Ti-6Al-4V 合金のき裂発生および初期き裂伝ば過程に 及ぼす β -STA 熱処理の影響†

田 中 哲 志* 西 谷 弘 信** 藤 崎 渉*
寺 西 高 広* 本 田 政 彦***

Effects of β -STA Heat Treatment on Initiation and Propagation Processes of Microcracks in Ti-Alloy

by

Satoshi TANAKA*, Hironobu NISITANI**, Wataru FUJISAKI*
Takahiro TERANISHI* and Masahiko HONDA***

To clarify the effects of β -STA processing on fatigue behaviors of Ti-6Al-4V alloy, microcrack initiation and propagation processes were successively observed in a series of rotating bending fatigue tests of β -STA material and annealed Ti-6Al-4V alloy. The main results obtained are as follows:

(1) When the stress higher than a fatigue limit is repetitively applied to the specimen, microcracks appear from the α phase for the annealed material, while they appear along the fine acicular microstructure for the β -STA material. When the stress corresponding to a fatigue limit is repetitively applied to the specimen, no microcrack appears in either of the materials. Accordingly, the fatigue limit is determined by the microcrack initiation limit.

(2) The fatigue limit of the β -STA material becomes about 30% higher than that of the annealed material.

(3) In both materials, the equation $dl/dN = C\sigma^l$ (C : constant, dl/dN : crack growth rate) holds, and constants C are nearly equal to each other.

(4) The above conclusions (1), (2) and (3) mean that β -STA processing has little influence on resistance against the microcrack propagation but contributes to an increase in limiting stress for the microcrack initiation.

Key words: Fatigue, Crack initiation, Crack propagation, Ti-6Al-4V alloy,
Successive observation, Heat treatment

1 緒 言

一般に、疲労寿命の多くは微小き裂の伝ば寿命で占められているのは周知の事実であり、チタン合金ではこのことが特に重要な意味を持っている^{1),2)}。したがって、Ti-6Al-4V 合金を中心にながりの研究が行われている¹⁾⁻⁸⁾。著者らも前報において、焼なましした Ti-6Al-4V 合金について、微小き裂の発生および伝ばについて詳細な報告を行った²⁾。

チタン合金は一般に種々の熱処理を施した後使用され、疲労強度は熱処理によって大きく変化すると言われている⁵⁾。Ti-6Al-4V 合金では、 β 変態点以上の温度域で溶体化時効処理 (β -STA 処理) を行うことにより針状組織が得られる。この処理により、一般に破壊じん性や疲労強度が向上すると言われている^{1),3),9)}。しか

し、 β -STA 材の組織と疲労強度の関係については不明な点が多く残されている⁵⁾。

そこで本研究では、 β -STA 処理が Ti-6Al-4V 合金の疲労特性に及ぼす影響を調べるために、 β -STA 材の回転曲げ疲労試験を行い、微小き裂の発生および伝ば過程をレプリカ法により連続観察し、疲労限度の物理的意味および微小き裂伝ば特性を調べ、納入材(焼なまし材)の結果と比較検討した。

2 供試材、試験片および実験方法

供試材は焼なまし (705°C, 2 h, 空冷) 状態で納入された Ti-6Al-4V 合金 ($\phi 24$ mm) 圧延丸棒である。焼なまし試験片は、このまま機械加工することにより製作された。 β -STA 試験片は供試材を $\phi 13$ mm $\times$ 85 mm に機械加工後、1000°C, 4 min, W.Q., 540°C,

† 原稿受理 平成 5 年 6 月 3 日 Received June 3, 1993

* 正 会 員 九州産業大学工学部機械工学科 〒813 福岡市東区松香台, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Sangyo Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 813

** 正 会 員 九州大学工学部機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

*** 田中電工(株) 〒535 大阪市旭区高殿, Tanaka Denko Co. Ltd., Asahi-ku, Osaka, 535

Fig. 5. Crack growth curves ($\sigma > \sigma_w$).

