

技術資料


 Technical Data

高強度 β 型 Ti-Mn 系合金の開発

鷺見芳紀*¹, 池田勝彦*²

Development of High Strength β Type Ti-Mn Alloy

Yoshinori SUMI and Masahiko IKEDA

Synopsis

β titanium alloys have been applied to aerospace products, especially parts that require high strength such as landing gears, because of their good cold workability and ability to enhance strength by heat treatment. These alloys also have beneficial properties like good corrosion resistance and bio-compatibility; therefore, they are expected to be used in seawater plants and bio-medical applications. However, common β titanium alloys contain V, Mo as β stabilizer elements, which rarely exist in the Earth's crust; therefore, these can make the alloy's cost high and unstable. We have developed a novel β type Ti-Mn alloy in order to lower the material cost. This newly developed Ti-10Mn-3Al-1Fe (mass%) alloy shows excellent strength compared to other common β alloys, while maintaining the good cold formability.

1. はじめに

チタン合金は、鋼材のおよそ半分の比重と高い強度を備え、比強度に優れることから航空機部材などへ適用されてきた他、近年では民生品への適用も増えている^{1), 2)}。また、優れた耐食性や生体との適合性の良さを生かして海水プラント用途や生体用インプラント用途としても重用されている³⁾。その中でも β 型チタン合金は冷間加工性に優れ、熱処理により高強度化が可能であることから航空機ランディングギアなどに使用されている。しかし β 相を安定化させるために Mo, V などの希少かつ高価な添加元素を多量に含有しているために高コストとなること、レアメタル市況の影響を受けやすく価格高騰や供給の不安定性が問題であった。

これまでにこれら希少元素の代替として Cr を使用した Ti-Cr-Fe-Al 合金が実用化されている⁴⁾。他には地殻資源として豊富な Mn を用いた合金としては Ti-8Mn

$\alpha + \beta$ 合金がある⁵⁾。しかし Fig. 1 に示す通り Mn は高い蒸気圧を持つため、チタン合金の溶解で一般的な真空溶解では揮発を避けられず、合金組成の制御が困難かつブローホールなどの casting defect を招きやすいことから、Mn 系合金は一般的ではなかった。著者らは大気圧アルゴンガス雰囲気下で溶解可能なレビテーション溶解法を用いることで Mn を安定添加できることを見出した。また、池田らは Ti-Mn 2 元系合金にて Mn 含有量の組織におよぼす影響を調査し、Mn 量が 8.7 % (mass%) 以上において β 型合金が作製可能なことを示した⁶⁾。今回、著者らは Mn, Al, Fe といったいずれも入手性に優れる元素のみからなり、強度に優れる β 型 Ti-Mn 合金を開発した。

本稿では、合金設計として調査した Ti-8 ~ 12Mn-3Al-1Fe (mass%) 合金の基礎特性について述べた後、開発した Ti-10Mn-3Al-1Fe 合金の特性について紹介する。

2016年10月7日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 関西大学 化学生命工学部, 工博 (Dr. Eng., Materials and Bioengineering, Kansai University)

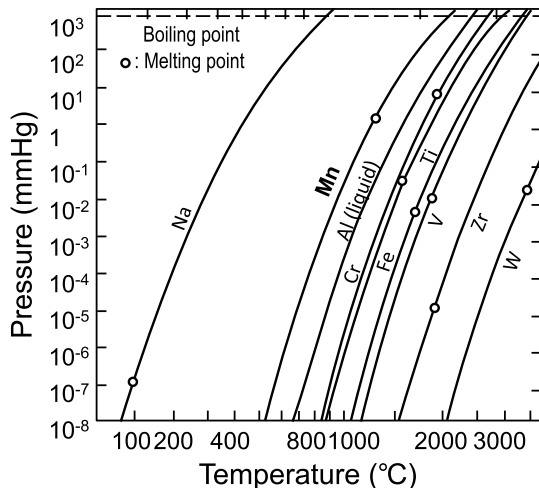


Fig. 1. Vapour pressure of various metals.

2. Mn含有量の影響

2. 1 実験方法

Table 1 に供試材の組成を示す。2 元系にて β 合金が得られた Ti-8.7Mn 合金をベースとし⁶⁾、製造安定性を確保するために Al を 3 % 添加した。また、原料コストを抑制するために、低純度のスポンジチタンを原料とすることを考慮し Fe を 1 % 添加した 4 元系合金とすることとした。最適な Mn 量を調査するため、8 % ~ 12 % の範囲で Mn 量を変化させた 5 種類の合金を作製した。水冷するつばレピテーション溶解炉を用い、10 kg のインゴットを作製し、熱間鍛造により直径 18 mm の丸棒とした。熱処理は溶体化処理 (ST: Solution Treatment) を実施した。1113 K にて 3.6 ks 保持した後、水冷して溶体化組織を得た。引張試験片は平行部直径 6.25 mm の ASTM3 号試験片を作製した。シャルピー試験片は JIS に準拠し、2 mmU ノッチ試験片を作製し試験に供した。回転曲げ疲労試験は平行部が直径 8 mm の試験片を作製し、回転速度 3500 rpm にて試験した。

Table 1. Chemical composition of experimental alloys.

