

軽量チタンアルミピストンピンの開発

Development of Lightweight Titanium-aluminide Piston Pin

湊 定 美*
Sadami MINATO

小那覇 安 則*
Yasunori ONAHA

要 旨

ABSTRACT

じん性と疲労強度を向上させた金属間化合物チタンアルミ材料とその部品化プロセスを開発した。低比重かつ高弾性率の特性を生かしてピストンピンに適用し、従来の窒化鋼ピストンピンに対して 17%の軽量化と 28%の高剛性化を実現した。2005 年から 2 レースイベント保証となった V10 エンジンの高回転高出力化と長距離信頼性に貢献した。

An intermetallic titanium aluminide material displaying increased fracture toughness and fatigue strength, and a process enabling the formation of the material into components, have been developed. Exploiting the material's low specific gravity and high modulus of elasticity, it was employed to manufacture a piston pin, enabling the achievement of a 17% reduction in weight and a 28% increase in rigidity against a conventional nitriding steel piston pin. The developed piston pin has contributed to increased speed, power and long-distance reliability in V10 engines, which have been required to complete two race distances since 2005.

1. まえがき

チタンアルミ(以下 TiAl)は F1 材料規制上限の高い比剛性と高耐熱強度のみならず、常温域でも優れた疲労特性を有する。このため常に軽量化を要求されるレシプロ主運動部品への展開が模索された。しかしながらエンジンバルブで採用したヨーロッパ材⁽¹⁾はじん性の低さと品質に懸案があり、また一社寡占供給による開発余力不足など課題が大きかった。

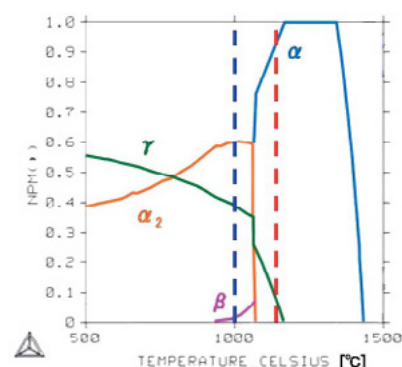
本開発ではじん性と強度を両立する高品質の TiAl 材を独自開発し、ピストンピンに適用してレシプロマシ低減によるエンジン高回転化に貢献することを目的とした。

2. 開発技術

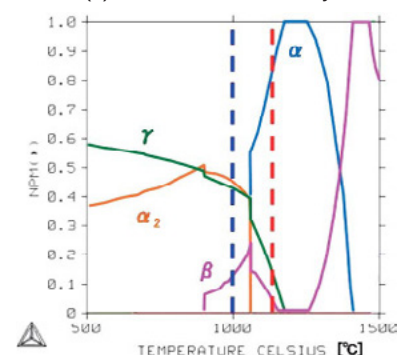
2.1. 材料設計

TiAl の強度、じん性を向上させる手法として、まずはインゴット鑄造後の粗大ラメラ組織を押し出し加工にて微細化することが重要である。19 mm 径の素材サイズが必要なピストンピンは必然的に押し出し比が不足するため、最終的な熱間塑性加工温度である 1150 °C における材料組織を金属間化合物の γ 相(TiAl)、 α 相(hcp-Ti)および β 相(bcc-Ti)の 3 相共存となる成分設定として加工微細化を促進させた。

*四輪R&Dセンター



(a) Conventional TiAl alloy



(b) Developed TiAl alloy

-- Extrusion temp. -.-.- Annealing temp.

Fig. 1 Comparison of phase ratio (Thermo-Calc)

また最終組織において強じん性に優れる準安定相の β 相を積極的に活用することが延性向上のポイントであり、焼鈍温度である1000℃で β 相が安定して多く出現する成分設計とした。サーモカルク⁽²⁾による組織と相比の結果を Fig. 1 に示す。

2.2. 素形プロセス

開発材では溶湯を電磁攪拌しながら凝固させるスカル溶解連続鋳造法を採用し、均質なインゴット組織を得た。

TiAl は熱間変形抵抗が高く、ステンレスシートでキャニングしてワークの温度低下を抑えながら 1200℃から 1350℃域で熱間塑性加工される^{(1), (3)}。開発材では専用の酸化防止剤を選定してダイスのガラス潤滑剤と併用することにより変形抵抗を低減し、プロセス中の微細化が促進される低温側の 1150℃から 1200℃域において押し出し比 58 の強加工を可能とした。

最終的には 1000℃ x 2 hr の焼鈍とその後の強制冷却(Ar ガス冷却)により材料組織中の β 相を 20%から 35%確保することで 2%以上の安定常温伸びと 800 MPa 以上の常温疲労強度(回転曲げ)を両立した。本素形プロセスの各種条件下における材料組織構成(相比)と、その機械特性への影響を Fig. 2 に示す。

