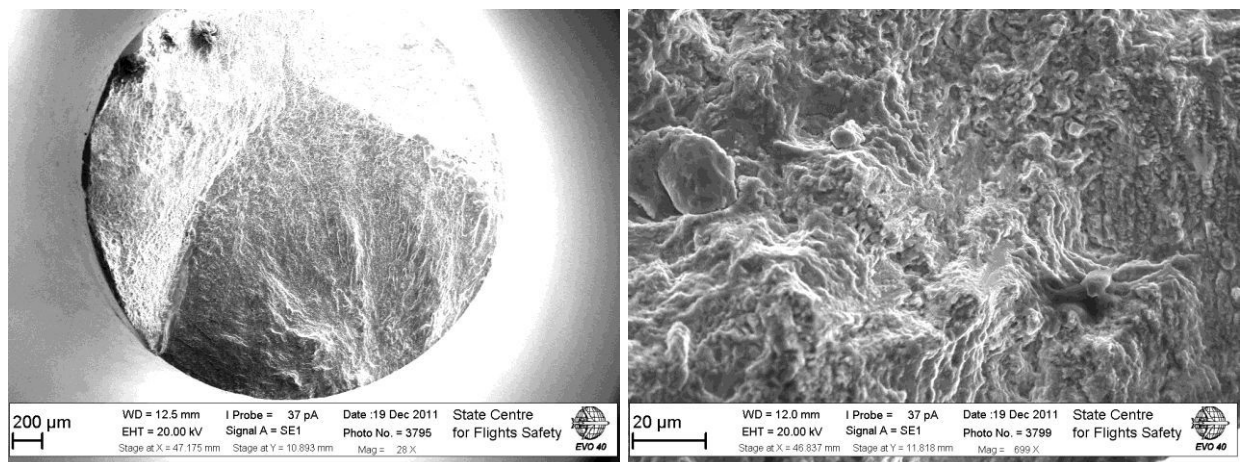


(a)

(b)

Fig. 19. L'amorçage de la fissure de fatigue avec formation de la facette fragile

$$\sigma_a = 430 \text{ MPa} , N_f = 1.18 \times 10^8 \text{ Cycles}$$



(a)

(b)

Fig. 20. L'amorçage de la fissure de fatigue avec formation de la facette

$$\sigma_a = 385 \text{ MPa} , N_f = 2.85 \times 10^9 \text{ Cycles}$$

L'amorçage avec la formation de la facette fragile, Fig.19, est bien connu dans le literature comme l'amorçage de la fissure de fatigue à la très grand numero des cycles. Ce type d'initiation a été explique par le clivage de la phase alpha par un plan de base de hcp. La facette présentée sur la Fig.19 est un grain de la phase

alpha. Les mêmes facettes étaient trouvées dans les échantillons fissurés entre 10^8 et 10^{10} cycles. D'autre type de facettes a été trouvé à la durée de la vie bien après de 10^9 cycles. Pour l'étudier la nature de ces facettes l'EDX analyse a été utilisée pour déterminer la composition chimique de ce objet. Le résultats sont montrés perturbations graves dans la composition chimique par rapport de la composition normale, Fig.21.

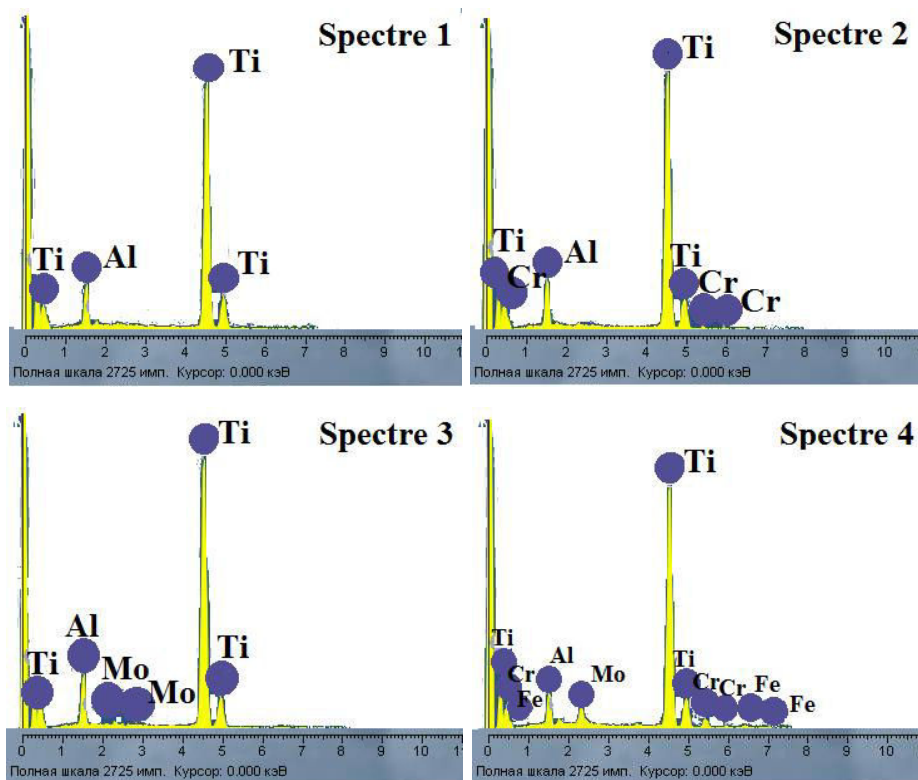
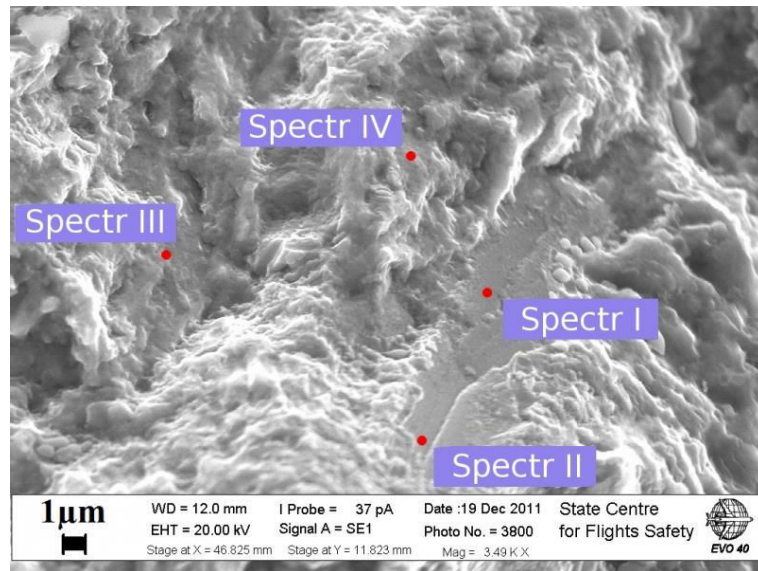


Fig.21. L'analyse de la composition chimique sur une facette fissure

Il montre que la concentration de l'aluminium est élevée à l'intérieur de la facette, tandis que la concentration de molybdène est très faible (non détectables). La concentration de molybdène est normale autour de ce facette. Ainsi, cet objet est une (ou plusieurs) plaquette de la phase alpha fissuré en la face de la direction d'allongement. Cette déclaration est confirmée par l'analyse de la microstructure et l'EDX analyse, Fig.22.

