

© 1990 ISIJ

論 文

Ti-6Al-4V 合金の大気中における
フレットング疲労強度の解析丸山 典夫*・角田 方衛*²・中沢 興三*²

Fretting Fatigue Strength Analysis of Ti-6Al-4V in Air

Norio MARUYAMA, Masae SUMITA and Kozo NAKAZAWA

Synopsis :

The influence of fretting damage on fatigue strength has been investigated using Ti-6Al-4V alloy. Axial fatigue loading was applied at frequencies of 20 Hz and 0.5 Hz in a laboratory environment with the fretting applied to the specimen central section through a fretting pad made of the same material as the fatigue specimen.

The reduction in fatigue strength due to the fretting damage depended on the contact pressure, p . When the value of p is about 20 MPa, the fatigue life exhibited a minimum. The fretting fatigue crack initiated at the center of the fretted surface. Many micro cracks existed prior to main crack initiation. However, when the value of p is more than 30 MPa, the fretting fatigue crack initiated at the edge of the fretted surface. Few micro cracks existed prior to main crack initiation.

Fretting fatigue cycles more than 90% of the total life in the interrupted fretting fatigue test are required in order to continue crack propagation after the removal of the fretting pad, although the crack already initiated at cycles less than 50%.

Key words : fretting fatigue ; in air ; Ti-6Al-4V ; friction stress ; friction coefficient.

1. はじめに

繰返し荷重が加わっている構造物にタービンローターはめあい部、ボルト結合部などのような接触箇所があると、そこで微小振幅の摩耗すなわちフレットングを生じ、そこを起点として疲労破壊を生じることがある。フレットング疲労破壊応力は通常の疲労破壊応力に比べて約 1/2 と低いので¹⁾、疲労におよぼすフレットング損傷の影響を基礎的に把握することはその破壊を予測し、表面改質などにより強度向上を図る際に重要である。

フレットング疲労過程はき裂発生とき裂伝播に分けられる。フレットングが疲労に影響するのはき裂発生と初期き裂に対してである。フレットング疲労寿命に係わる力学的因子のうち、応力振幅、および接触面圧、相対すべり量、摩擦係数などトライボロジーと関係のある因子の影響が大きいと考えられている²⁾。

チタン合金は比強度が高く、そして耐食性が優れているので、生体材料、海洋構造物用材料、原子力発電機器

材料、航空・宇宙構造物用材料として先端産業分野での需要が期待されている。しかしチタン合金は焼付きを生じやすく、摩耗強度が低いなどトライボロジー特性に問題があるので、チタン合金のフレットング疲労破壊挙動を解明することは重要である。しかしながらチタン合金のフレットング疲労特性に関しては研究例が少なく不明なことが多い。

そこで上記のことを考慮して本論文では大気中における Ti-6Al-4V の疲労強度へ及ぼすフレットング損傷の影響を基礎的に調べることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 対象材料

Ti-6.34%Al-4.11%V-0.14%Fe-0.20%O-0.007%N-0.008%C 合金を使用した。熱処理として 940°C で 2 h 保持後水冷、さらに 540°C で 5 h 保持後空冷を施した。組織は球状化した初析 α および微細 α が析出した β から成る。試験片方向は L 方向である。ASTM E8 試験

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 平成元年 5 月 19 日受付 (Received May 19, 1989)

* 金属材料技術研究所筑波支所 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305)

*² 金属材料技術研究所筑波支所 工博 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals)

Table 1. Mechanical properties.

0.2% P. S. (MPa)	T. S. (MPa)	EL. (%)	R. A. (%)
1006	1104	14.5	29.5

片による引張試験結果を Table 1 に示す。

2.2 フレット疲労試験

(1) フレット疲労試験片およびパッドの形状は別報³⁾ に記したので省略する。パッドが試験片と面接触する部分の幅は 2 mm 以外に一部 5 mm の試験も行った。

(2) 試験機：± 10 t 電気油圧型疲労試験機を用いた。パッド押付け力は試験機本体油圧源から分岐した。

(3) フレット疲労試験および試験法は別報³⁾ と同様である。試験片表面およびパッド接触面は 0 番エメリー紙で研磨した後アセトンで脱脂した。試験中におけるパッドと試験片間の摩擦力はパッド中心部側面に貼ったひずみゲージにより求めた。パッド端部と試験片間の相対すべり振幅は特殊な小型伸び計を用いて測定した。

(4) 応力比： $R = 0.1$ の軸荷重下で行った。

(5) 繰返し速度：通常は 20 Hz、一部 0.5 Hz および 0.1 Hz を用いた。

(6) 応力波形：サイン波を用いた。

(7) パッド接触面圧：5-200 MPa を用いた。

(8) 環境：室温大気中で行った。フレット疲労試験中の温度および湿度はすべて記録された。その結果、温度および湿度の変動幅はそれぞれ 27-31°C および 40-50% であった。

