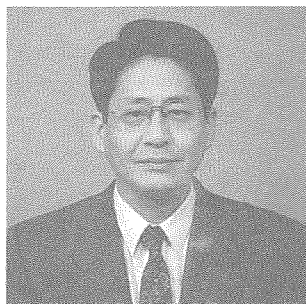


高能率な耐摩耗処理に適した エンジンバルブ用チタン合金棒とその材質特性

Titanium Alloy Bar Suitable for Highly Efficient Wear-Resistance Treatment



高 山 勇^{*(1)}
Isamu TAKAYAMA



山 崎 達 夫^{*(1)}
Tatsuo YAMAZAKI

抄 録

自動車エンジンに適用されるチタン吸気バルブに、簡便な酸化処理によって耐摩耗性を付与するために、酸化処理条件とTi-6Al-4V棒の微視組織を研究した。バルブシミュレーターによる摩耗テストでは、大気中にて820°C、1～4時間の酸化処理をしたチタンバルブが、従来の鉄バルブよりも優れた耐摩耗性を示す。酸化処理中の歪みを抑制するためには、旧 β 粒径が30～60 μ mの針状組織が最適である。

Abstract

To give the wear-resistance to titanium intake valve by simple oxidation treatment, the oxidation condition and the microstructure of Ti-6Al-4V bar were studied. The wear test using a valve simulator shows that the wear of the face oxidized at 820°C for 1 and 4h in air is superior to that of ferrous valve. The best microstructure of Ti-6Al-4V bar is an acicular structure with the prior β grain size of 30 to 60 μ m in average, which prevents distortion during the oxidation treatment and has excellent mechanical properties.

1. 結 言

比重が小さく、強度と耐熱性もあるチタンは、エンジン部品の重量を削減して、優れた燃料効率や大出力のエンジンを実現する方法¹⁾になっているが、鉄部品と比較して十分なコストパフォーマンスがないために、実際には、レーシングカーや特別な限定車に限られて使用されている^{1,3)}。しかし、数あるエンジン部品の中で、高速で上下運動するバルブは、チタンによる軽量化の効果が最大となる。特に吸気バルブは、チタン合金の材料特性に適合しており、排気バルブと比較して、燃焼シリンダー内に多くの空気を導入するために、そのサイズが大きく、また長いストロークで運動するので、軽量化の効果がとりわけ大きい。一方、排気バルブが必要とする高温特性は、既存の耐熱チタン合金では不十分と考えられ、今後、TiAlベースの新材料が適用されるであろう²⁾。

エンジンバルブのフェース部とステム部は、厳しい摩耗条件にさらされる。それゆえ、耐熱鋼製のエンジンバルブは、タフトライド処理や軟窒化処理が行われる⁵⁾。チタン合金製のエンジンバルブでは、例えば、ステム部にモリブデンの溶射が、フェース部に炭化物が分散したチタン基合金が肉盛溶接されているものがある^{2,3)}。チタン合金棒自体が高コストである上に、これらの耐摩耗処理が許容しがたいコスト高を招いてきた。

この抜本的な解決策として、まず、耐摩耗処理の低コスト化の観点から、大気中での酸化処理をチタン合金製吸気バルブの耐摩耗処理として選択し、その処理条件を検討した。また、通常製造される等軸組織の $\alpha + \beta$ チタン合金棒を使う場合、酸化処理の問題は、加熱処理中に許容できない歪み(曲がり)が生じることである。次に、この問題を克服するために、チタン合金の金属組織を検討した。ここでは、 $\alpha + \beta$ チタン合金として、吸気バルブが作動する室温～

^{*(1)} 光製鉄所 生産管理部 チタン管理グループ マネジャー
山口県光市大字島田3434 ☎743-8510 ☎0833-71-5038

^{*(2)} 大阪支店 チタングループ マネジャー

300℃において、優れた機械的性質を持ち、汎用性があることから、Ti-6Al-4Vを検討した。

2. 最適な酸化条件

チタンの酸化の特徴は、 α ケースと呼ばれる硬化層をチタン表面に形成することである。写真1では、表面近くの白っぽい帯として見える。 α ケースは、チタン酸化物であるスケール(写真1には写っていない)の下にあり、母材中に多くの酸素を固溶したものである。 α ケースは、スケールよりもはるかに優れた耐摩耗性があり、厚く形成されると耐久性も向上するが、一方、表面粗さが大きくなり、その修正に研磨工程が必要となる。

