

技術資料



Technical Data

高温特性に優れたタービンホイール用 TiAl 合金の開発

小柳禎彦*, 鷺見芳紀*, 高林宏之*

Development of Titanium Aluminide Alloy with Good High Temperature Properties for Turbine Wheel

Yoshihiko Koyanagi, Yoshinori Sumi, and Hiroyuki Takabayashi

Synopsis

Recently, exhaust gas temperature of a gasoline engine is rising over 1000 °C to improve fuel consumption and reduce toxic gases by stoichiometric combustion. TiAl alloy has been already recognized to be adequate for a turbine wheel of turbocharger in both gasoline and diesel engines for its lightweight and good heat-resistance.

A new TiAl alloy, DAT-TA3 (Ti-31.8Al-7.5Nb-1.0Cr-0.35Si-0.1C mass%), with good high temperature properties was developed for turbine wheels. It has been verified that DAT-TA3 has higher creep strength than that of our previous developed alloy, DAT-TA2 (Ti-31.8Al-7.5Nb-1.0Cr-0.5Si-0.03C mass%), and good manufacturability for mass production. DAT-TA3 turbine wheel has been already evaluated by some customers.

1. はじめに

近年、先進国を中心に自動車の燃費規制が強化されており、燃費改善技術の一つとしてエンジンを小型軽量化し、出力低下をターボチャージャーで補うダウンサイジング化が欧州を中心に盛んである。一方で、燃費改善に伴いエンジンの排ガス温度は高まって¹⁾おり、ターボチャージャーが要求される耐熱性も上昇している。特に、直接排ガスを受けるタービンホイールやタービンハウジングの耐用温度は最高 1050 °C が要求される。

TiAl 合金は超合金の約半分の密度で優れた高温特性を示すことから超合金の代替耐熱材料として従来から期待されており、特にタービンホイールのような回転体ではその軽量性によりターボチャージャーの性能を高めることが可能となる。1999 年度に大同特殊鋼(株) (以下、当社という) が世界で初めて自動車用ターボチャージャーのタービンホイールとして市販車への採用を実現^{2), 3)}して

以来、15 年間にわたり 12 万個以上の製造実績がある。これまでにディーゼルエンジン向けおよび低温のガソリンエンジン向け TiAl 合金として DAT-TA1、更に耐熱性を高めた高温ガソリンエンジン用の DAT-TA2 を開発してきているが、排ガス温度の上昇に伴い更なる耐用温度向上の要求がある。

そこで、従来の高温対応材である DAT-TA2 をベースに、製造性を維持しながら高温強度を向上する C 量と Si 量を最適化した DAT-TA3 を開発したのでその特性を紹介する。

2. 合金組成

Table 1 に当社が開発したタービンホイール用 TiAl 合金の化学組成を示す。タービンホイールは形状が複雑なため精密鑄造法 (ロストワックス法) で製造されるのが一般的であり、TiAl 合金製タービンホイールでも同様に

2014年 11月 3日 受付

* 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel, Co., Ltd.)

精密鑄造法にて製造される。一般に、TiAl合金ではNbを添加することで高温強度と耐酸化特性が向上する^{4), 5)}とされているが、多量の添加はこの鑄造性を阻害するだけでなく、密度が高いためTiAlの軽量性が損なわれてしまう。

そこで、Nb量は高温特性と製造性を考慮し7.5%としている。また、CとSiはいずれも高温強度を向上させる元素だが、多量の添加は靱延性の低下を招くため製造性を考慮し、DAT-TA2対比でC量を0.03%から0.10%に増加し、Si量を0.50%から0.35%に減少した。また従来材同様に延性を向上させるためCrを添加し、 γ 相(TiAl)と α_2 相(Ti₃Al)とが層状構造となるラメラ組織が得られるようAl量を調整している。

3. 実験方法

当社では、Ti合金およびTiAl合金の鑄造品は独自の製造方法であるレビキャスト法⁶⁾(Levitation Melting and Casting)にて製造している。レビキャスト法では、溶解は水冷銅坩堝内で行われるため不純物の混入による溶湯の汚染が少なく、高い清浄度を得ることが可能で