のように焼なまし材を β -STA 処理することにより疲労限度は約 30% の上昇を示す。

Fig. 5 に両材において疲労限度より高い応力を繰返した場合のき裂伝ば曲線を示す。図中の $\leftarrow$ はき裂の合体を意味する。き裂は全寿命の約 15% と初期に発生している。また、Ti-6Al-4V 合金では、微小き裂の成長過程が全寿命の中でかなりの割合を占めると言

われている^{1),2)}。本研究においても、両材においてき裂の発生から 0.5 mm までの微小き裂伝ば寿命は、全寿命の約 50~60% を占めており、微小き裂の伝ばを把握することが重要であるといえる。

Fig. 6 に、両材において疲労限度より高い応力を繰返した場合の表面状態の変化を示す。き裂の発生は、焼なまし材では α 相からであり ($N=1 \times 10^3$), β -

Fig. 6. Change in surface states ($\sigma > \sigma_w$).

Fig. 7. Surface states at fatigue limit ($\sigma = \sigma_w$).

STA 材では微細な針状組織に沿って発生している ($N = 2 \times 10^3$). 発生した微視的き裂は、徐々に伝ばし隣接する二、三のき裂と連結し、主き裂となる (認められた最小のき裂長さは $10 \mu\text{m}$ 程度). その後、き裂は主き裂前方の微視的き裂と連結しながら、主応力とほぼ垂直な方向に伝ばし破断に至る.

両材に疲労限度の応力を繰返した場合、試験部全面を光学顕微鏡 ($\times 400$) により観察したところ、き裂の発生は認められなかった (その一例を Fig. 7 に示す). これより、Ti-6Al-4V 合金の疲労限度は焼なまし材、

β -STA 材ともにき裂の発生限界で決まることがいえる. したがって、 β -STA 処理による疲労限度の上昇は、き裂発生限界応力の増加に起因することになる.

3・2 き裂伝ば特性の比較

両材のき裂長さの対数 $\ln l$ と繰返し数 N の関係を Fig. 8, Fig. 9 に示す. β -STA 材の応力レベルは $\sigma / \sigma_{0.2} \approx 0.65 \sim 0.74$ であり、焼なまし材と同様、き裂先端における小規模降伏条件は満たされていない¹¹⁾. Fig. 10²⁾, Fig. 11 は、 $\ln l$ と相対繰返し数比 N/N_f の関係を求めたものである. 両材のき裂発生寿命は全寿命の 15% 程度であり、 β -STA 材においても微小き裂の伝ば過程の評価が重要であるといえる. また、 β -STA

Fig. 8. Relation between crack length and number of cycles in as received material (Annealed).

Fig. 9. Relation between crack length and number of cycles in β -STA material.

Fig. 10. Relation between crack length and N/N_f in as received material (Annealed).

Fig. 11. Relation between crack length and N/N_f in β -STA material.

Fig. 12. Relation between crack growth rate and σ in as received material (Annealed).

Fig. 13. Relation between crack growth rate and σ in β -STA material.

材でもき裂長さの対数と繰返し数の間には、き裂が短ければ、組織による影響や応力レベルの違いによるばらつきは多少あるが、ほぼ直線関係が成立しており、き裂伝ば速度 dl/dN はき裂長さ l に比例する。Fig. 12, Fig. 13 は両材のき裂伝ば速度 dl/dN の応力依存性をみたものである。図より明らかなように、他の多

く^{11)~13)}の材料で確認されたように、両材においても dl/dN は σ^n に比例する ($n \approx 6$)。

Fig. 14 は焼なまし材 (図中 $\bullet$ $\blacktriangle$ $\blacksquare$) と β -STA 材 (図中 $\circ$ $\triangle$ $\square$) のき裂伝ば速度 dl/dN と $\sigma^6 l$ の関係を求めたものである。 dl/dN と $\sigma^6 l$ の関係はいずれの材料においても傾き約 1 の直線で示され、