2.1 実験方法

図1はエンジンバルブの製造工程を示す。材料は直径7mmのTi-6Al-4Vである。耐熱鋼製バルブと同じように、通電加熱され、アップセット鍛造される。応力除去焼鈍と最終形状への機械加工の後、実験のために各種条件にて酸化され、最後に酸化膜は除かれる。実験用バルブの形状も図1の中に示す。この形状は、4バルブエンジン用の小型バルブに相当している。従来の耐熱鋼製バルブも比較として実験した。耐熱鋼は、日本では吸気バルブ用に最も普及している材料であるSUH11 (Fe-8Cr-1.5Si-0.5C)である。SUH11製バルブの製造工程は、耐摩耗処理が580℃にて30分のタフトライド処理であることを除き、Ti-6Al-4Vとはほぼ同じである。

耐摩耗性を評価するために、図2に示すバルブシミュレーターを使用した。これは、各バルブ部位とバルブに接触する部品の摩耗を加速することができる。バルブのフェースとバルブシートの摩耗は、テスト前後の各厚さの変化により評価した。実験で使ったバルブシートは、吸気用バルブシートとして日本では一般的に使用される焼結Fe-C-Cu合金から作られている。バルブシミュレーターの

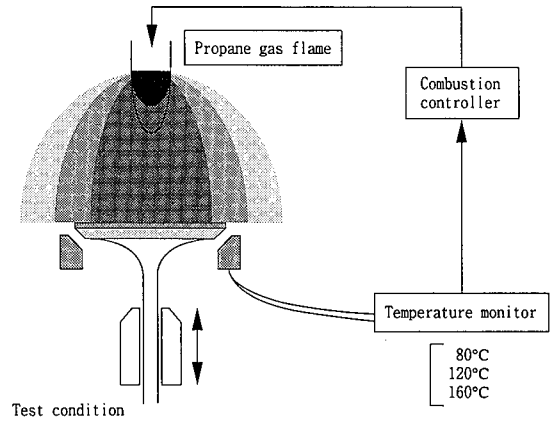


図2 バルブシミュレータの概念図

繰り返し速度は毎分3 000回であり、実際のエンジンにおける6 000rpmに相当する。バルブとバルブシートは、プロパンガス炎により加熱され、バルブシートの底面温度が80, 120, 160℃にて実験した。

2.2 実験結果

720℃での1時間の酸化は、図4に示す表面処理なしとほぼ同じ結果となり、チタン合金バルブのフェースに十分な耐摩耗性を与えることができなかった。770℃での1時間の酸化は良い結果を示したが、硬化層が2~3 μmと薄く、耐久性を保証できない。870℃での1時間の酸化は、表面粗さの好ましからぬ増加を引き起こした。一方、820℃の1時間と4時間の酸化は、完全に受入られる結果を示した。

図3は、酸化処理後のチタンバルブのピッカース硬さ(荷重50g)の深さ方向のプロフィールを示す。600Hv以上に硬化した層の厚さは、820℃の1時間の酸化では約10 μmである。この値は、耐熱鋼製バルブの硬化層の定義及び厚さとほとんど同じである。また、4時間の場合には約22 μmである。

また、図4はバルブとバルブシートの摩耗を示す。チタンバルブの摩耗は、鉄バルブの摩耗よりも少ないのみならず、相手側のバルブシートの摩耗も大幅に低減する。鉄バルブとバルブシートの摩耗は激しく、4.4hの試験時間でエンジンが寿命となるレベルである。このことは、この摩耗試験が非常に厳しいことを示す。また、摩耗試験中にチタンバルブの発する音は、鉄バルブと比較してかなり小さい。

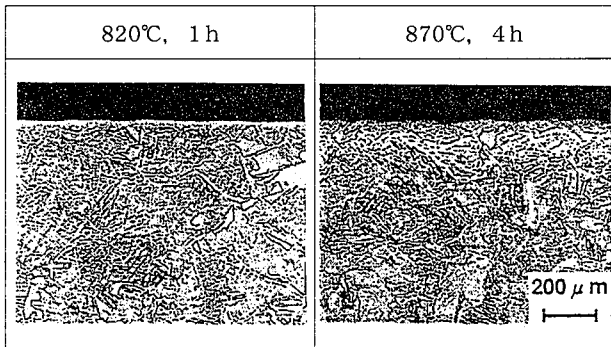


写真1 酸化されたTi-6Al-4Vの表面の硬化層(α ケース)

