

富山大学 ○ 塩澤 和章,  
(株) シマノ 寺田 正夫,

富山大学 [院] 小林 弘和  
松井 明

### 1. 緒言

アルミニウム合金には耐食性、耐摩耗性、美観などの機能性向上を目的として、陽極酸化法によるアルマイト処理が施されることが多い。しかし、アルマイト処理を施したアルミニウム合金の疲労強度はそれを施さない基材の疲労強度よりも低くなり、アルマイト層は基材の疲労挙動に悪影響を及ぼす可能性のあることが指摘されている。しかし、これらアルマイト処理を施したアルミニウム合金の疲労に関する研究は少なく不明な点が多い。アルマイト処理を施したアルミニウム合金の疲労強度特性の把握は機械の設計や保守・管理などの点から、また、表面改質処理による機能性の向上と改質技術の確立の点から、工業の現場において早急な解決が求められている重要な課題である。

本研究はアルミニウム合金の疲労強度特性に及ぼすアルマイト層の影響およびアルマイト処理材の疲労機構を明らかにすることを目的として、静的強度の異なる3種類の試験片の片振り引張疲労試験を通して、静的強度と疲労強度との関連並びに疲労変形挙動とアルマイト層の割れについて検討を行った。

### 2. 試験片および実験方法

**2.1 試験片** 本研究に用いた供試材はAl-Cu系アルミニウム合金A2014およびAl-Mg-Si系アルミニウム合金A6151であり、T6(778Kで9ks保持後水冷、443Kで28.8ks保持)の熱処理を施したものである。A2014材は熱間鍛造したもの(記号Eと表示)、および鍛造後押出加工したもの(同F)の2種類を、またA6151材は冷間鍛造したもの(同E)を用意した。

疲労試験片は板厚3mm、幅6mm、標点部長さ12mmの板状試験片である。試験片は機械加工後、表面はバフ研磨仕上げを施した(未処理材)。また、未処理材表面に陽極酸化法によりアルマイト層を約3 $\mu$ m形成した試験片(アルマイト処理材)を用意し、実験に供した。

**2.2 実験方法** 疲労試験には電気油圧サーボ式軸荷重疲労試験機を用いた。実験は、室温・大気中の実験室雰囲気、応力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})=0.01$ 、繰返し速度20Hzの正弦波荷重制御の条件で行った。

### 3. 実験結果および考察

**3.1 疲労強度** 図1に疲労試験より得られた未処理材およびアルマイト処理材のS-N曲線を示す。図より、3種類の供試材ともにアルマイト処理材の疲労強度は未処理材のそれに比較して低下することがわかる。低下の程度は $10^7$ 回疲労強度において、A2014-T6押出材で20%鍛造材で25%、A6151-T6鍛造材で30%である。また、アルマイト処理材の疲労強度の大小関係はA2014-T6

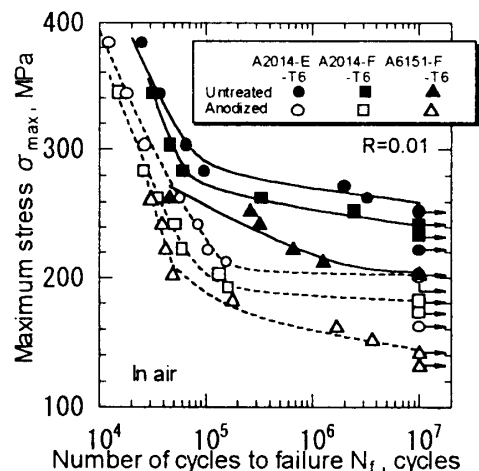


Fig. 1 S-N curves obtained from the tests under R=0.01

押出材>A2014-T6鍛造材>A6151-T6鍛造材の順に優れており、これは基材の静的強度および未処理材の疲労強度の大小関係と同様の傾向である。

**3.2 破面観察結果** 破面観察の結果、未処理材のき裂発生起点数は負荷応力振幅に関係なく1~2ヶ所であるのに対して、アルマイト処理材のき裂発生起点数は2~40ヶ所と多く明確な応力振幅依存性が認められた。疲労試験において破断に至った試験片表面の様相を観察した結果、試験片表面には多数の被膜の割れが観察された。この割れは比較的直線的なものであり、試験片標点部全体に一樣に観察された。また、被膜割れ下部の基材に被膜割れを起点としてき裂が発生している箇所が観察された。なお、これらの被膜割れは、繰返し数 $10^7$ 回で未破断の試験片表面には観察されなかった。したがって、アルマイト被膜の割れが基材のき裂発生に対する応力集中源となることが推察された。