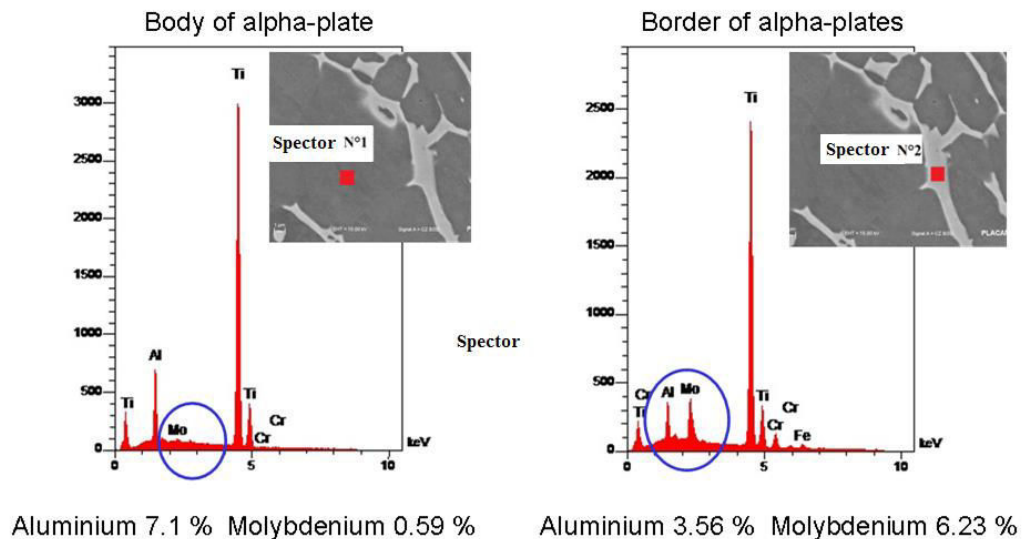


Fig.22. L'analyse EDX sur l'échantillon poli de l'alliage de titane forgé

L'étude sur la composition chimique dans la phase alpha et beta a été montrée la même tendance dans la distribution des éléments. La concentration de molybdène est très basse dans la plaquette de la phase alpha.

Résumant l'étude sur la résistance de la fatigue de l'alliage de titane VT3-1 en régime Gigacyclique les résultats suivants peuvent être notés: (1) La course de la courbe de fatigue montre une ligne inclinée après 10^6 cycles. La différence entre la résistance de fatigue à 10^6 est 10^9 cycles atteindre 60 MPa; (2) Il y a un changement de la mécanique d'amorçage de la fissure de fatigue dans l'alliage de titane VT3-1 forgé. Sous l'amplitude de contrainte élevée il y a l'initiation surfacique, par contre sous l'amplitude basse, il y a l'amorçage à l'intérieur de l'échantillon; (3) La dispersion de la durée de la vie est grave dans le régime gigacyclique pour l'alliage de titane VT3-1. Sous certains niveaux de contrainte la dispersion atteint trois ordres de grandeur; (4) Plusieurs mécanismes d'amorçage

d'une fissure de fatigue a été trouvé dans l'alliage de titane VT3-1 sur la chargement gigacyclique. Il semble que ces mécanismes sont responsable pour la difference dans la durée de la vie. Les résultat de l'essai de fatigue peut etre présenté dans le graph où chaque mécanisme est remarque, Fig.23.

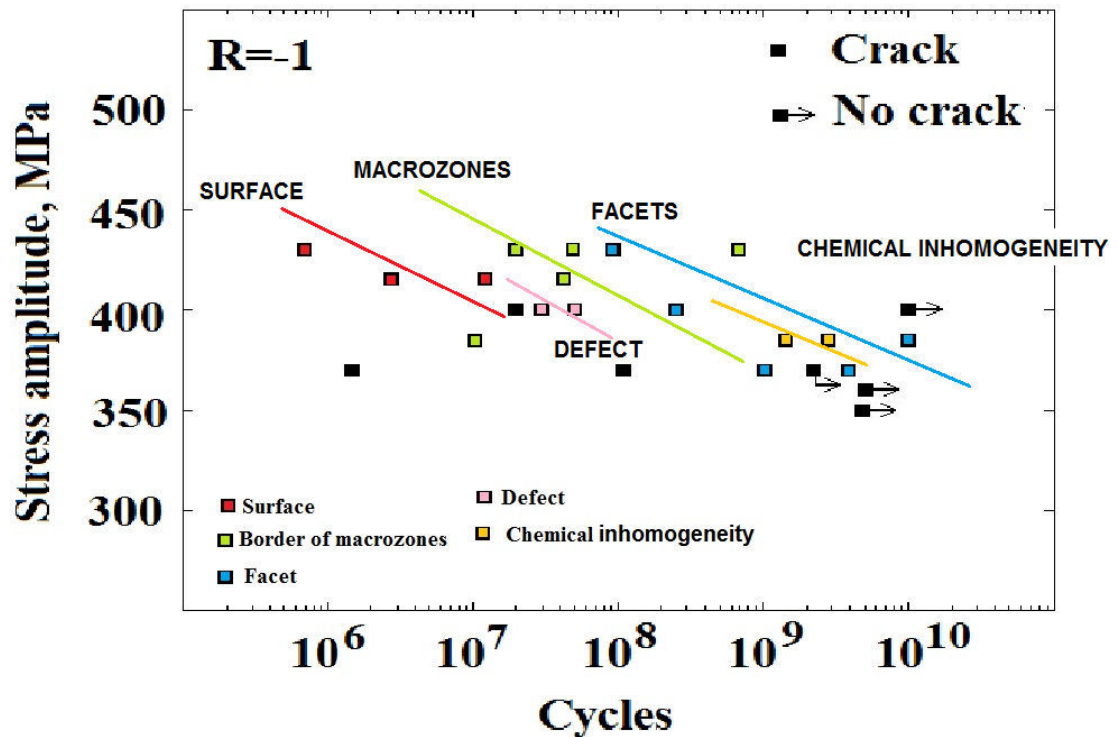


Fig.23. Les résultats d'essai de fatigue pour l'alliage de titane VT3-1 forgé avec la mécanisme trouvé d'amorçage de fissure.

La durée de la vie est depend de le type de la defect laquelle va placé dans une zone avec la chargement critique. L'agglomeration de les plaquettes de la phase alpha et macro-zones sont réduit la durée de la vie.

L'Anisotropie de la propriété mécanique

Pour étudier l'anisotropie d'un alliage de titane VT3-1 forgé les deux types de chargements a été utilisé. La première est la régime de traction-compression, $R=-1$ (jeux 1AXX et 2RXX). Le deuxième est la régime de traction-traction, $R=0.1$ (jeux 3RXX et 4CXX). Les résultats sont présenté sur la Fig.24 et 25 pour $R=-1$ tests et $R=0.1$ respectivement.