ある。また、鑄造は減圧吸引法(Counter Gravity Low Pressure Casting)で実施され、翼先端で最薄0.5mmの製品が鑄造可能である。

本報ではレビキャスト法により ϕ 10mm×60mmの丸棒試験片を鑄造し、鑄造のままの状態でご特性を評価した。なお、当社のTiAl製タービンホイールは熱処理が不要であり、鑄造のままの状態で使用されている。比較として従来材であるDAT-TA1、DAT-TA2も同様に評価した。

4. 結果

4. 1 ミクロ組織

Fig. 1に鑄造のまま状態でのDAT-TA3および既存材であるDAT-TA1、DAT-TA2のミクロ組織を示す。TiAl合金は γ 相(TiAl)と α_2 相(Ti₃Al)とが層状構造となるラメラ組織により高温強度が高いことが知られている。Fig. 1に示すように、DAT-TA3はDAT-TA1およびDAT-TA2と同様に全面ラメラ組織を呈しており、高温特性に優れた組織となっている。

Table 1. Chemical composition of developed titanium aluminide alloys (mass%).

Material	Ti	Al	Nb	Cr	Si	C
DAT-TA1	Bal	33.5	4.8	1.0	0.20	-
DAT-TA2	Bal	31.8	7.5	1.0	0.50	0.03
DAT-TA3	Bal	31.8	7.5	1.0	0.35	0.10

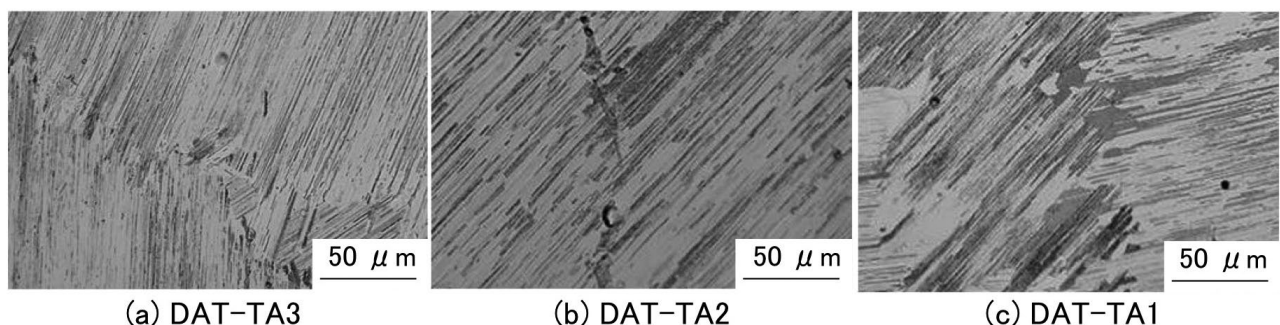


Fig. 1. Microstructures of (a) DAT-TA3, (b) DAT-TA2 and (c) DAT-TA1 in as-cast ing condition.

4. 2 機械的性質

4. 2. 1 引張特性

Fig. 2 に 鋳造のまま状態での室温から 1050 °C までの引張特性を示す。DAT-TA3 は低温域 (<600 °C) では従来材と同程度の引張強度を示し、0.2 % 耐力については延性が低いため評価できていないが、600 °C 以上では従来材より高い引張強度と 0.2 % 耐力を示す。一方で、延性は従来材より低いため取扱いには注意が必要である。

4. 2. 2 クリープラプチャー強度

Fig. 3 に 鋳造のまま状態での 800 °C から 1050 °C におけるクリープラプチャー特性を示す。タービンホイールは高温で 20 万 rpm 以上の高速で回転するために翼部に

遠心力が負荷され、翼部の変形が進むとタービンハウジングと接触し破損するため、クリープ特性は耐用温度を決める重要な特性である。DAT-TA3 のクリープラプチャー強度は全温度域で最も高く、ラーソンミラーパラメーターから算出される耐用温度では DAT-TA1 対比で最大 +50 °C、DAT-TA2 対比で最大 +20 °C の耐用温度上昇が見込まれる。