**3.3 引張試験における被膜割れ挙動** アルマイト層の割れの挙動を明らかにするために、アルマイト処理材の静的引張試験を行った。図2に引張試験より得られた被膜割れ密度 $\rho$ と試験片負荷応力 $\sigma$ および負荷ひずみ $\epsilon$ の関係を示す。ここで、 $\rho$ は試験片軸方向の単位長さ当たりに発生した被膜割れの本数と定義した。図2(a)より、被膜割れの発生応力は各供試材で異なり、負荷応力の増加に伴って被膜割れの本数は急激に増加する傾向がみられる。同図(b)に示した被膜割れ密度 $\rho$ と引張ひずみ $\epsilon$ の関係より、いずれの材料においても被膜割れが発生し始める引張ひずみは $\epsilon=0.5\sim 0.55\%$ であり、供試材間の違いに依存せず被膜割れ開始ひずみは一定である。この結果から、試験片表面に観察されたアルマイト処理材の被膜割れは、アルマイト層が基材の変形に追従できないた

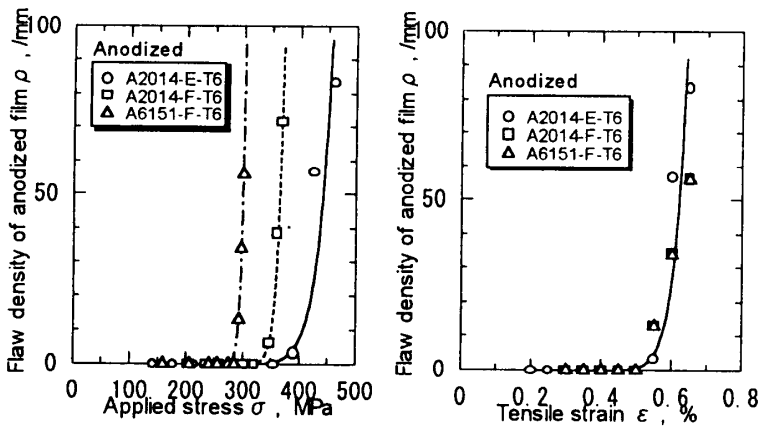


Fig. 2 Fracture behavior of anodized film under static tensile test.

めに発生するものと考えられる。

引張試験結果から求めた被膜割れ開始応力とアルマイト処理材の S-N 曲線を比較すると、各供試料とも静的引張試験で被膜に割れを生じた応力以下においても、アルマイト処理材の疲労強度は未処理材に比較して低下している。アルマイト処理材の破壊には被膜割れが関与するものと考えられることから、引張試験結果における被膜割れ開始応力以下でも疲労過程に被膜割れを生じる可能性が示唆され、疲労過程における被膜割れの発生挙動について検討する必要がある。

**3. 4 疲労変形と被膜割れの関係** 繰返しに伴う基材の変形挙動を、任意の繰返し数で測定されたヒステリシスループより調べた。本実験条件は片振引張 ( $R=0.01$ ) であるためにラッチェット変形を生ずる。したがって、疲労過程の試験片全ひずみ  $\epsilon_t$  は片振りの影響を考慮したラッチェットひずみ  $\epsilon_R$  分を含んだひずみとして定義した。図 3 に A2014-T6 押出材の試験片全ひずみ  $\epsilon_t$  と寿命比  $N/N_f$  の関係を示す。繰返しに伴って試験片全ひずみは増加し、寿命比  $N/N_f=0.5$  程度で飽和する傾向を示した。

疲労中断試験の結果、アルマイト処理材の被膜割れは寿命比  $N/N_f=0.2$  程度の時点で発生したことから、この寿命比  $N/N_f=0.2$  の時点における試験片全ひずみ  $\epsilon_t$  と負荷応力  $\sigma$  の関係(繰返し応力-ひずみ関係)を作成した。3種類の供試材に対して求めた結果を、静的引張試験から求