(9) 破面およびフレット表面観察：走査型電子顕微鏡および光学顕微鏡を用いた。

3. 結 果

3.1 疲労寿命へのフレットの影響

応力振幅 ($\Delta\sigma_a$) と破断繰返し数 (N) との関係を図 1 に示す。△印はフレット疲労試験片による通常の疲労試験結果である。試験片はすべて肩部で破断している。肩部の応力集中係数 (K_t) は 1.4 である。○印は $K_t = 1.04$ の砂時計型試験片による疲労試験結果である。 10^7 回疲労強度は前者の場合 210 MPa、そして後者の場合 270 MPa である。

Fig. 1 において、□印は接触面圧 $p = 20$ MPa のそして◇印は $p = 50$ MPa のフレット疲労試験結果である。 $\Delta\sigma_a$ が高い場合フレット疲労寿命は通常の疲労寿命に比べて多少短い程度であるが、 $\Delta\sigma_a$ が低くなると両者の差は大きくなる。 10^7 回フレット疲労

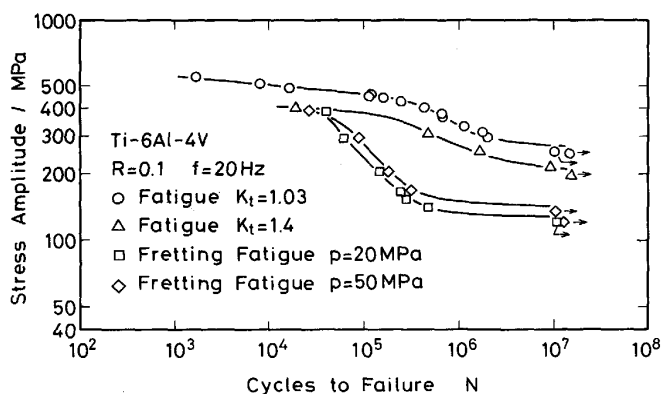


Fig. 1. Relation between stress amplitude and cycles to failure.

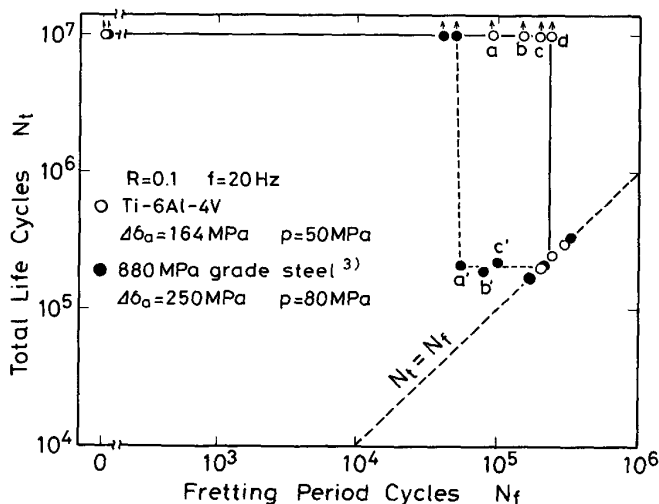


Fig. 2. Effect of fretting period cycles on total life cycles.

強度は $p = 20$ MPa の場合 135 MPa、そして $p = 50$ MPa の場合 155 MPa である。

疲労寿命へのフレット損傷の影響を調べるために $\Delta\sigma_a = 164$ MPa、 $p = 50$ MPa で、ある繰返し数だけフレット疲労試験後パッドをとりはずし通常の疲労試験に移行する試験を行った。その結果を図 2 に示す。縦軸はフレット疲労繰返し数にその後の疲労繰返し数を加えた繰返し数 (N_t)、そして横軸はフレット疲労繰返し数 (N_f) である。 $N_t = N_f$ の破線上の値はフレット疲労試験結果を、そして $N_f = 0$ に対する縦軸上の値は通常の疲労試験結果を示す。この試験条件下では疲労寿命は 10^7 回以上、そしてフレット疲労寿命は $2-3 \times 10^5$ 回である。一方、フレット疲労寿命に極めて近い繰返し数でパッドを取りはずし、通常の疲労試験に移行すると試験片は 10^7 回までに破断しない。このことはフレット疲労繰返

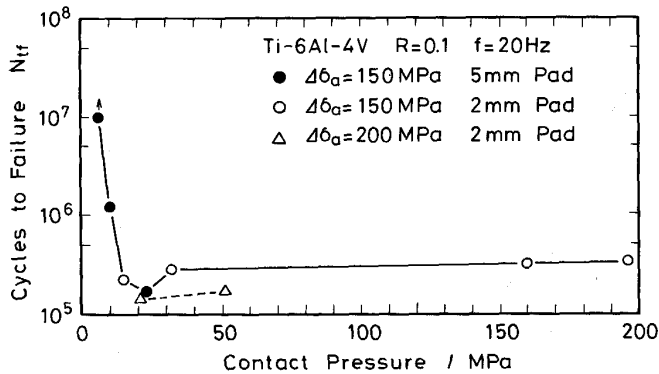


Fig. 3. Relation between cycles to failure and contact pressure.