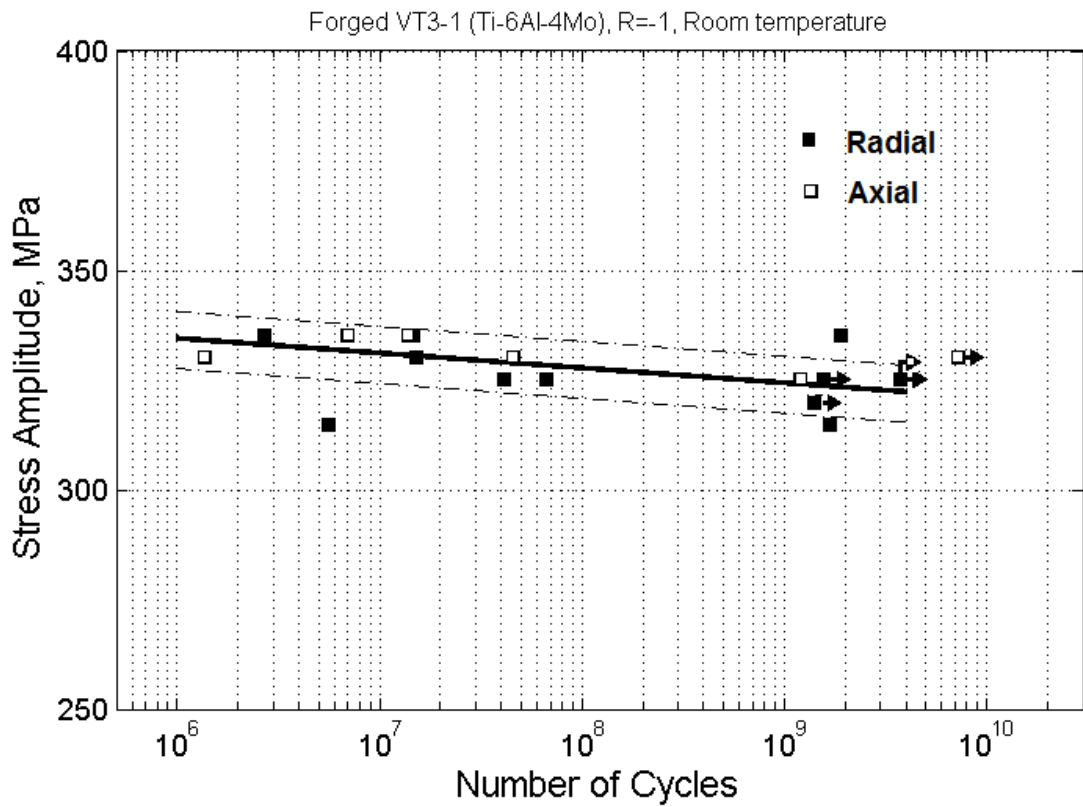


Fig.24. Les résultats d'essai de fatigue sous le chargement en traction-compression

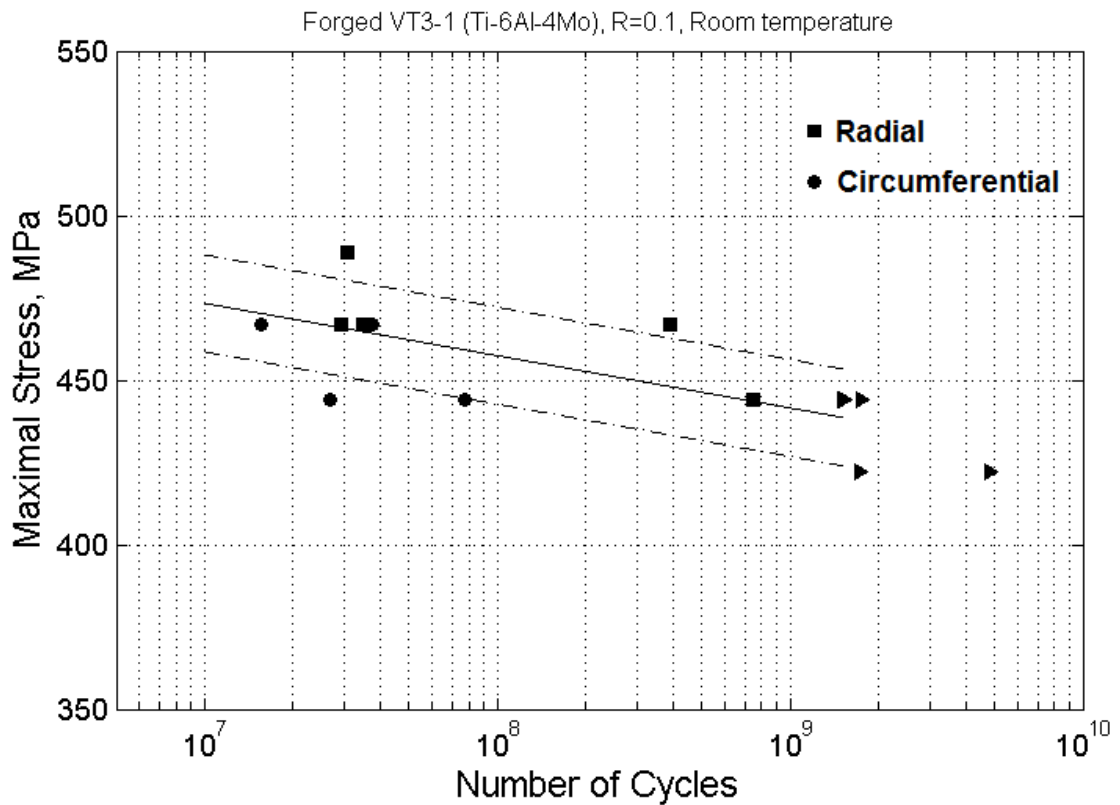


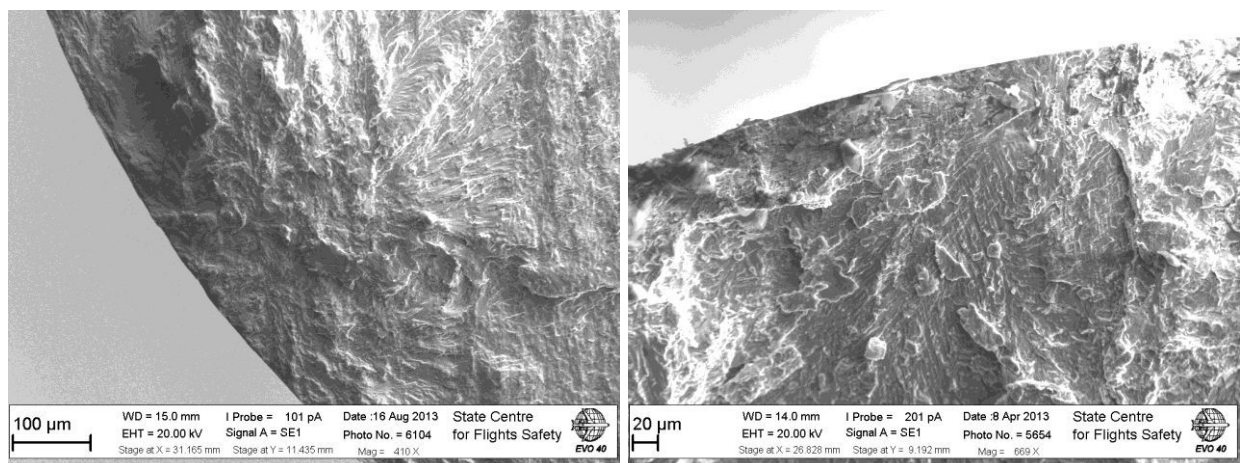
Fig.25. Les résultats d'essai de fatigue sous le chargement en traction-traction

Les résultats d'essai sous la chargement de la traction-compression sont très proche et l'effect de l'orientation n'était pas trouvé. Probablement à cause très fin microstructure et plusieurs orientation de la macro-zones l'effect d'anisotropie est disparu comment dans le cas de polycristallin. En cas de les résultats de l'essai en traction-traction, le léger effect d'orientation peuvent être distinguer. La propriété mécanique est en peu plus bas pour les échantillons coupé dans la direction circumferential. Mais comme même les résultats sont très proche et la difference ne vont pas au-delà de l'erreur.