また、タービンホイールなどの回転体では密度が大きいほど遠心力が大きくなるため、密度差を考慮した比クリープラプチャー強度で評価すると、タービンホイール用材料として最も多く使用されている Inconel713C (Ni-12.5Cr-4Mo-6Al-0.7Ti-Zr-B mass%) と同等以上の比クリープラプチャー強度を示す。

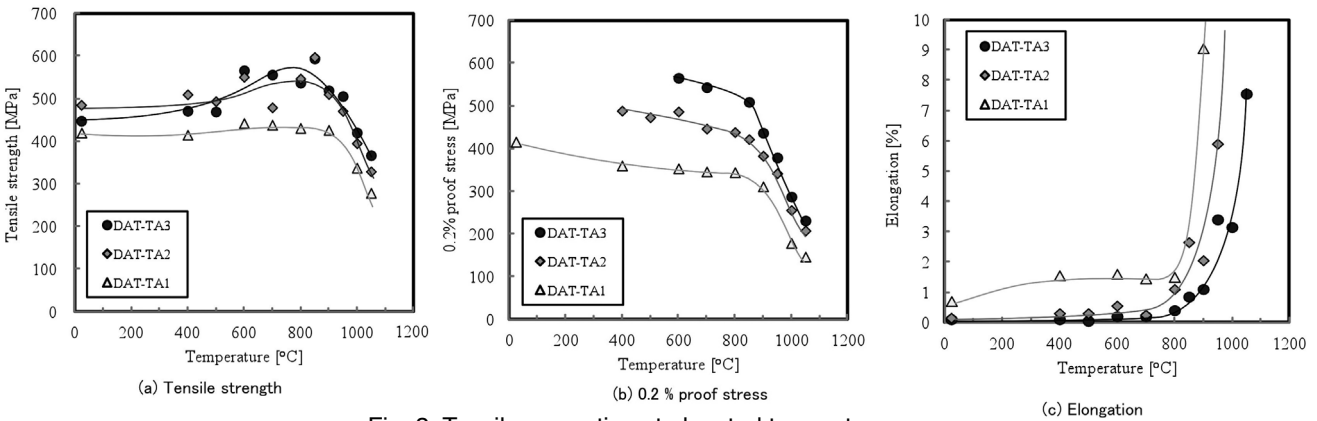


Fig. 2. Tensile properties at elevated temperatures.