し数の大部分は見掛け上き裂発生に費やされていることを意味している。

フレットング疲労寿命が Ti-6Al-4V とほぼ同じである 880 MPa 級鋼の結果³⁾を Fig. 2 に併記する。この鋼の引張強さは 1010 MPa であり Ti-6Al-4V の引張強さとほぼ同じ水準である。 N_f が 5×10^4 回以下では $N_i > 10^7$ である。 $N_f = 6 \times 10^4$ になると $N_i = 2 \times 10^5$ となる。この値は純フレットング疲労寿命にほぼ等しい。すなわちフレットング損傷は 6×10^4 回で飽和している。このフレットング損傷が飽和する限界繰返し数を N_f^* とすると、880 MPa 級鋼の場合、純フレットング疲労寿命 N_f に対する N_f^* の割合は約 30% である。一方、Ti-6Al-4V の場合のそれは 90% 以上である。 $\Delta\sigma_a = 150$ MPa におけるフレットング疲労破断繰返し数 (N_f) と接触面圧 (p) との関係を図 3 に示す。 Fig. 3 では一部 5 mm 幅のパッドが使用されている。それは通常は 2 mm 幅のパッドを用いているが、押付け力 (P) が低いところでは、パッドへの押付け力荷用治具の重みでフレットング面の移動を生じやすい。そこで押付け力を高めてその移動を阻止するため、5 mm 幅のパッドを用いた。同図より p が低いところでは N_f は p の増加とともに短くなる。しかし $p > 30$ MPa では、 N_f は p に依存しないか、あるいは p とともに多少増加している。 $\Delta\sigma_a = 200$ MPa の場合も $\Delta\sigma_a = 150$ MPa の場合と類似した傾向を示す。 p が一定の場合、前者の N_f は後者の N_f に比べて短い。

3.2 フレットング疲労損傷

繰返し応力軸方向に 5 等分したパッド接触面における主き裂 (最終破断に至ったき裂) 発生箇所の頻度分布を図 4 に示す。主き裂発生箇所は接触面圧 p に依存する。 $p = 20$ MPa の場合、主き裂は接触領域の中央近辺で多く発生する。一方、 $p = 50$ MPa の場合主き裂は接

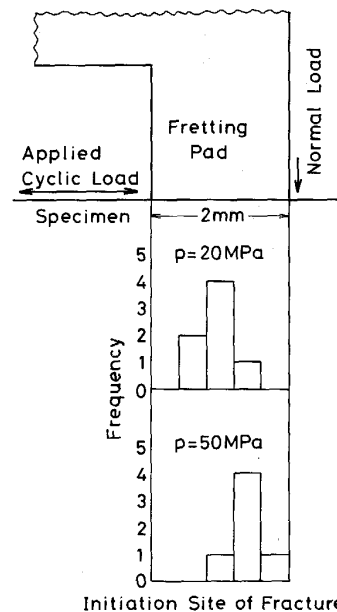


Fig. 4. Initiation sites of fracture in fretting fatigue specimen.

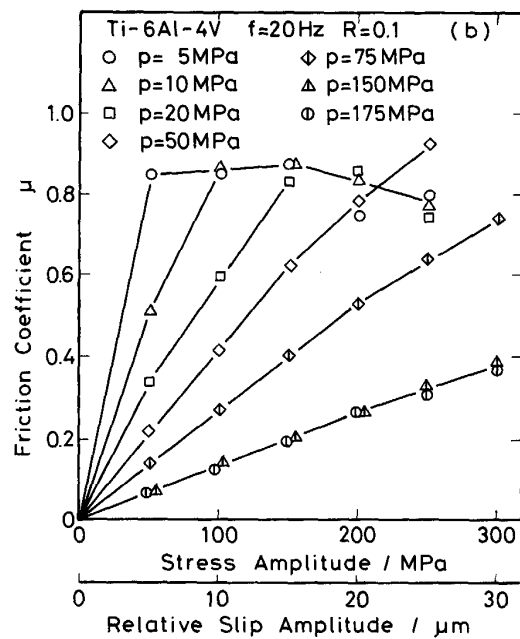
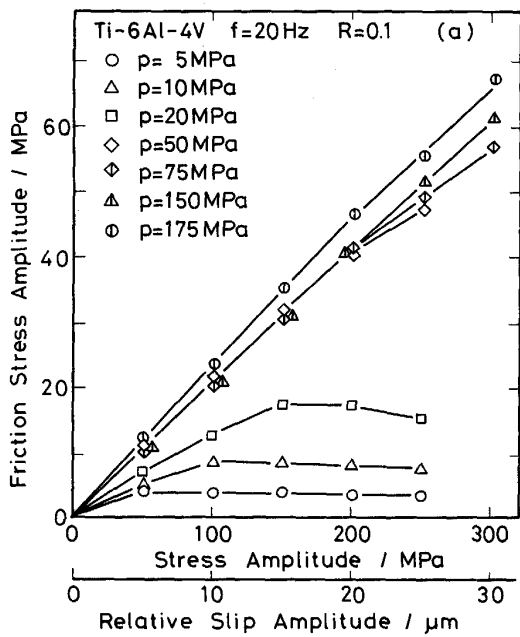
触領域の外端部に近い所で多く発生している。