L'anisotropie dans la résistance de fatigue n'était pas trouvé ni entre les échantillons coupé à partir du la jante et plateau de le dusque, ni entre les échantillons coupé à partir du la plateau en deux directions different.

L'effet de la contrainte moyenne

Pour étudier l'effet de la contrainte moyenne sur la mécanisme de l'amorçage de la fissure les deux jeux des échantillons a été utilisé (2RXX et 3RXX). L'échantillons était coupé dans la même direction (Radial) à partir de la plateau de le disque de compresseur. Le résultats sont présenté sur la Fig. 24 et 25 respectivement. Les mécanismes d'amorçage de la fissure était étudié avec MEB. Les résultats montrent le plus important role de la macro-zone dans l'accomadation de l'endommagement de fatigue, fig.26.



Lig.26. Les typique sites de l'amorçage de fissure (a) chargement $R=-1$, (b) $R=0.1$

En cas de la chargement en cours inversée (R1) la surface de fissure est typiquement présenté une mécanisme déjà trouvé pour cet alliage (voire Les mécanismes d'amorçage de la fissure dans VT3-1 forgé). En cas de la chargement en régime de traction-traction, la surface de fissure montrer les grande zones de la fissure fragile, Fig. 26b. Chaque fois l'amorçage était produit par le bord de macro-zone. L'analyse de la morphologie de la zone de la propagation de fissure était montré, que la fissure souvent passé par le bord de macro-zone.

Le mécanisme de l'initiation et propagation d'une fissure de fatigue dans l'alliage VT3-1 forgé sont déterminé par la morphologie, orientation et taille de la macro-zone en présence de la contrainte statique positive.

La fatigue gigacyclique dans l'alliage de titane VT3-1 extrudé

Les trois type d'essai a été réalisé sur l'alliage de titane extrudé: (1) traction-compression $R=-1$; (2) traction-traction $R=0.1$ et (3) traction-traction $R=0.5$. Les résultats sont présentés sur les Fig.27 - 29.