Fig. 14. Relation between crack growth rate and $\sigma^6 l$.

$$dl/dN = C\sigma^6 l \quad (C: \text{定数})$$

が成り立つ¹⁴⁾ことを示している。なお、き裂長さ 3 mm 以下で両材のアスペクト比は約 0.38 であり、このことは上式の成立の根拠のひとつとなる¹²⁾。また両材の定数 C の値はほぼ一致している。すなわち、両材のき裂伝ば抵抗はほぼ等しい。

以上述べたことから、 β -STA 処理は、き裂伝ば抵抗にはほとんど影響せず、き裂発生限界応力の増加をもたらしといえる。

4 結 言

Ti-6Al-4V 合金の β -STA 材を用いて、回転曲げ疲労試験を行い、疲労過程を調べるとともに、微小き裂の発生および伝ば過程をレプリカ法により連続観察し、疲労限度の物理的意味および微小き裂伝ば特性を調べ、納入材（焼なまし材）の結果と比較検討した。以下に得られた主な結果を示す。

(1) き裂は焼なまし材では α 相から発生し、 β -STA 処理材では、微細な針状組織に沿って発生する。また、疲労限度の応力を繰返した場合、両材ともにき裂の発生は認められない。したがって、両材の疲労限

度はき裂の発生限界で決まる。

(2) β -STA 処理材の疲労限度は焼なまし材に比べ約 30 % 上昇した。

(3) 両材において、 $dl/dN = C\sigma^6 l$ (C : 定数) の関係が成り立つ。また、両材の定数 C の値はほぼ等しい。

(4) 上記 (1), (2) および (3) の結論は β -STA 処理がき裂伝ば抵抗にはほとんど影響を及ぼさないが、き裂発生限界応力の増大に寄与することを意味する。

終わりに実験に協力された当時九州産業大学卒業研究生の清末賢一、永田英之君に感謝します。

(平成 4 年 11 月 17 日 日本材料学会第 21 回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 戸梶恵郎, 小川武史, 大矢耕二, 材料, **42**, 169 (1993).
- 2) 田中哲志, 西谷弘信, 藤崎 渉, 寺西高広, 本田政彦, 材料, **41**, 1485 (1992).
- 3) 草道英武, 村上陽太郎, 木村啓造, 和泉 修, “金属チタンとその応用” (1983) 日刊工業新聞社
- 4) 幡中憲治, 大木順司, 植野 史, 日本材料学会第 21 回疲労シンポジウム講演論文集, 99 (1992).
- 5) 皆川邦典, 鉄と鋼, **75**, 1104 (1989).
- 6) 小林俊郎, 新家光雄, 材料, **36**, 831 (1987).
- 7) 小林英男, 川田幸男, 中沢 一, 材料, **27**, 859 (1978).
- 8) 浅見克敏, 弘永昌幸, 日本材料学会第 3 回機械・構造物の強度設計, 安全性評価シンポジウム前刷集, 36 (1991).
- 9) J. J. Lucas and P. P. Konieczny, Metallurgical Trans., **2**, 911 (1971).
- 10) 西谷弘信, 野田尚昭, 日本機械学会論文集, A-51, 1442 (1985).
- 11) 西谷弘信, 後藤真宏, 日本機械学会論文集, A-51, 332 (1985).
- 12) 西谷弘信, 後藤真宏, 皮籠石紀雄, 日本機械学会論文集, A-50, 23 (1984).
- 13) 西谷弘信, 田中哲志, 日本機械学会論文集, A-51, 1442 (1985).
- 14) 西谷弘信, 日本機械学会講演論文集, No. 790-13, 63 (1979): H. Nisitani, (Mura, T. edit.), Mechanics of Fatigue-AMD, **47**, 151 (1981) ASME