3.3 フレットング疲労損傷に関する種々の力学的因子

試験片表面とパッドの相対すべり振幅 (ΔS) は本実験で用いた応力振幅範囲内で $\Delta\sigma_a$ に比例して増加した。それは接触面圧および繰返し速度に依存しない。 ΔS はパッドを剛体とみなして求められる計算式 $\Delta S = \Delta\sigma_a \cdot l / 2E$ で表される。ここで E はヤング率、 l はパッドのスパンである。

摩擦力振幅 ΔF を測定する際、2種類のすべりが生じる。 ΔF が ΔS に比例する“Elastic slip”と ΔF が ΔS にほとんど比例しない“Macro slip”である⁴⁾。繰返し初期の繰返し数では、“Macro slip”成分が多い。同一試験条件で繰返し数 n が増加するとともにサイン波形に近づき、“Elastic slip”成分が相対的に多くなる。 ΔF は n とともに増加するが、 $n = 2000-3000$ でほぼ飽和する。本実験における ΔF は $n = 3000$ で求められている。なお、サイン波形からのずれは p が小さいほど顕著である。

2 mm \times 6 mm のパッド接触面による摩擦応力振幅 Δf と相対すべり振幅 ΔS との関係および摩擦係数 μ と相対すべり振幅 ΔS との関係をそれぞれ Fig. 5 (a) および (b) に示す。 μ は $\Delta F / P$ から求まる。 $p \geq 50$ MPa では Δf はほぼ ΔS に比例する。 $p \leq 20$ MPa では ΔS が高い領域では Δf は ΔS に依存しないで一定となる。 p が小さいほど“Macro slip”成分が多い。 μ は ΔS にほ

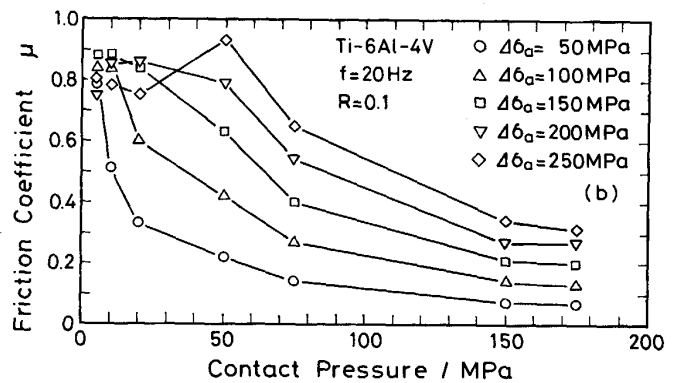
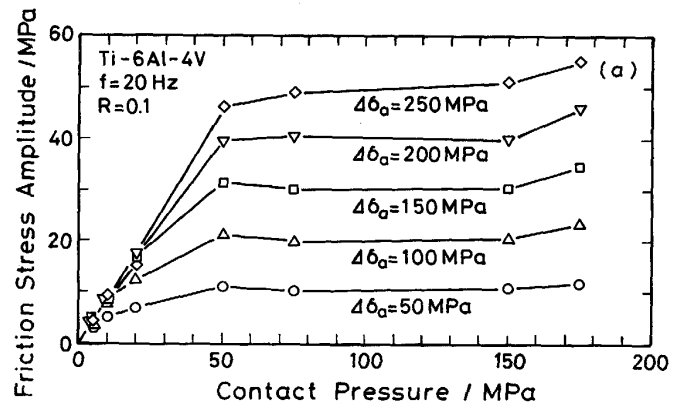


(a) Relation between friction stress amplitude and relative slip amplitude
(b) Relation between friction coefficient and relative slip amplitude

Fig. 5. Friction stress amplitude and friction coefficient as a function of relative slip amplitude.

は比例して増加し $\mu = 0.8$ に達すると μ は ΔS に依存しなくなる。 p の増加とともに μ と ΔS との関係の傾きは小さくなる。

摩擦応力振幅 Δf と接触面圧 p との関係および摩擦係数 μ と接触面圧 p との関係をそれぞれ Fig. 6 (a) および (b) に示す。 Δf は p とともに増加するが、 $p \geq 50$

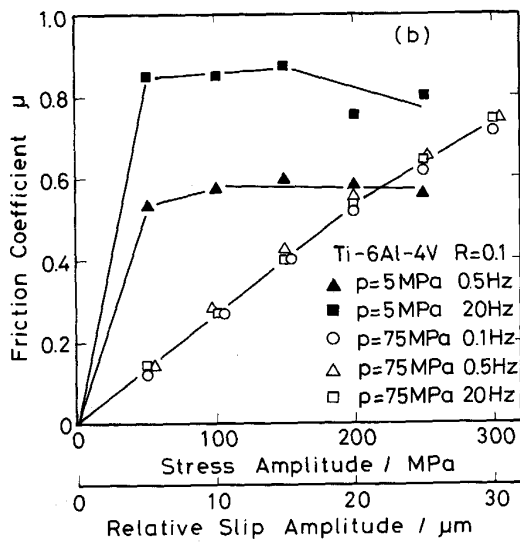
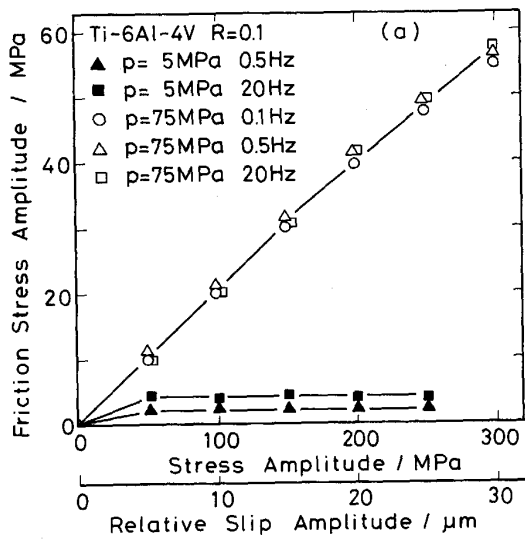