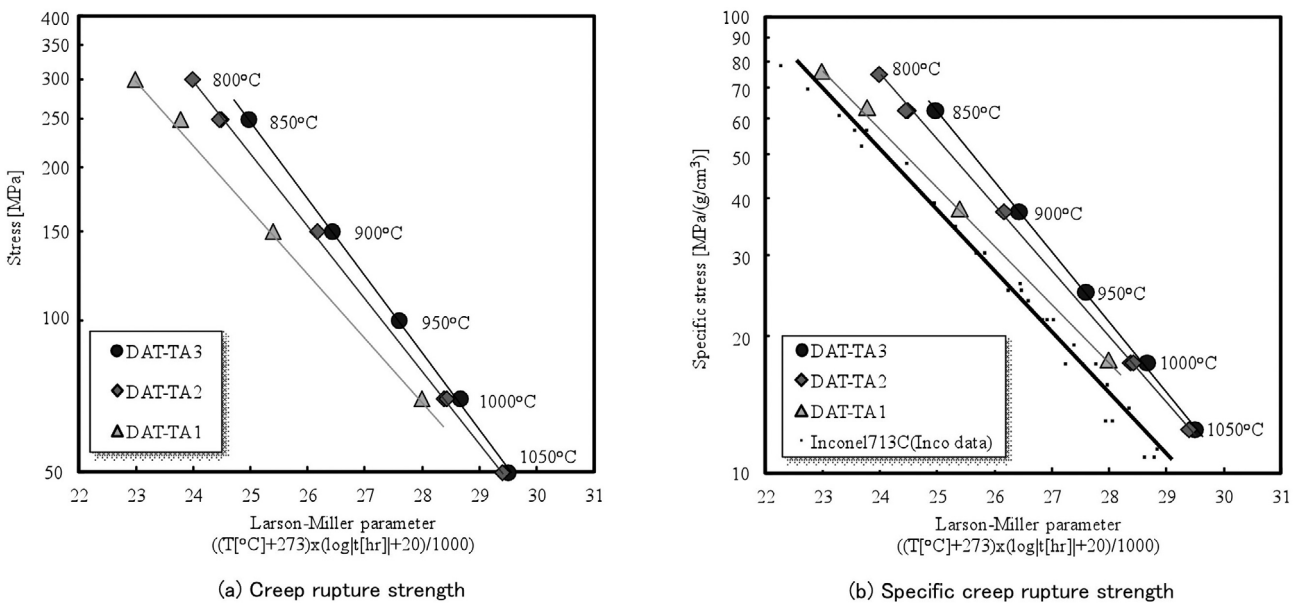


Fig. 3. Creep rupture property.

4. 2. 3 疲労特性

タービンホイールは使用中に排ガスを受けて翼先端が振動することがあり、20万rpmという回転数を考慮すると高サイクル疲労特性は重要な特性である。一方で、アクセルのON/OFFなどの回転数の急激な変動により、タービンホイールの翼根元には負荷が発生するため低サイクル疲労特性も重要である。

Fig. 4に铸造のまま状態での500℃から900℃の小野式回転曲げ疲労試験における 10^7 回疲労強度を示す。DAT-TA3はいずれの温度でも高い 10^7 回疲労強度を示し、排ガスによる翼先端の振動に優れた耐性を示すと考えられる。また、Fig. 5に800℃での低サイクル疲労強度を示す。DAT-TA3は高温での低サイクル疲労強度が高く、タービンホイールでの加減速などの繰り返し変動に対しても優れた特性を示すと考えられる。

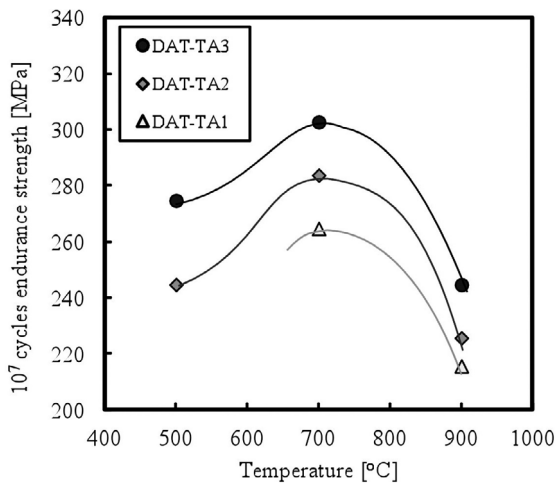


Fig. 4. Rotating bending fatigue property at high temperature.

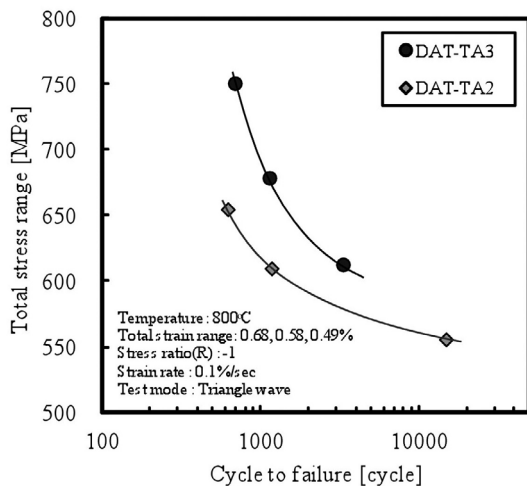


Fig. 5. Low cycle fatigue property at 800 °C.