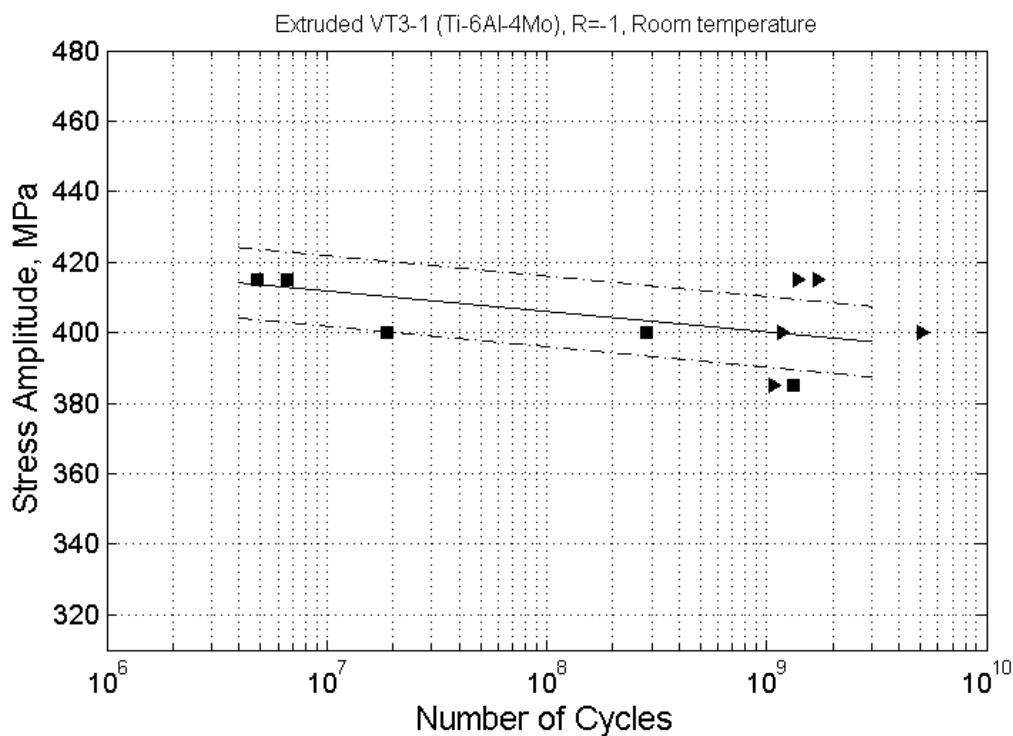


Fig.27. Les résultats d'essai de fatigue sur l'alliage VT3-1 extrudé, $R=-1$

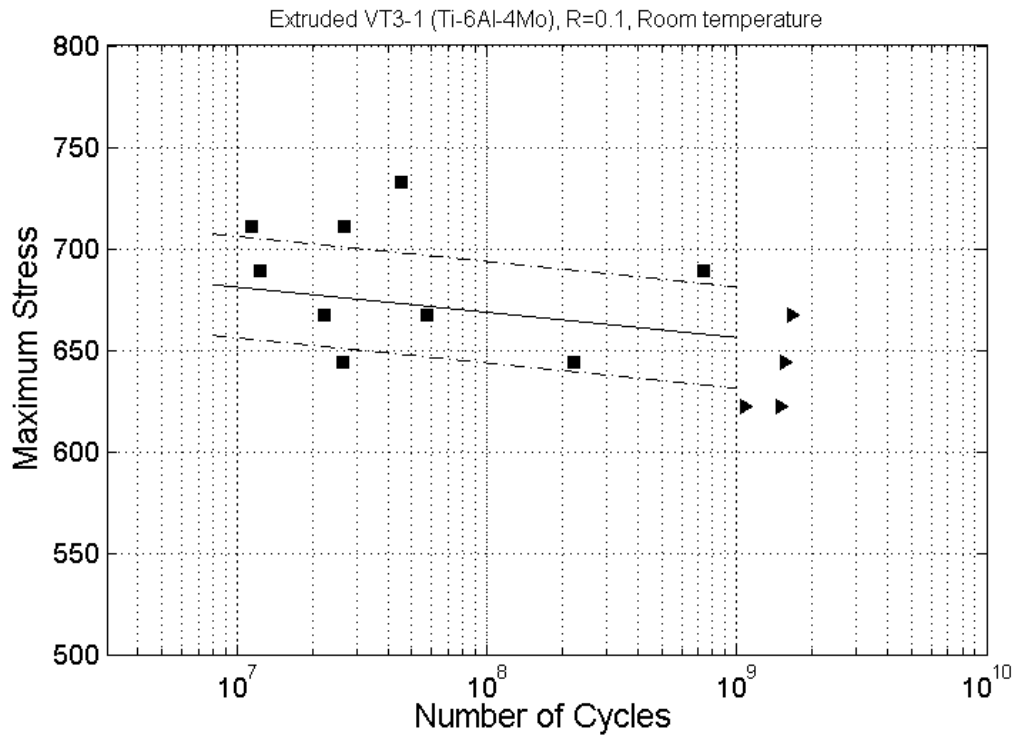


Fig.28. Les résultats d'essai de fatigue sur l'alliage VT3-1 extrudé, R=0.1

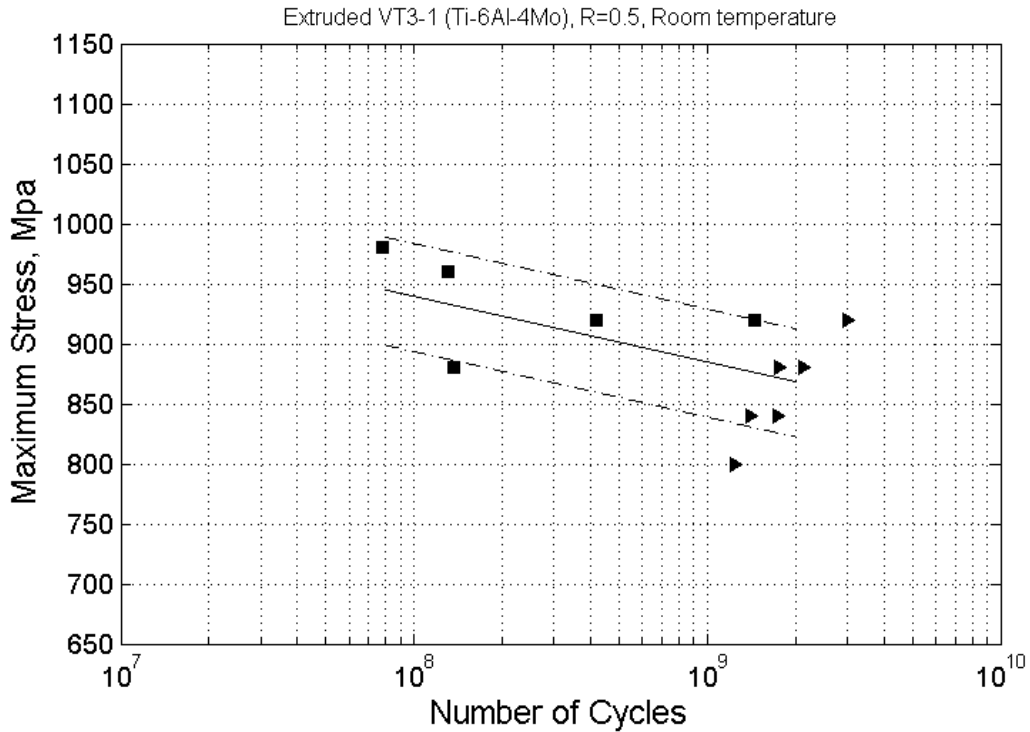
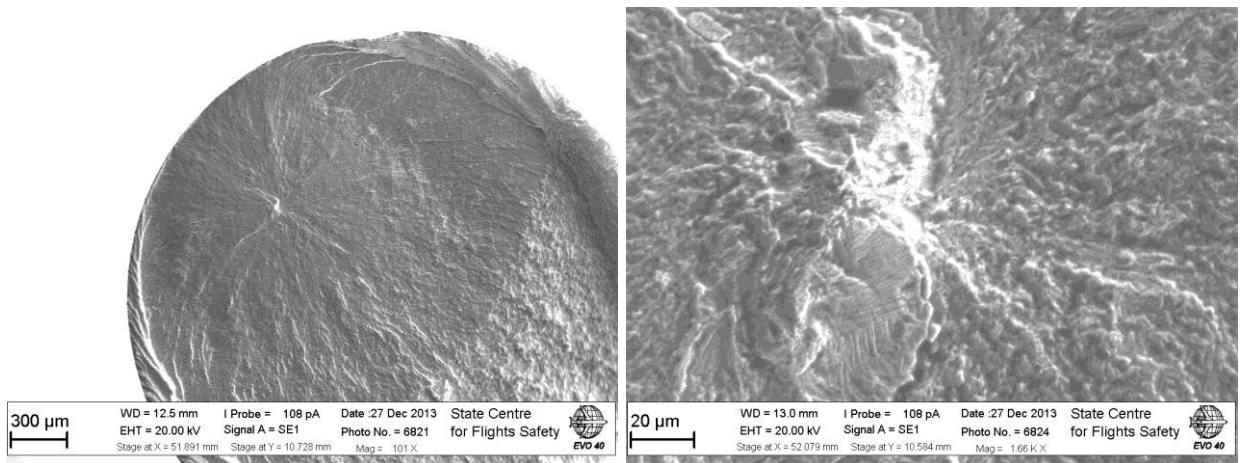


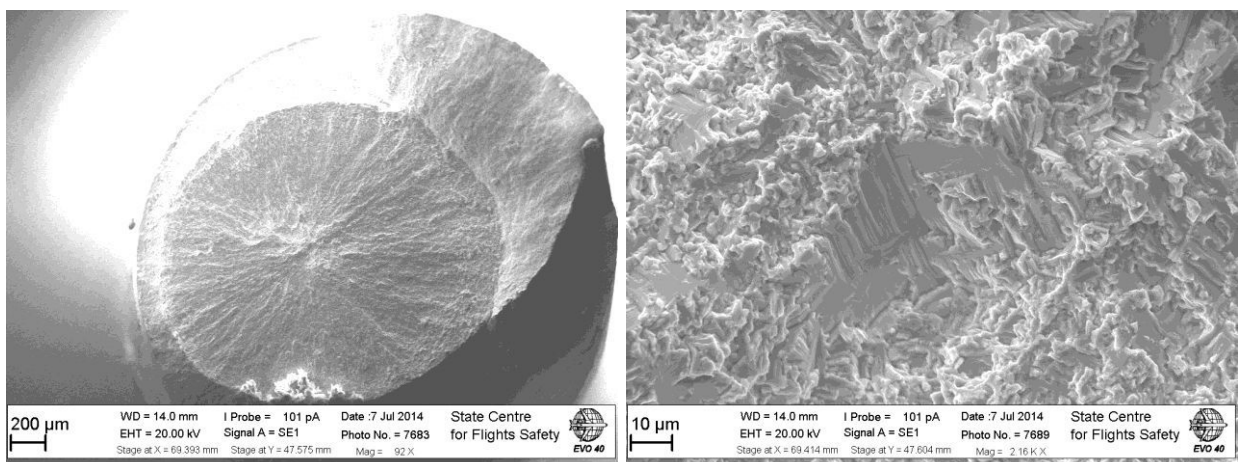
Fig.29. Les résultats d'essai de fatigue sur l'alliage VT3-1 extrudé, R=0.5

L'analyse sur la surface de fissure était montrée le même type d'amorçage de fissure pour chaque régime de chargement et pour toute la durée de la vie. L'initiation de la fissure de fatigue est associée avec le défaut de la microstructure présente sur la Fig. 6. C'est l'agglomération des plaquettes de la phase alpha dans un grain beta primaire. La fissure se produit sur la facette quasi-fragile dans le site d'amorçage. Les exemples des sites d'initiation dans les régimes de chargement différents sont présentés sur la Fig.30.