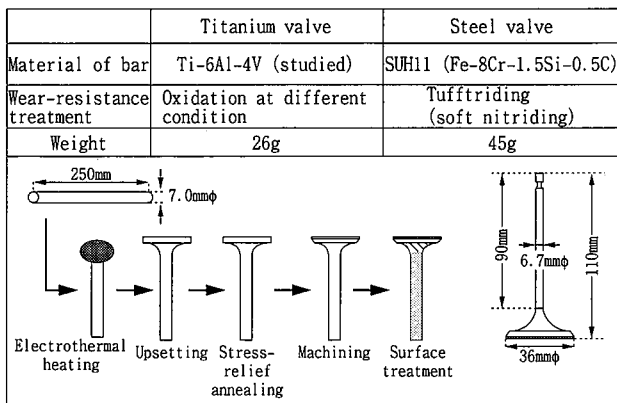


図1 エンジンバルブの製造工程

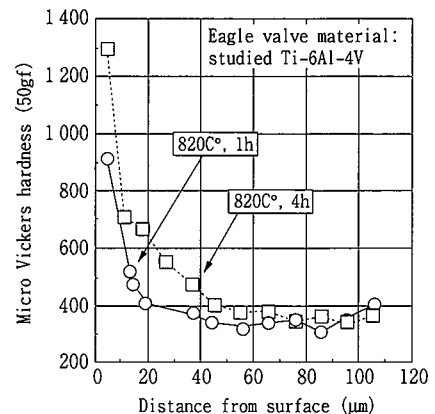


図3 酸化処理後のチタン合金エンジンバルブの表面硬さプロフィール

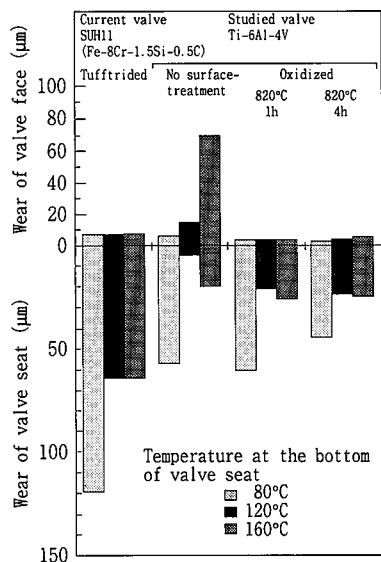


図4 バルブシミュレータによる摩耗テスト結果

3. 酸化処理に適したチタン合金棒

排気バルブのクリープ特性を達成する試みとして、加熱またはβ域での鍛造により得られるTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Siの針状組織が提案されている⁹⁾。しかし、吸気バルブに対するチタン合金棒の組織に関する研究は限られている。特に、耐摩耗処理として酸化を使う目的でチタン合金の組織が研究された例はない。バルブの加熱処理中に許容できない歪み(曲がり)に影響する主要な因子は、化学成分、組織、歪み除去焼鈍、酸化温度、バルブ自体の形、加熱処理中のバルブの姿勢である。

すでに述べているように、酸化処理の深刻な問題は、通常製造されている微細等軸組織のTi-6Al-4Vを使う場合に、加熱処理の間に生じる許容し難い大きな歪みである。これが、多くの研究者や開発者が耐摩耗処理としての酸化を諦めた最大の理由と考えられる。

3.1 実験方法

バルブの重さによる曲がりに及ぼす組織の影響を調査するため

に、簡単な曲がり実験を実施した。その方法は、バルブ表面に形成される酸化膜が真直度の測定を妨げないように、真空中の加熱により行った。そこで、ステム部は互いに80mm離れた2点にて支持され、実験用バルブは最適な酸化温度である820°C近辺にて加熱される(図5参照)。そして、図6に示すように真直度からの曲がりを測定する。この実験に使用されたバルブは、前の実験にて使用されたものと同じであり、写真2で示された様々な組織のものが使われた。針状組織(写真2のAやC)は、β相温度域での加熱または加工によって得られる。微細等軸晶(B)と粗い等軸晶(D)は、温度、時間、冷却速度を変化させながら、α+β相温度域の焼鈍によって得ることができる。