4. 3 高温酸化特性

Fig. 6に900℃から1050℃の繰り返し酸化特性を示す。試験は大気中で加熱と冷却を交互に繰り返し、加熱(30min)⇔冷却(30min)を1サイクルとして200サイクル後の酸化増量を評価した。TiAl合金の大気中の耐酸化特性は1050℃で急激に劣化し、いずれのTiAl合金においても著しく酸化が進行する。しかし、DAT-TA3の耐繰り返し酸化特性は1050℃ではDAT-TA2より僅かに劣るものの、1000℃まではほぼ同等で軽微である。また、本試験は大気中で実施したが、実用環境ではエンジンで燃焼後の排ガスに曝されるため大気中より酸化損傷はマイルドと考えられ、実用環境での酸化状態で考慮する必要がある。

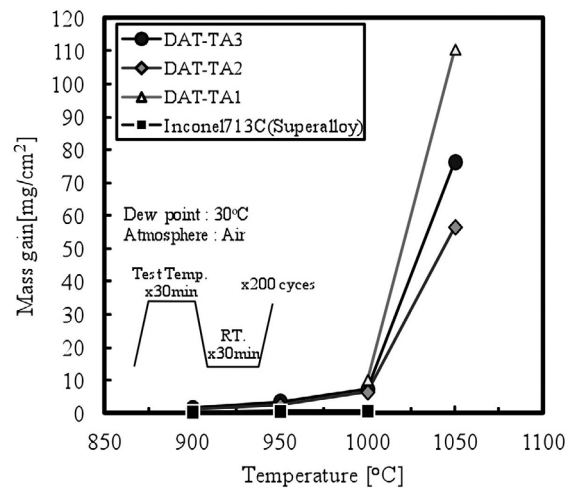


Fig. 6. Mass change after cyclic oxidation test in air.

4. 4 製造性

DAT-TA3は既に1000個以上のタービンホイールの試作に使用しており、従来材と遜色ない製造性であることを確認している。しかし、タービンホイールの製造性は形状の影響を大きく受けるため、製品形状については設計者との確認が重要である。

5. まとめ

従来の高温対応材である DAT-TA2 をベースに耐用温度の向上を図った DAT-TA3 を開発した。DAT-TA3 はクリーププラプチャー特性では DAT-TA2 対比最大 +20 °C の耐用温度の向上が見込まれ、これまでより高い排ガス温度で使用可能と考えられる。Fig. 7 に超合金も含めたタービンホイール用材料の想定耐用温度を示すが、DAT-TA3 は既存の Ni 基超合金の半分程度の密度にも関わらず、Inconel713C が使用できない温度域まで使用できる可能性がある。現在、一部客先にて耐久試験を合格しており、今後の排ガス温度の上昇に合わせて需要が見込まれる。

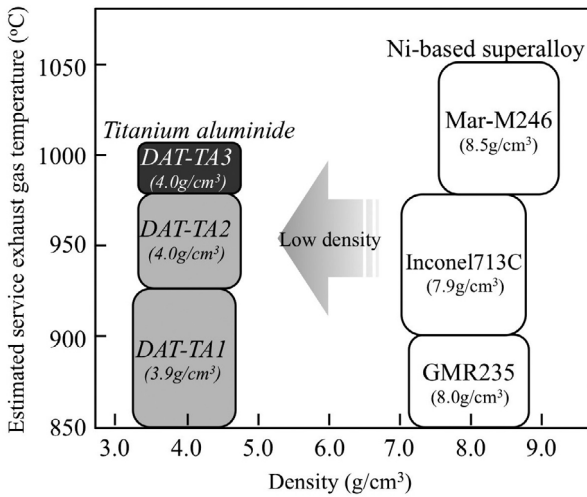


Fig. 7. Estimated service exhaust gas temperature of various turbine wheel materials.

(文 献)

- 1) 萩田敦司: 特殊鋼, 56(2007) 7, 42.
- 2) 京谷美智男: 電気製鋼, 70(1999), p.223.
- 3) 鉄井利光, 京谷美智男, 三浦義光: 三菱重工技報, 37(2000), p.54.
- 4) J. B. McAndrew and H. D. Kessler: JOM, 8(1956), p.1348.
- 5) 志田善明, 穴田博之: 日本金属学会誌, 58(1994), p.754.
- 6) 出向井登, 一柳信吾, 芝田智樹, 宮谷仁志: 電気製鋼, 62(1990), p.12.