(a) Relation between friction stress amplitude and contact pressure

(b) Relation between friction coefficient and contact pressure

Fig. 6. Friction stress amplitude and friction coefficient as a function of contact pressure.

MPa ではほぼ一定となる。 Δf は $\Delta\sigma_a$ が高いほど高い。 μ と p との関係も $\Delta\sigma_a$ に依存する。 $\Delta\sigma_a$ が低い場合、 (ΔS が低い場合) μ は p とともに減少する。 $\Delta\sigma_a \geq 150$ MPa では μ は p が低いところでは p に依存しないが、 $p > 50$ MPa では p とともに急減する。 摩擦応力振幅 Δf と相対すべり振幅 ΔS との関係および摩擦係数 μ と相対すべり振幅 (ΔS) との関係を接触面圧 p および繰返し速度をパラメーターとしてそれぞれ Fig. 7 (a) および (b) に示す。 $p = 75$ MPa の場合 Δf と ΔS との関係は繰返し速度に依存しない。 μ と ΔS の関係も同様である。 この場合 Fig. 5 のところで述べたように主として“Elastic slip”が生じている。 このような傾向は p が高いほど顕著である。 一方、 $p = 5$ MPa の場合、 Δf は ΔS に依存せず一定値を示し、その値は繰返し速度に依存する。 20 Hz の場合、 $\Delta f = 4$ MPa そして 0.5 Hz の場合 $\Delta f = 3$ MPa である。 μ と ΔS の関係も繰返し速度に依存する。 20 Hz の場合、 $\mu = 0.8$ 、そして 0.5 Hz の場合 $\mu = 0.6$ である。 この場合、主として“Macro slip”が生じている。 このような傾向は p が低いほど顕



(a) Relation between friction stress amplitude and relative slip amplitude
 (b) Relation between friction coefficient and relative slip amplitude

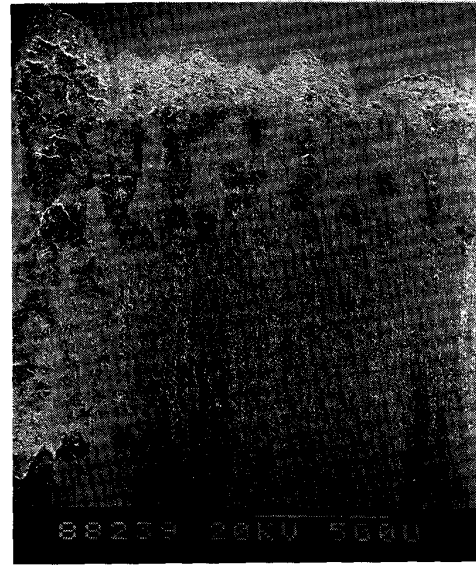
Fig. 7. Friction stress amplitude and friction coefficient as a function of relative slip amplitude.

著である。

3.4 接触面の観察

$p = 50 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_a = 150 \text{ MPa}$ の接触面を Photo. 1 に示す。この条件下では約 3×10^5 回で破断する。損傷部は局所的である。表面をサンドペーパーで研磨後観察すると Photo. 2 a) に示すように 10^4 回ですでに損傷部が、 10^5 回になると b) に示すように長さが約 $100 \mu\text{m}$ のき裂が観察される。 1.8×10^5 回では c) に示すように約 1 mm 長さのき裂が観察される。

$p = 20 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_a = 150 \text{ MPa}$ の接触面を Photo. 3 に示す。繰返し数は 10^5 回である。 $p = 50 \text{ MPa}$ の場合と



$p = 50 \text{ MPa}$ $\Delta\sigma_a = 150 \text{ MPa}$
 Photo. 1. Fretted surface after 10^5 cycles.