3.2 実験結果

旧β粒が300~1 000 μmの針状組織は、図7のColonyが示す

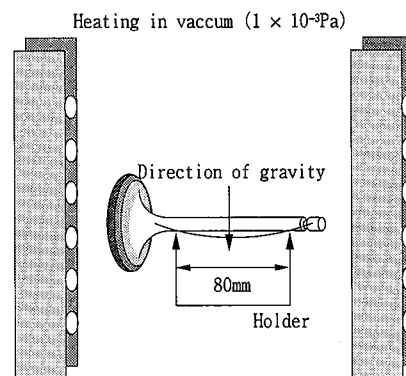


図5 曲がり試験の概念図

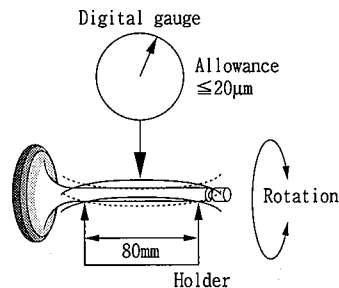


図6 バルブステム部の曲がりの測定方法

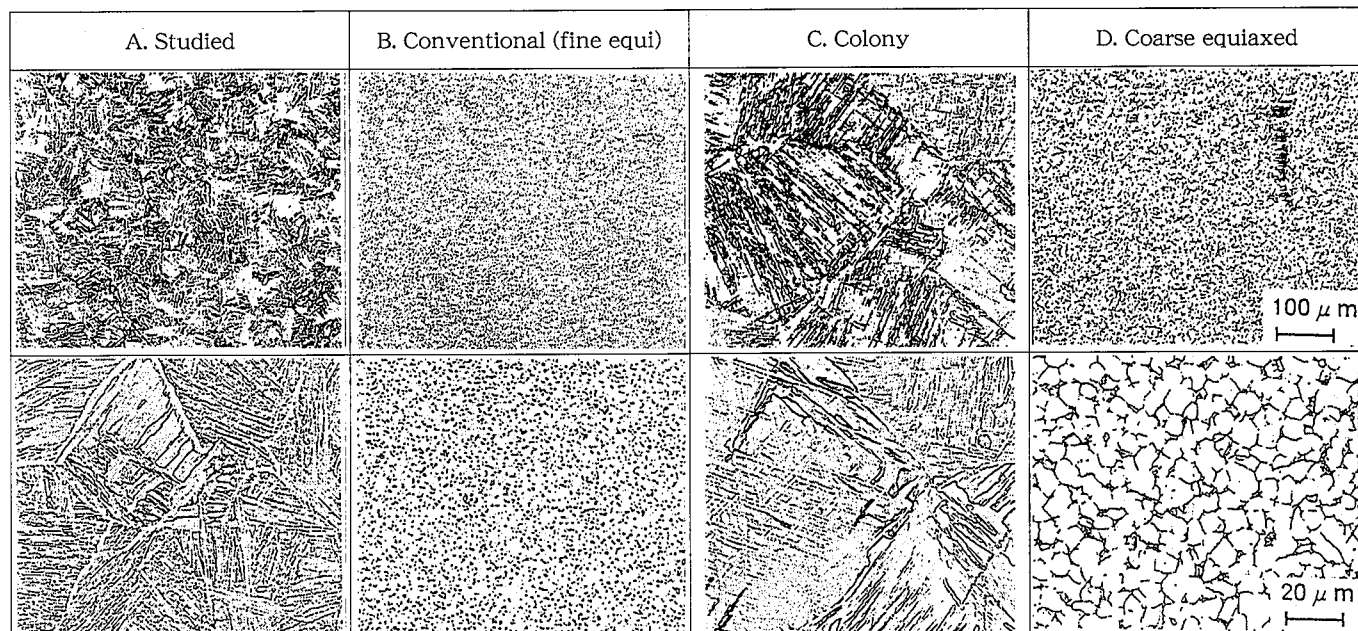


写真2 Ti-6Al-4V棒の種々のマイクロ組織(加工方向断面)