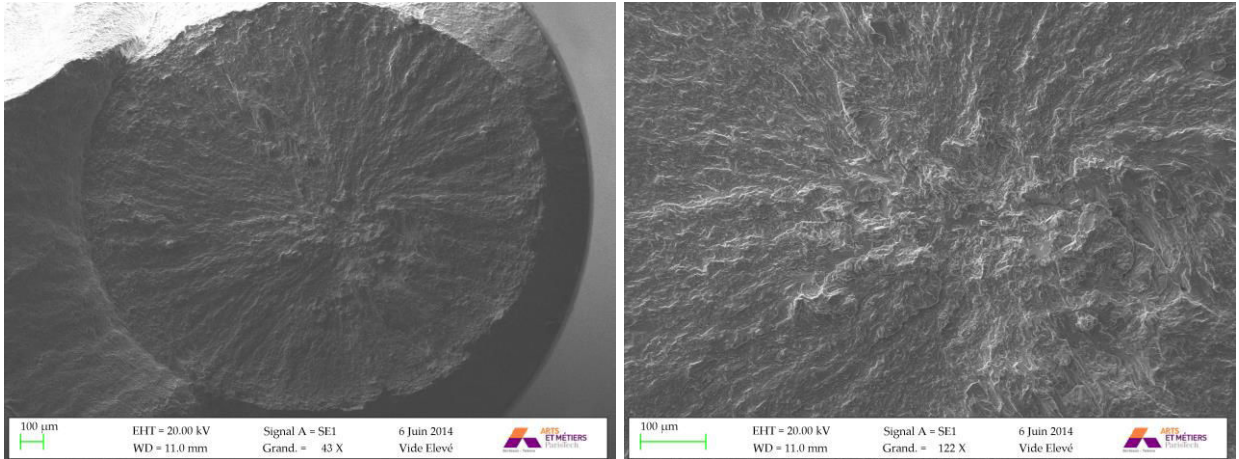
Tous les échantillons investigués ont montré l'amorçage de fissure à l'intérieur de l'échantillon. Donc, le défaut de la microstructure est le paramètre de commande de vie pour le titane extrudé. La facette est toujours fissurée à la face laquelle a l'angle par rapport de l'axe de chargement. C'est pour ça que la surface de fissure de le titane extrudé souvent montre les ailes de papillon, Fig.31. Ce type de la surface de fissure est ressemblable à la fissuration dans l'acier. Mais en cas de le titane ce phénomène a la nature mécanique et n'est pas associé par la métallurgie.



L'essai de traction-compression, $R=-1$

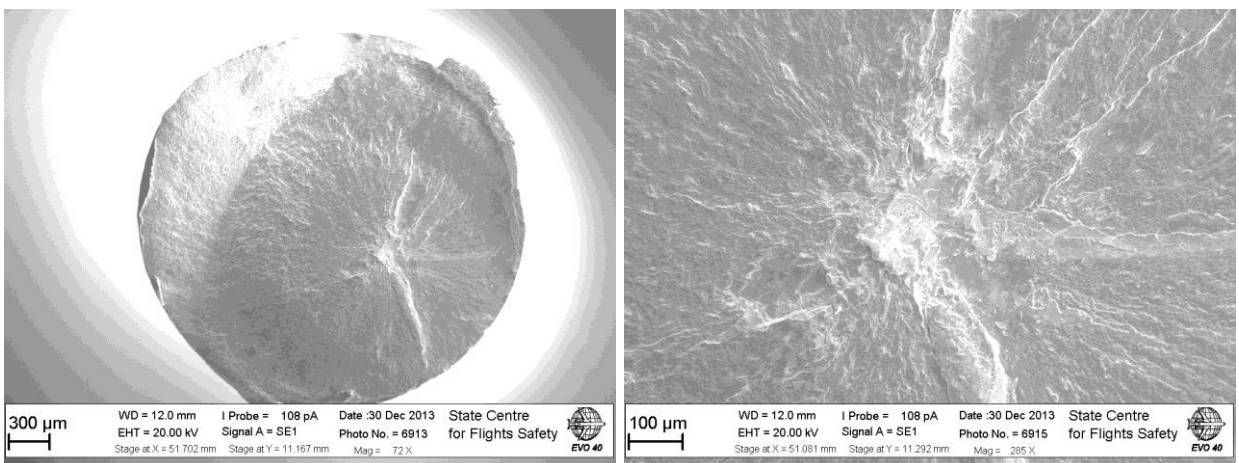


L'essai de traction-traction, R=0.1



L'essai de traction-traction, R=0.5

Fig.30. Les sites d'amorçage de la fissure de fatigue dans l'alliage de titane VT3-1 extrudé sous le régimes de chargements different



(a)

(b)

Fig.31. Les ailes de papillon dans l'alliage de titane VT3-1 extrudé

La propriété mécanique de le titane extrudé est plus haut par rapport de le titane forge. Le titane extrude ne content pas les macro-zones et ses résistance de fatigue sous la charge statique est beaucoup mieux par rapport à le titane forge. L'amorçage est toujours la même et associé à le clivage de l'agglomeration des plaquettes de la phase alpha.

La torsion

Le dernier projet réalisé dans ce thèse est la création de une machine nouveau pour l'essai gigacyclique en torsion pure. La machine dessiné a été basé sur une transducer de torsion que est activé par signal sinusoidal électrique a la fréquence de 20 kHz. Ce projet est confidentielle et just les concept général va discuté dans ce resumé. L'aperçu de la machine est représenté sur la Fig.32.

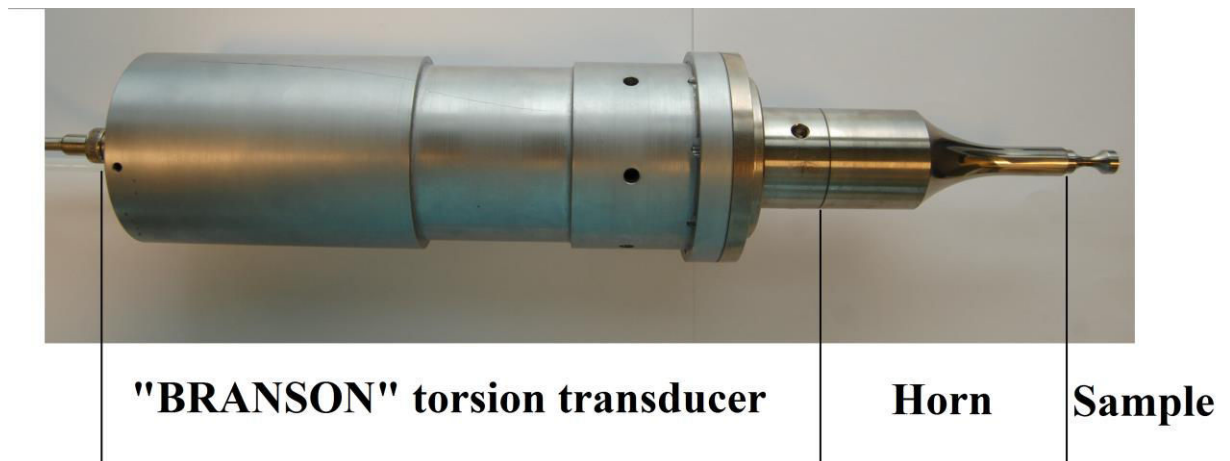


Fig.32. L'aperçu de la machine gigacyclique pour la torsion

La machine se compose de transducteur piézoélectrique, sonotrode et l'échantillon. La transducteur est activé par le signal que vient de la generateur ultrasonor. Ce générateur est piloté par l'ordinateur et la logicielle speciaux. Toute la système est fonctionné à la fréquence naturel de 20 kHz. La régime de fonctionnement est continu (sans pauses). Le refroidissement de l'échantillon pendant l'essai de fatigue est réalisé par l'air comprimé. La machine est dessiné pour s'arrêter automatiquement en cas de la sauter de la fréquence.