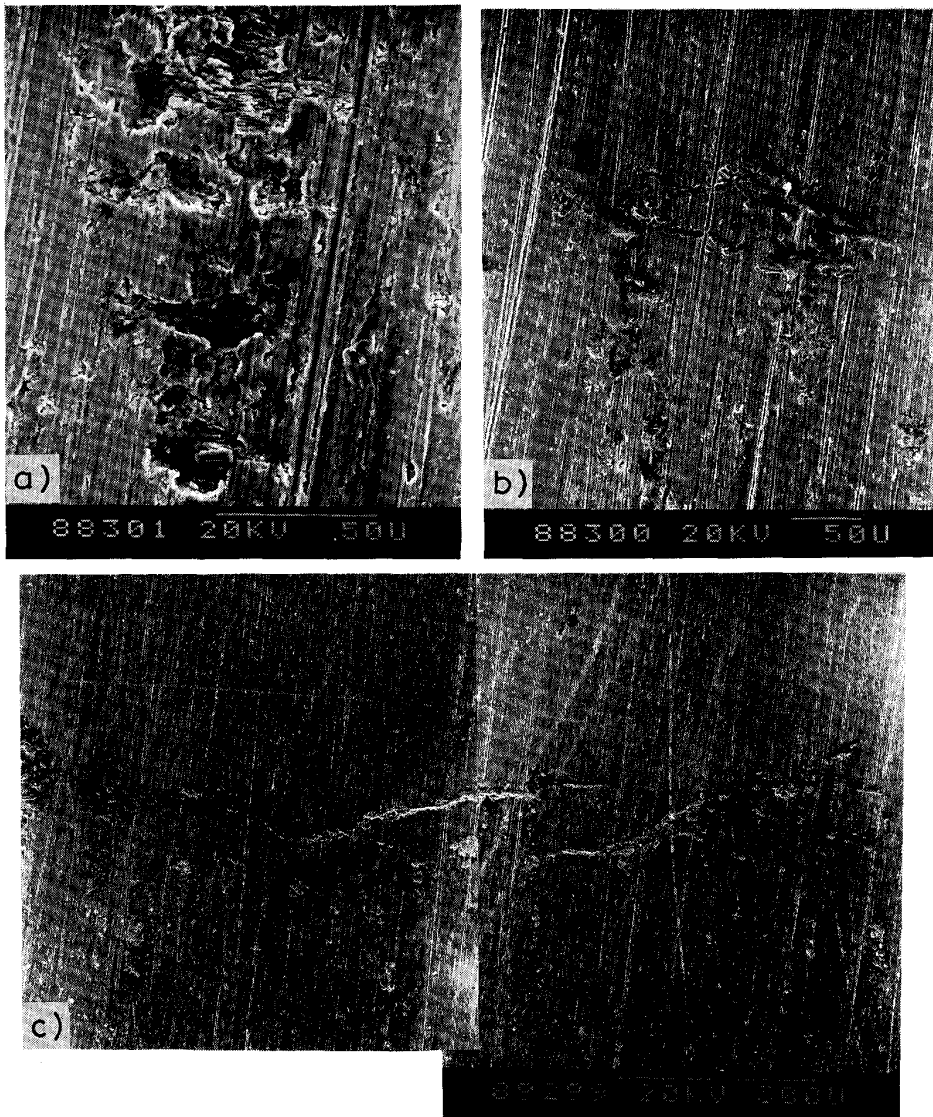
は異なり接触面はほぼ全面に摩耗粉が固着しており接触面の外域および内域はうろこ状模様をていしているが中央部にはその模様はみられない。固着している摩耗粉をサンドペーパーで除去した接触面中央部の写真を Photo. 4 a), および b) に示す。 10^4 回ですでに局所的に損傷を受けている。繰返し数の増加とともに表面損傷は顕著になり、破断繰返し数である 2.8×10^5 回では多数の微小き裂が観察される。このような微小き裂はうろこ状模様の領域ではほとんど観察されない。

4. 考 察

4.1 フレッシング疲労き裂発生および伝播

Fig. 2 で述べたように Ti-6Al-4V の場合 $p = 50 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_a = 164 \text{ MPa}$ においてフレッシング損傷が飽和する限界繰返し数 N_f^* のフレッシング疲労寿命 N_{fj} に対する割合、 N_f^*/N_{fj} は 90% 以上、そして併記した 880 MPa 級鋼のそれは約 30% であった。前者の場合全寿命の大部分は見掛け上き裂発生に費やされており、き裂が発生するかあるいはき裂が比較的短い繰返し数で発生していたとしてもそのき裂は摩擦力あるいは押付け力の作用下でないと伝播できないことになる。すなわちき裂発生支配である。一方、後者の場合全寿命の 70% がき裂伝播に費やされており、き裂伝播支配である。これまでのフレッシング疲労試験結果のほとんどはき裂伝播支配型であり、き裂発生支配型という結果は存在しない¹⁴⁾。

大気中における Ti-6Al-4V の疲労き裂伝播速度は高張力鋼のそれに比べて多少速い程度である⁵⁾⁶⁾。また



$p = 50 \text{ MPa}$ $\Delta\sigma_a = 150 \text{ MPa}$
 a) After 10^4 cycles
 b) After 10^5 cycles
 c) After 1.8×10^5 cycles

Photo. 2. Fretted surface.