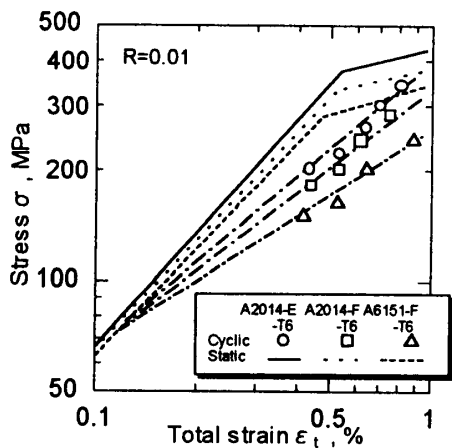


Fig. 4 Cyclic stress-strain curve obtained from repeated tensile fatigue.

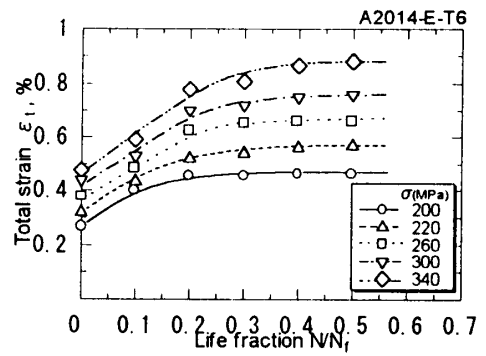


Fig. 3 Change in total strain during fatigue.

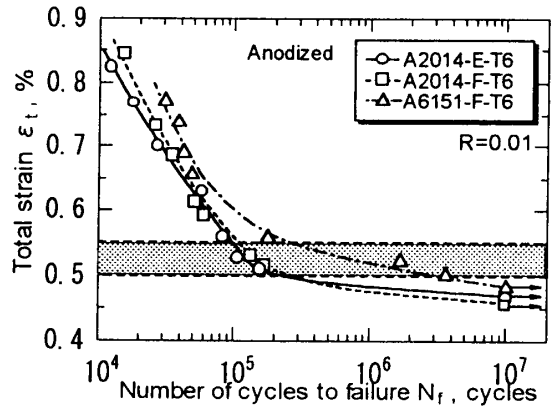


Fig. 5  $\epsilon_t - N_f$  curves.

めた応力-ひずみ線図と併せて図 4 に示す。図より静的応力-ひずみ関係と比較して、繰返し応力-ひずみ関係は下方に存在し、繰返し軟化を示すことがわかる。

以上の結果より、疲労過程に疲労変形が累積し、静的引張試験より求めたひずみに達したときアルマイト層に割れが発生するものと考えられる。図 4 の繰返し応力-ひずみ関係を用いて、負荷最大応力  $\sigma_{max}$  を試験片全ひずみ  $\epsilon_t$  に置き換えて、アルマイト処理材の S-N 曲線を再整理した。その結果を図 5 に示す。なお、図中の破線で囲まれる部分は引張試験結果により得られた被膜割れ開始ひずみ (0.5~0.55) の範囲である。図より、3種類の供試材の  $\epsilon_t - N_f$  関係がほぼ同一の関係で整理される。また、疲労試験で破断に至った試験片の全ひずみはいずれも被膜割れ開始ひずみ以上であり、試験片全ひずみが被膜割れ開始ひずみ以下のものは繰返し数  $10^7$  回でも破断に至らない。したがって、アルマイト処理材の S-N 曲線の繰返し数  $10^7$  回での時間強度は疲労過程に被膜に割れが発生しない上限の応力である。

4. 結 言

- (1)アルマイト処理を施したアルミニウム合金の片振り疲労強度はそれを施さない材料に比較して低下する。低下の程度は基材の強度に依存する。
- (2)その主因は疲労過程に基材の変形に伴ってアルマイト層が割れ、その割れによる切欠き効果でき裂の発生が促進するものである。
- (3)アルマイト層の割れはひずみ  $\epsilon_t=0.5$  程度で生じ、疲労寿命はひずみ基準によって定量的に評価できる。

参考文献 省略