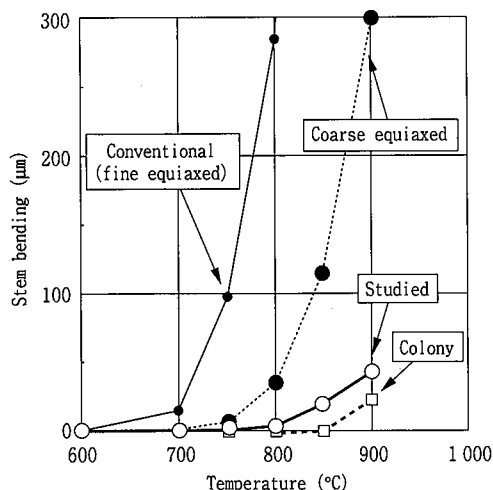


図7 加熱温度とバルブステム部の曲がりの関係

ように、800℃まで全く変形はなかった。しかし、この針状組織の延性は低いので、Ti-6Al-4V線材のコイルから直棒に形を変える場合に、時々表面に割れを発生する。 α 粒の大きさが約10 μ mの粗い等軸粒(図7のColony)のステム部の曲がりは、約2 μ mの α 粒の微細等軸粒(図7のConventional)と比較して、かなり小さいものであった。しかし、この曲がりでも実使用に対して受入れられず、また、粗い等軸組織の疲労強度は、微細組織のその80%程度と低い⁹⁾ことも問題である。

一方、旧 β 粒が30~60 μ mの針状組織(図7のStudied)は、 β 相温度域の比較的低い温度での加工によって形成され、酸化処理中の歪みと機械的性質の両方の観点から最良の組織と考える。この組織の曲がりは、より大きな β 粒のコロニー組織とほとんど同じである。加えて、この組織の機械的性質は次章で示すように優れている。ステム部の曲がりの許容量を20 μ m以下とすると、840℃までの酸化処理をこの最良の組織に適用することができる。一方、微細等軸粒は700℃以上の加熱処理ができないので、良好な耐摩耗性を与えることができないことを意味する。

加熱処理中のバルブの姿勢は、実際の酸化処理では考慮に入れるべきである。バルブステムを垂直に設定する時に曲がりは最小になる。

4.チタン合金棒の機械的性質

図8~11は、2種類の組織のTi-6Al-4V及びSUH11の1000℃までの引張特性を示す。研究されたTi-6Al-4V(写真2のA)に示す微

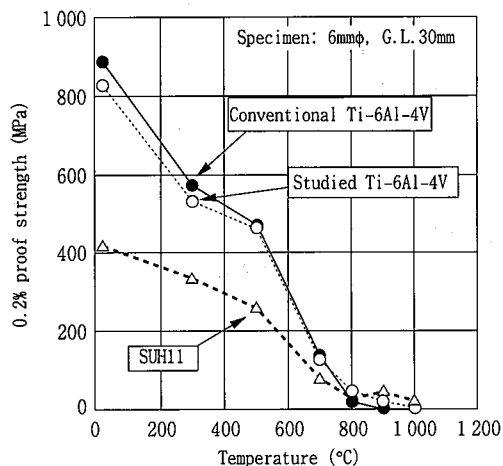


図8 高温引張試験の結果(0.2%耐力)

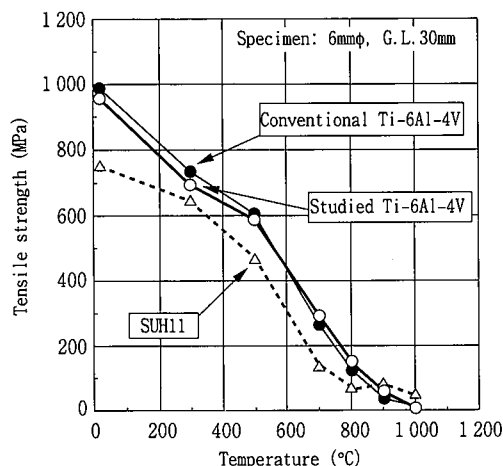


図9 高温引張試験の結果(引張強さ)

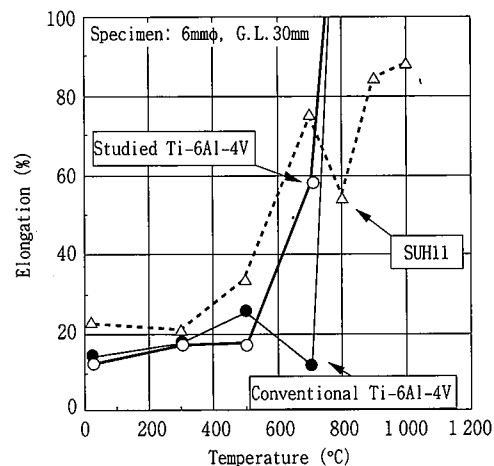


図10 高温引張試験の結果(伸び)