Ti-6Al-4V のき裂伝播下限値は高張力鋼のそれとはほぼ同じである¹³⁾。したがって Ti-6Al-4V のフレッティング疲労によるき裂が発生後急速に伝播して破断するとは考えにくい。

事実 Photo. 2 に示したように Ti-6Al-4V においてき裂は 10^5 回ですでに発生しており、その後き裂は繰返し数の増加とともに長くなる。一方、880 MPa 級鋼の場合 4×10^4 回以上のフレッティング疲労繰返し数ではき裂がすでに発生している³⁾。このようにき裂発生寿命は両材料間で大きな相違はみられない。

880 MPa 級鋼の場合 Fig. 2 中 a' ですでに疲労だけで伝播可能なき裂長さ到達し、それ以降 b', c' とフレッティング疲労繰返し数が増加するとともに疲労に移行時のき裂長さは長くなるが、a' より長寿命側におけるフレッティング損傷は疲労に影響しない。それに対して Ti-6Al-4V の場合、Fig. 2 中 d 近くの繰返し数になっ

て初めて疲労のみにより伝播可能なき裂長さ到達するが、き裂は Photo. 2 に示したように a あるいは b においてもすでに存在している。すなわち Ti-6Al-4V においてはフレッティング疲労によって導入されたき裂は全寿命の 50% 以内のフレッティング繰返し数においてすでに存在しているが、かなり長いき裂になるまでフレッティングなしには進展することができない。フレッティング疲労応力下でき裂進展に寄与する応力は疲労による応力振幅 $\Delta\sigma_a$ と摩擦応力振幅 Δf である。Fig. 2 に示す Ti-6Al-4V の $\Delta\sigma_a = 164 \text{ MPa}$ における Δf は約 30 MPa、880 MPa 級鋼の $\Delta\sigma_a = 250 \text{ MPa}$ における Δf は約 40 MPa であるが、フレッティング疲労応力下における両材料の初期のき裂伝播挙動の相違を $\Delta\sigma_a$ および Δf の大小により説明することは現時点でできない。今後この問題に関して疲労応力条件、押付け力などについて検討することが必要と思われる。なお、ほぼ同じ応力振幅

の Ti-6Al-4V の回転曲げにおける N_f^*/N_{f1} は 44% である⁷⁾.

4.2 フレッシング疲労損傷への接触面圧の影響

フレッシング疲労破断繰返し数 N_f と接触面圧 p との関係については鉄鋼材料に関して調べられており⁸⁾⁹⁾, それらによれば, N_f は p とともに減少するが, ある p 以上では p に依存しなくなる.

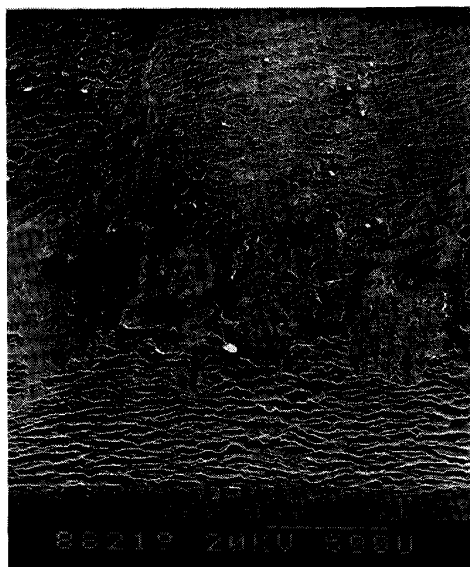
N_f が p の低い領域で p の増加とともに減少するのは, p の増加にともなって摩擦応力振幅 Δf が増加し初期におけるフレッシング疲労き裂伝播速度の加速が大

きくなるためである. 一方, N_f が p に依存しなくなるのは接触面圧がき裂近傍の応力場に対して静的圧縮応力として寄与し, このき裂を閉口する効果と上述の加速効果とが相殺するためと考えられる⁹⁾¹⁰⁾.

しかしながら Fig. 1 および Fig. 3 に示したように, ある p より大きいところでは N_f は p とともに増加する傾向はこれまでに報告されていない. Fig. 4 に示したように主き裂発生箇所の頻度分布が p が 20 MPa と 50 MPa 間で著しく異なることはフレッシング疲労下におけるき裂発生および伝播機構が接触面圧によって異なる可能性を示唆している. そして Photo. 1~Photo. 4 に示した $p = 20$ MPa と 50 MPa のき裂の相違は上記のことを支持するものである.

$p = 50$ MPa の場合 Photo. 2 b) あるいは c) に示したように接触面上に主き裂以外のき裂がほとんど存在しないことが特徴である. 接触部の摩耗量は $p = 20$ MPa の場合に比べて1桁以上少なく, 接触面の摩耗による損傷はより局所的である. 主き裂の発生箇所は Fig. 4 に示したようにパッド接触面の外端部に近い領域に集中している. これらの状況から主き裂は, 相対すべり振幅の大きい接触部外端近くの局所的に損傷を受けたところ (Photo. 1 参照) で比較的早い時期に発生し, それが繰返し数とともに伝播していったものと考えられる. Fig. 6 (b) に示したように $p = 50$ MPa においては主として“Elastic slip”が生じており, $\mu = 0.6$ である.

一方, $p = 20$ MPa の場合, Photo. 4 に示したように破断に至るまでに接触面上に多数の微小き裂が存在する



$p = 20$ MPa $\Delta\sigma_a = 150$ MPa
Photo. 3. Fretted surface after 10^5 cycles.