La premier l'essai de la machine de torsion a été effectué sur l'alliage de titane forgé. La géometrie de l'échantillon est présenté sur la Fig.33. Le deuxième l'essai a été réalisé sur l'alliage de titane extrudé. Tous les deux essai a été bien fait et les résultats sont présenté sur la Fig.34. Toute les échantillons a été cassé par une fissure de fatigue orienté à 45° par rapport à l'axe de chargement. L'analysis de la surface de fissure est montre le deux type d'amorçage pour l'alliage de titane

VT3-1. Les fissures surfacique et subsurfacique a été trouvé dans l'alliage VT3-1 forgé et extrude après très grand number des cycles, Fig.35 - 38.

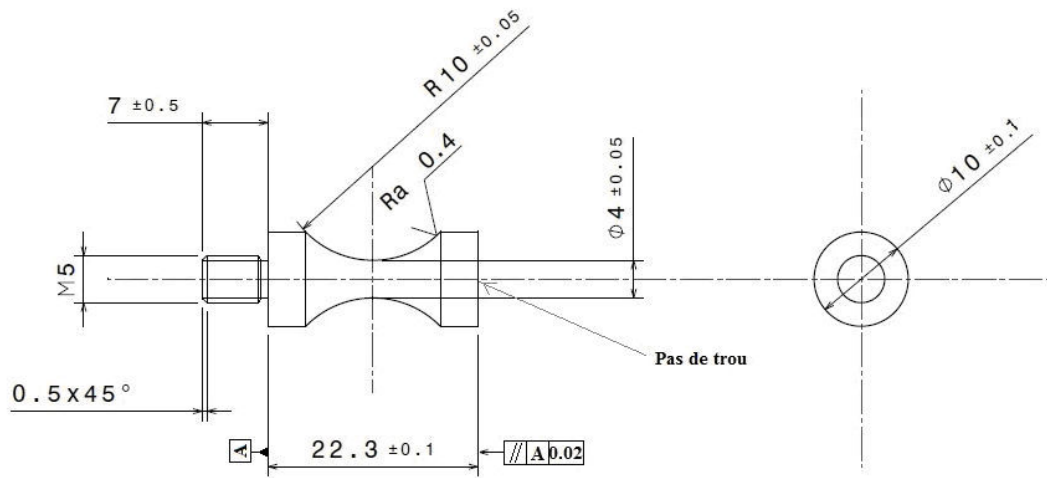


Fig.33. La géométrie de l'échantillon pour l'essai de torsion

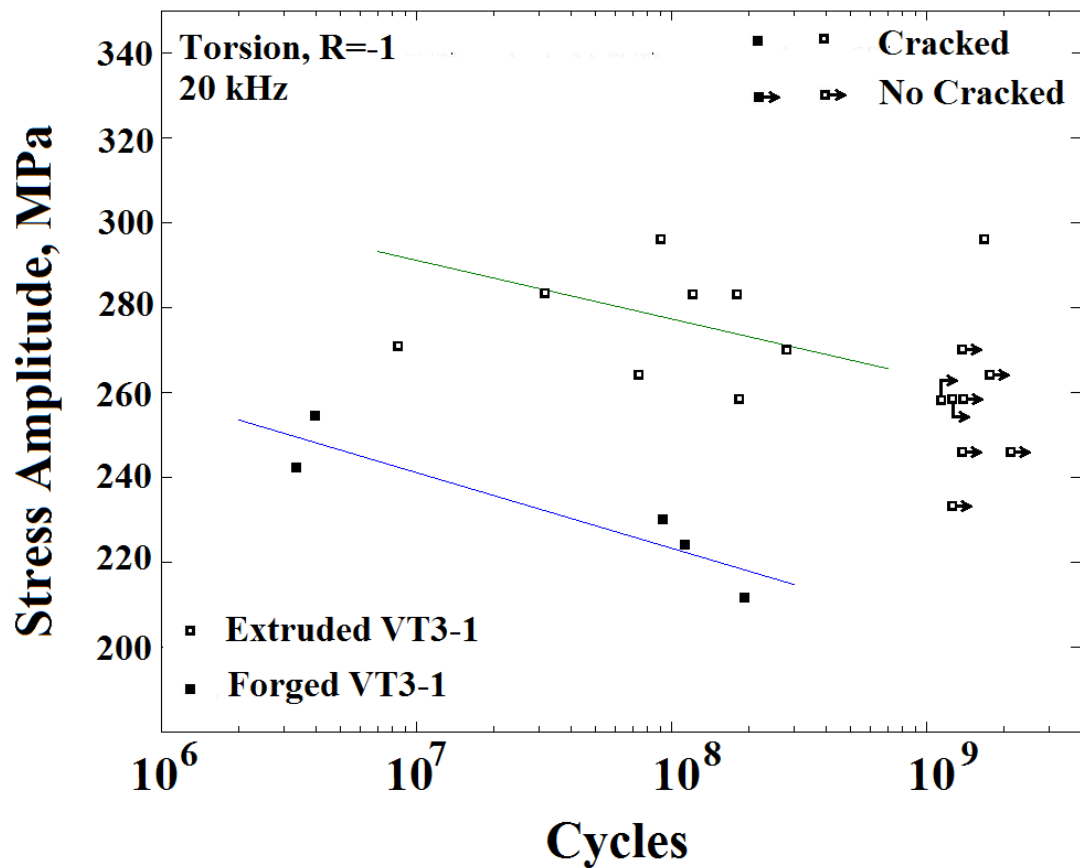


Fig.34. Les résultats de l'essai sous le chargement de torsion ultrason (l'alliage de titane VT3-1)