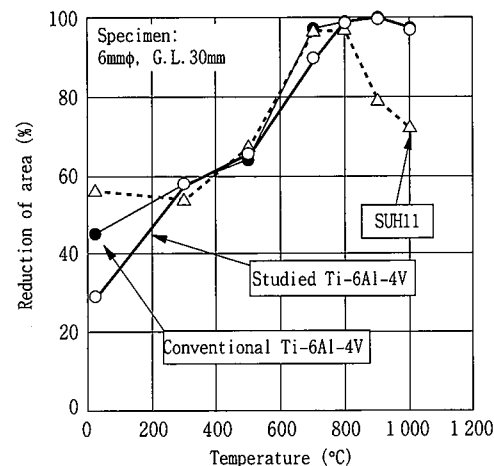


図11 高温引張試験の結果(絞り)

細な旧 β 粒径のものは、全ての試験温度にて通常のTi-6Al-4V(写真2のBに示す微細等軸粒のもの)とほぼ同等の特性であり、また、800℃以下ではその0.2%耐力及び引張強度はSUH11よりも高い。

室温と300℃及び500℃の回転曲げ疲労特性を図12~15に示す。図12に示すように研究されたTi-6Al-4Vの(10の7乗回での)疲労強度は、いずれの温度でも図15に示すSUH11の疲労強度よりも高い。更に、研究されたTi-6Al-4Vの疲労強度は、500℃の微細等軸粒のそれ(図14参照)よりもかなり高い。図12と図13を比較すると分かるが、820℃の1時間の酸化は、どの温度においても、とりわけ室温では疲労強度を減じる。酸化後の室温での疲労強度は、300℃や500℃よりも低い。この劣化の理由は、耐摩耗性をもつ α ケー