$p = 20$ MPa $\Delta\sigma_a = 150$ MPa
a) After 10^4 cycles
b) After 2.8×10^5 cycles
Photo. 4. Fretted surface.

ことが特徴である。また、Fig. 4 に示したように破断箇所の頻度はパッド接触部の中央で高い。これらの状況から損傷過程は次のように考えられる。

繰返し数が少ないとき、パッド接触部の中央部に無損傷の固着域¹¹⁾が存在する。この固着域とその外側のすべり域との境界ではせん断応力が集中するのでき裂が発生する。しかしき裂発生により応力集中は緩和され、両域の境界が元の固着域内へ移動する¹²⁾。新しい境界におけるき裂発生→応力集中緩和→境界の移動、この過程が繰り返されることにより接触部の中央に向かって多数のき裂が形成されていく。そして最終的には接触部のほぼ中央で微小き裂が合体して主き裂が形成されると考えられる。なお、この試験条件は Fig. 6 (b) に示したように“Macro slip”が生じやすいところであり、 $\mu = 0.8$ である。

主き裂発生箇所は相対すべり振幅の影響を受けるが⁹⁾、相対すべり振幅は p には依存しないので、Fig. 4 の結果には相対すべり振幅の影響は含まれていない。

5. 結 論

Ti-6Al-4V の大気中同一材料によるフレット疲労疲労挙動およびこれに影響を及ぼす基礎的な因子を検討し、つぎの結果を得た。

(1) フレット疲労寿命 N_f は接触面圧 p に依存する。 N_f は $p \leq 20$ MPa では p の増加とともに減少する。 N_f は $p = 20$ MPa で極小値を示し、その後 p とともにやや増加する。

(2) $p = 20$ MPa の 10^7 回のフレット疲労強度 $\Delta\sigma_{af}$ は 135 MPa、 $p = 50$ MPa のそれは 155 MPa である。なお、通常の 10^7 回疲労強度は 270 MPa である。

(3) $p = 20$ MPa の場合主き裂はパッド接触部の中央近くで多く発生する。この場合接触域に多数の微小き裂が観察されることから固着域とすべり域の境界が繰返し数とともに接触部の端部から中央へ移動したものと考えられる。 $p = 50$ MPa の場合、主き裂はパッド接触部の外端部で多く発生する。この場合主き裂以外のき裂はほとんど観察されない。

(4) ある繰返し数だけフレット疲労試験後通常の疲労試験へ移行する試験を行った結果、き裂は全寿命の 50% 以内のフレット疲労繰返し数で発生するが、寿命を支配するフレット疲労損傷が飽和する限界繰返し数は全寿命の 90% 以上である。

(5) フレット疲労挙動に影響を及ぼす力学的因子について以下の結果を得た。

(a) 相対すべり振幅 ΔS は応力振幅 $\Delta\sigma_a$ に比例する。 ΔS は p および繰返し速度に依存しない。

(b) $p \geq 50$ MPa では摩擦応力振幅 Δf は ΔS に比例して増加する。 Δf と ΔS の関係は p および繰返し速度に依存しない。

(c) $p \leq 20$ MPa では Δf は ΔS に依存しない。 Δf は p および繰返し速度に依存する。 Δf は p および繰返し速度が大きいほど大きい。

(d) 摩擦係数 μ は ΔS に比例して増大し、 $\mu = 0.8$ で一定となる。その比例定数は p が小さいほど大きい。 μ は $p \leq 20$ MPa では繰返し速度が低いほど小さい。 μ は $p \geq 50$ MPa では繰返し速度に依存しない。

文 献

- 1) 武藤陸治, 田中紘一, 伊藤晋三: 材料, **37** (1988), p. 643
- 2) R. B. WATERHOUSE: Fretting Fatigue (1981) [Applied Science Publishers Ltd., London]
- 3) 中沢興三, 角田方衛, 丸山典夫, 河部義邦: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 725
- 4) K. TANAKA, Y. MUTOH, S. SAKODA and G. LEADBEATER: Fatigue Fract. Engng Mater. Struct, **8** (1985), p. 129
- 5) 例えば Damage Tolerant Design Handbook, Vol. 1 (1983) [MCIC, Battelle]
- 6) Damage Tolerant Design Handbook, Vol. 2 (1983) [MCIC, Battelle]
- 7) R. B. WATERHOUSE: Wear, **45** (1977), p. 355
- 8) 例えば 西岡邦夫, 平川賢爾: 日本機械学会論文集 (第1部), **37** (1971), p. 1051
- 9) 武藤陸治, 西田友久, 坂本 勲: 材料, **37** (1988), p. 649
- 10) 服部敏雄, 中村真行, 坂田 寛, 渡辺 孝: 日本機械学会論文集 A, **53** (1987), p. 1500
- 11) 佐藤準一: 防食技術, **37** (1988), p. 34
- 12) R. B. WATERHOUSE 著, 佐藤準一訳: フレット疲労損傷とその防止法 (1984), p. 243 [養賢堂]
- 13) 角田方衛, 丸山典夫, 中沢興三: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 365
- 14) 佐藤建吉, 出口伸幸: 日本材料強度学会誌, **22** (1987), p. 94