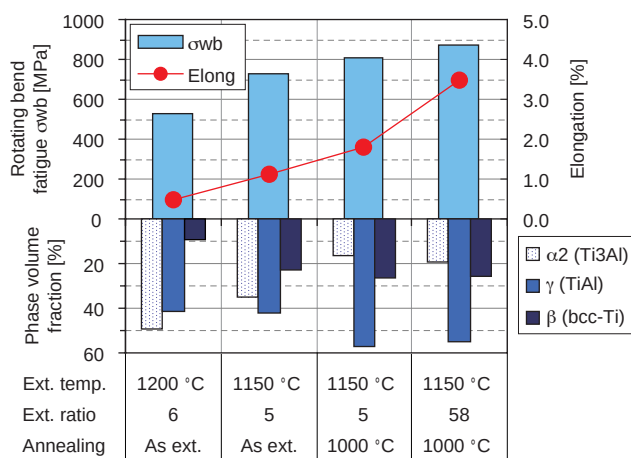
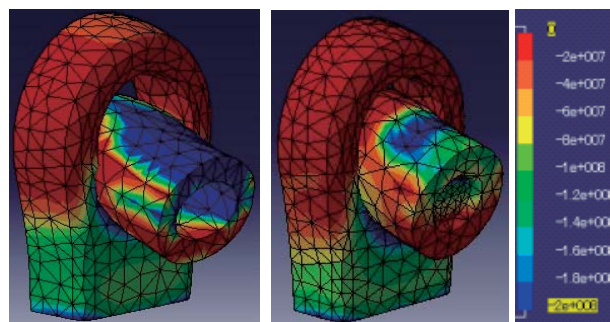


Fig. 2 Effect of phase structure on mechanical properties

3. 部品仕様

部品形状はピストンピン自身の強度成立性とピストンへの影響をCAEおよび応力測定で検証し、従来窒化鋼の中空パイプ形状ではなく中実形状とした。これにより17%の軽量化を図りながらつぶれ方向の剛性を28%向上させ、信頼性課題があったピストンピンボス部の応力を6%低減した。CAE 解析による変形形態の比較を Fig. 3 に示す。

また表面処理は TiAl 化に伴う母材硬度の低下を考慮して、PVD スパッタ法で成膜した厚膜 7 μm の Cr₂N をバツ



(a) Conventional steel (b) Developed TiAl

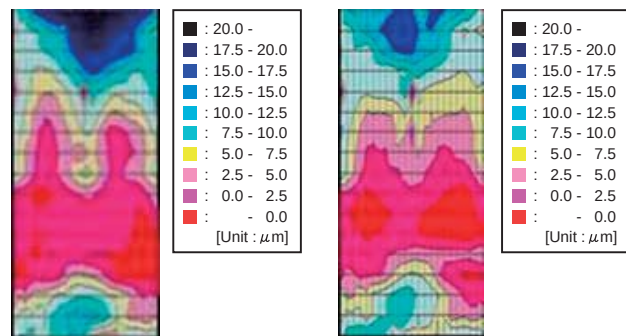
Fig. 3 Piston pin deformation (Catia V5 CAE)

クアップ層に持つ高硬度のダイヤモンドライクカーボン皮膜(以下DLC)とし、密着強度と耐スクラッチ性を向上させている。

4. 性能効果

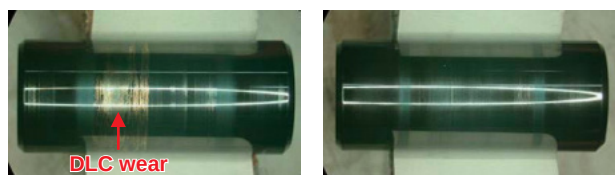
中実 TiAl ピストンピンを 200 rpm 高回転化したエンジン高負荷耐久モードで評価し、軽量化効果として従来の窒化鋼と同等のコンロッドベアリング磨耗レベルを確保した。

また高剛性化の効果として、長距離信頼性の懸案であったピストンピン DLC 磨耗とピストンボスクラックを解消した。Fig. 4 に耐久テスト後のコンロッドベアリング表面オーバーレイ層の残存膜厚を、また Fig. 5 に同耐久テスト後のピストンピンの DLC 状態を従来仕様との比較で示す。



(a) Conventional steel (18800 rpm/1503 km) (b) Developed TiAl (19000 rpm/1485 km)

Fig. 4 Overlay thickness of connecting rod bearing after endurance test



(a) Conventional steel (18800 rpm/1503 km) (b) Developed TiAl (19000 rpm/1485 km)

Fig. 5 DLC condition of piston pin after endurance test

5. まとめ

成分設計と素形プロセスでの材料組織制御により高い疲労強度と優れたじん性(伸び2%以上)を両立するTiAl材を開発した。本材料をピストンピンに適用することで17%の軽量化を図り、200 rpm のエンジン回転数向上と、ピン変形低減による DLC 磨耗およびピストンピンボス部の信頼性向上に寄与した。

謝 辞

本材料および部品開発に御尽力を頂いた(株)神戸製鋼所チタン事業部、並びにコベルコ科研(株)の方々に対し、誌面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Clemens, H., Kestler, H., Eberhardt, N., Knabl, W. :
PROCESSING OF TiAl BASED ALLOYS ON AN
INDUSTRIAL SCALE, The Minerals, Metals & Materials
Society, Gamma Titanium Aluminides 1999, p.209-223
(1999)
- (2) <http://www.thermocalc.se/>, 2009/04/02
- (3) 特開 2000-24748

■ 著 者 ■



湊 定美



小那覇安則