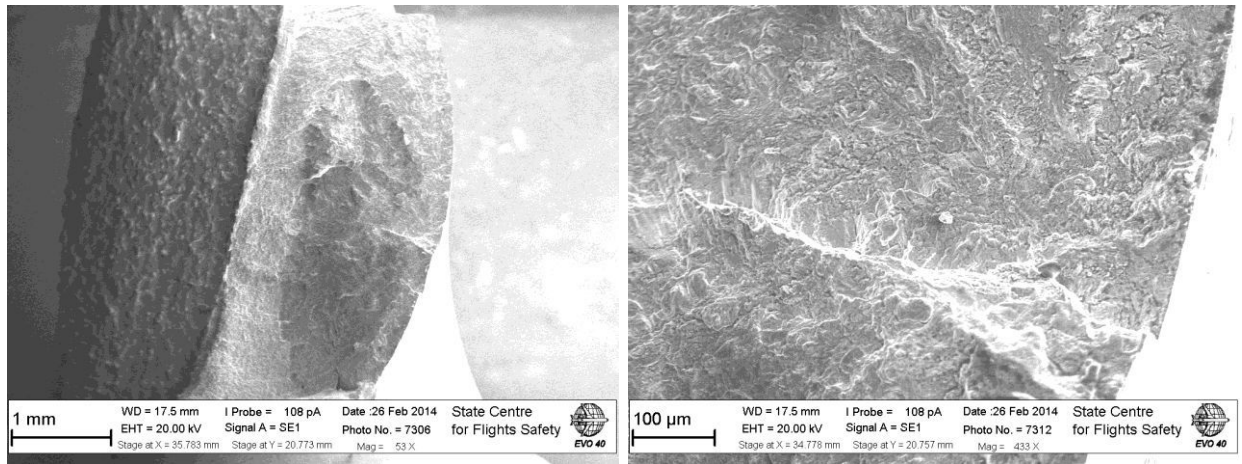


Fig. 35. La fissure superficielle dans l'alliage VT3-1 forgé en torsion

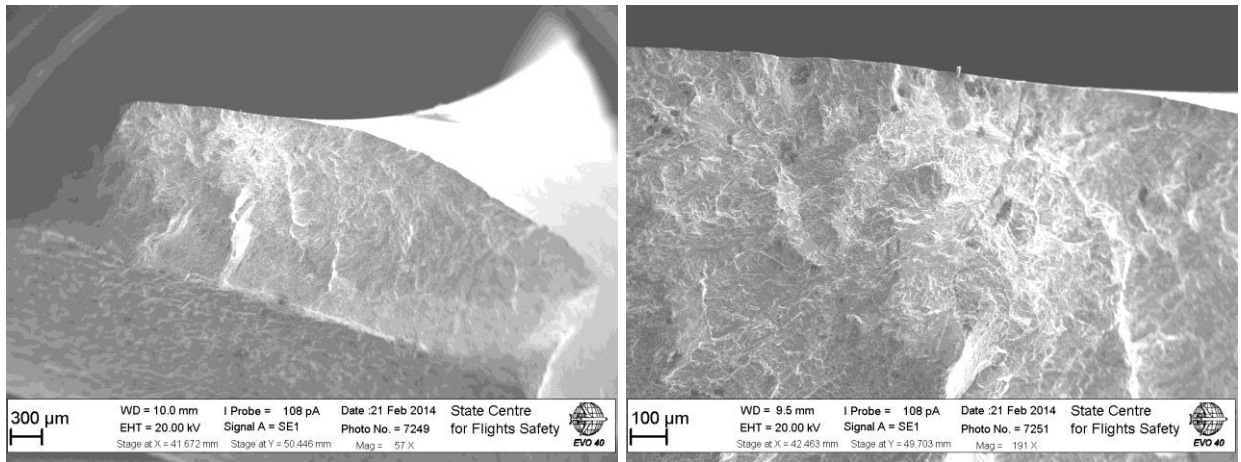


Fig. 36. La fissure subsurface dans l'alliage VT3-1 forgé en torsion

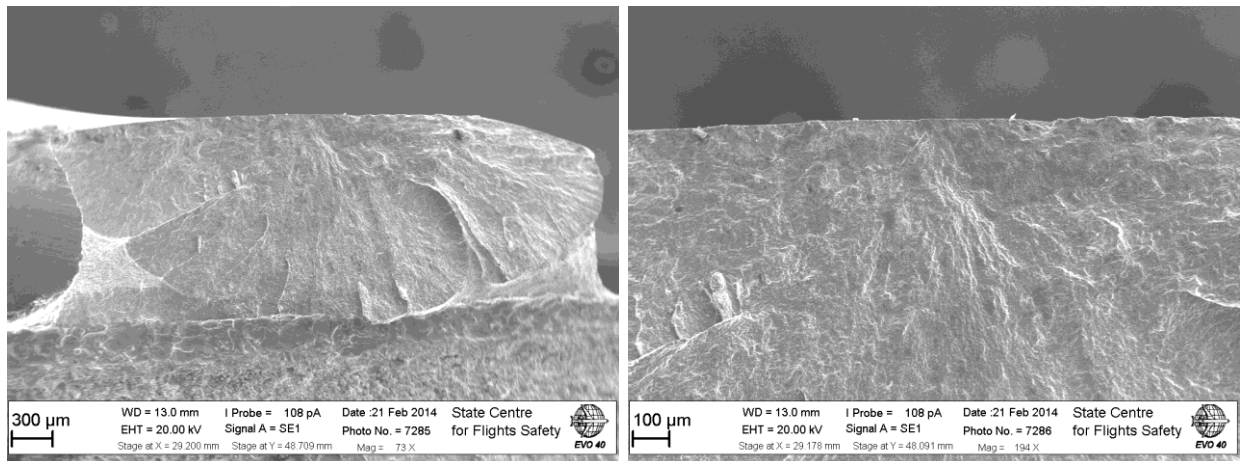


Fig. 37. La fissure superficielle dans l'alliage VT3-1 extrudé en torsion

L'initiation de la fissure de fatigue en torsion à l'intérieur de l'échantillon n'est pas typique et pour le titane VT3-1 a été montré pour la première fois. Probablement *c'est la premier résultat de l'essai ultrason en torsion sur l'alliage de titane.*

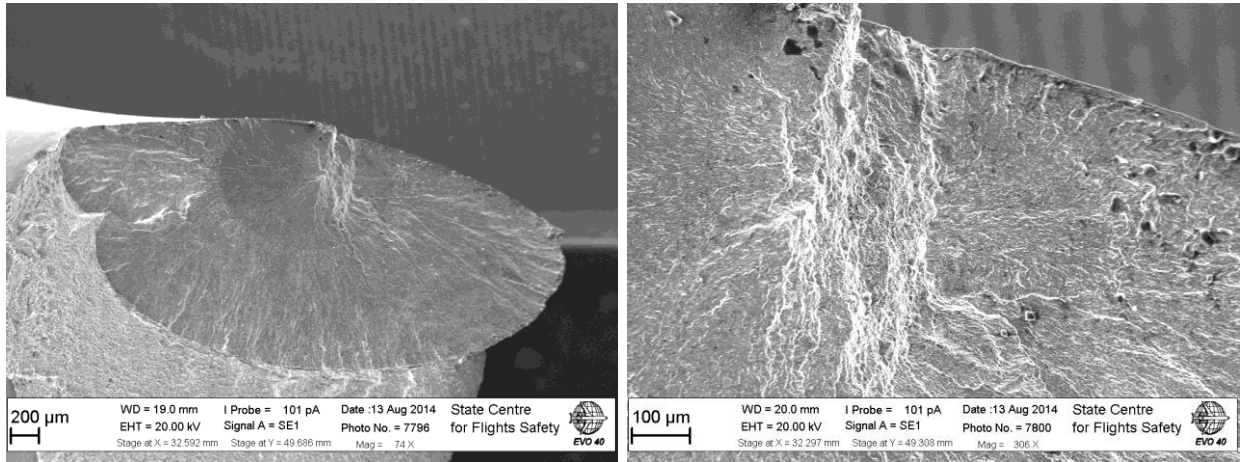


Fig. 36. La fissure subsurfacique dans l'alliage VT3-1 extrudé en torsion

Sur la base des premiers résultats, il est clair que la nouvelle machine est bien installée et fonctionne bien. Donc, le but de ce partie de la thèse est atteint avec succès.

Conclusion

Dans ce thèse plusieurs buts a été prévu: (1) étudier la résistance de fatigue à très grand number des cycles de l'alliage de titane VT3-1 forgé laquelle est utilisé pour production des disques de compresseur ; (2) établir les mécanismes typique d'amorçage d'une fissure de fatigue à très grand number des cycles ; (3) étudier l'anisotropie de la propriété mécanique d'un disque de compresseur forgé ; (4) étudier l'effet de la charge statique sur la mécanismes d'initiation d'une fissure de fatigue ; (5) comparer les propriétés mécaniques fatigue à très grand number des cycles des deux alliages de titane: forgé et extrudé; (6) construire une machine nouveau pour l'essai de fatigue gigacyclique en torsion pure ; (7) comparer les mécanismes d'amorçage d'une fissure de fatigue en chargement longitudinal et torsion à très grand number des cycles.

Tous les objectifs sont atteints avec succès dans ce thèse.

Literature

[1]	
[2]	C.Bathias, P.C.Paris, Gigacycle fatigue in Mechanical Practice, 'Marcel Dekker', New York, 2005
[3]	T. Nicolas
[4]	LeBievant
[5]	
[6]	
[7]	
[8]	
[9]	
[10]	