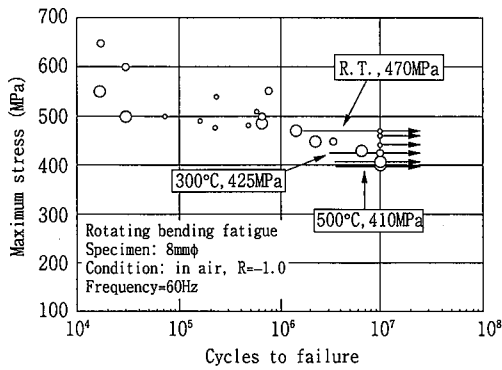


図12 研究されたTi-6Al-4VのS-Nカーブ

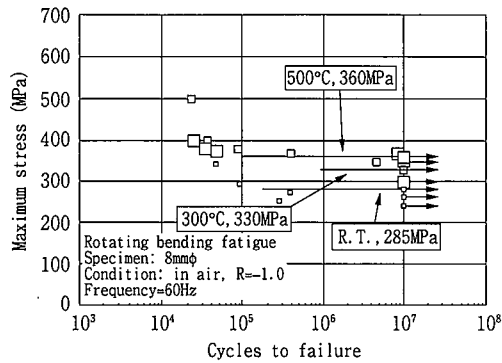


図13 研究されたTi-6Al-4Vを820°C, 1hの酸化処理した後のS-Nカーブ

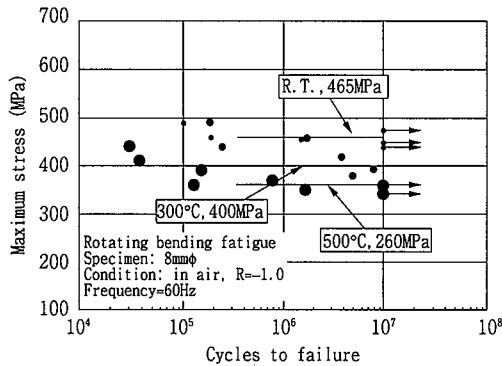


図14 通常のTi-6Al-4VのS-Nカーブ

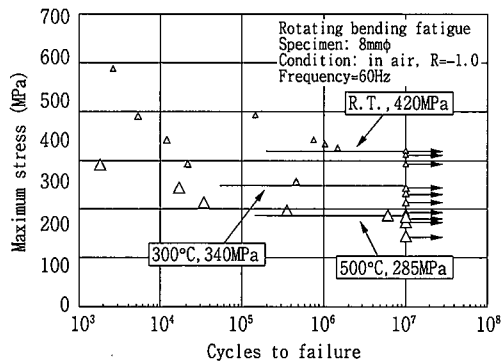


図15 SUH11 (Fe-8Cr-1.5Si-0.5C)のS-Nカーブ

スが室温にて十分な強度を持っていないからと推定される。

しかし、酸化されたTi-6Al-4Vの疲労強度は、バルブのヘッド部のフィレットに負荷される推定応力(35~70MPa)よりもかなり高い¹⁾。もしも負荷応力がこの疲労強度に近いならば、バルブヘッド部のフィレットの上のαケースは、その部分は耐摩耗性も不要であるので取り除くべきである。

500°CでのTi-6Al-4VとSUH11のクリープ特性が図16で比較されている。微細な旧β粒のTi-6Al-4Vの定常クリープ速度は、SUH11と微細等軸粒のTi-6Al-4Vの両方よりも優れている。-50
新日鉄技報第375号(2001)

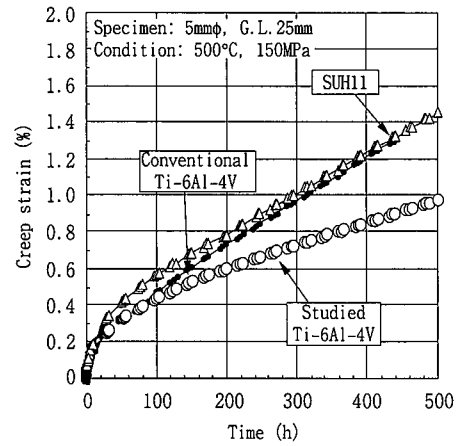


図16 研究されたTi-6Al-4Vのクリープ挙動

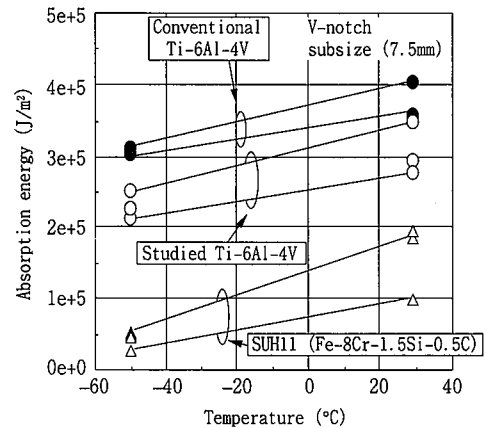


図17 研究されたTi-6Al-4Vのシャルピー衝撃特性

°Cと28°Cシャルピー衝撃特性は図17に示した。微細な旧β粒のTi-6Al-4Vの吸収エネルギーは両温度にて十分大きい。

5. 結 言

耐摩耗処理としてチタン吸気バルブに簡便な酸化を適用するために、酸化条件とTi-6Al-4Vの組織が研究された。主要な結果は以下の通りである。

- (1)最適な酸化条件は、大気中での820°Cにて1~4時間の加熱である。バルブシミュレーターを用いたテストにおいて、最適な酸化条件にて処理されたチタンバルブの摩耗特性は、現行の鉄製バルブと比較して大変優れている。更に、鉄バルブの場合と比較して、チタンバルブの場合には、相手側のバルブシートの摩耗も大幅に少ない。
- (2)吸気バルブ用の最良の微視組織は、旧β粒径が30~60μmの針状組織である。この微視組織は、酸化処理の間の曲がりやを避け、優れた機械的特性を有する。
- (3)酸化処理と微視組織の組合せは、高いコストパフォーマンスのチタン吸気バルブを実現する新しいアイデアである。この技術より製造されるチタンバルブは、近い将来、商用自動車の燃料効率の改善等の特性向上に大きく寄与するであろう。

参考文献

- 1) Allison, J.E., et al. : Journal of Metals. 39(2), 14 (1987)
- 2) Rudinger, K., et al. : Titanium Science and Technology. 1. 1973, p.185-199
- 3) Takahashi, W., et al. : SAE Paper, No.900535, 1990
- 4) Dowling, W.E., et al. : SAE Paper, No.930620, 1993
- 5) Automotive Engineers' Hand Book of JSAE 4. 1991, p.205-207
- 6) Lütjering, G., et al. : Titanium Science and Technology. 4. 1985, p.2065-2083