Alloy	Mn	Fe	Al	Ti
8Mn	8.0	1.0	3.0	Bal.
9Mn	9.0	1.0	3.0	Bal.
10Mn	10.0	1.0	3.0	Bal.
11Mn	11.0	1.0	3.0	Bal.
12Mn	12.0	1.0	3.0	Bal.

mass%

2. 2 実験結果

1113 K にて溶体化処理後の光学顕微鏡下マイクロ組織を Fig. 2 に示す。いずれの合金も β 相単相組織を示す。組織を構成する相は X 線回折パターン (XRD) によっても確認したが、いずれの合金でも β 相からの回折ピークのみが検出された (Fig. 3)。

室温における引張試験結果を Fig. 4 に示す。引張強度、0.2 % 耐力いずれも、Mn 含有量が 8 ~ 11 % までの間で Mn 量の増加と共に増加する。しかし 12 % まで増加してもそれ以上の強度向上は得られない。8 ~ 10 % までの間では Mn 量の増加と共に伸びも増加し、10 % が延性に最も優れるが、これ以上添加量を増やすと伸びが低下し、12 % Mn 材は全く延性を示さない。Fig. 5 に 2 mmU ノッチシャルピー試験の結果を示す。シャルピー吸収エネルギーは 10 % Mn までは Mn 量とともに増加するが、Mn 量が 11 % 以上では吸収エネルギーは低下する。

Mn 量が 10 % までは強度・韌延性いずれも Mn 増加とともに向上するという挙動は、同系統の材質・組織では強度と延性はトレードオフの関係になるという一般的な関係からは奇異に見えるが、これは恐らく β 相安定化元素である Mn の増加と共に β 相の相安定性が向上するとともに、 ω 相の析出を抑制するためと推察される。今後の詳細な検証が必要である。

これらの結果から強度、韌延性のバランスに最も優れる最適な Mn 量は 10 % であることがわかるので、Ti-10Mn-3Al-1Fe を最適成分として選定した。

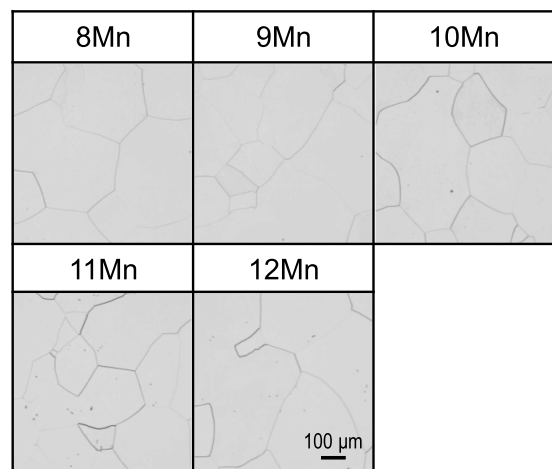


Fig. 2. Microstructures after solution treatment.

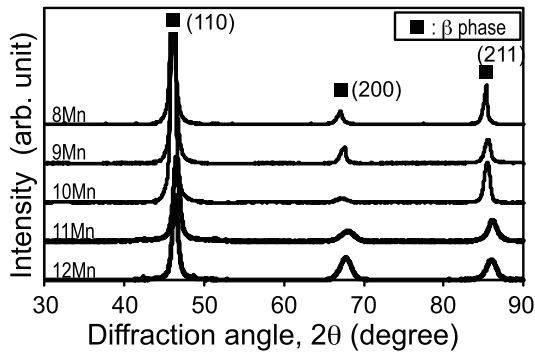


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of solution-treated alloys.

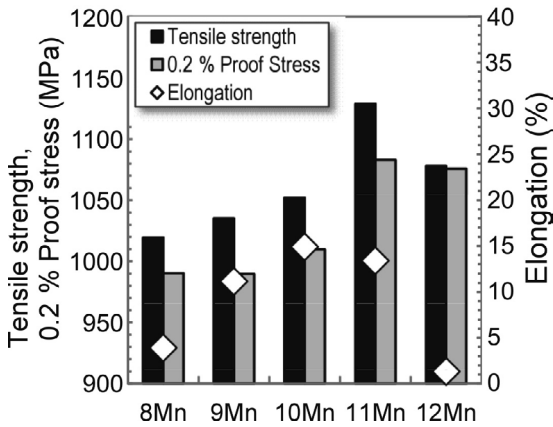


Fig. 4. Tensile properties in solution treatment condition.

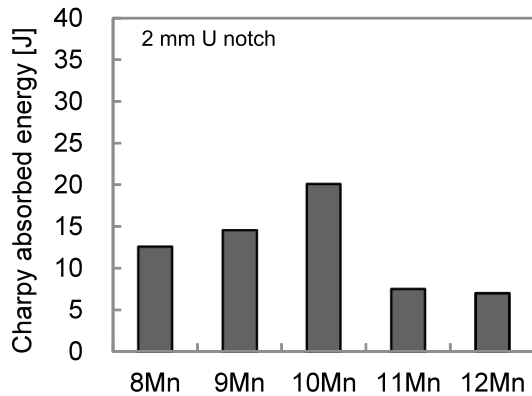


Fig. 5. Charpy absorbed energy in solution treatment condition.

3. 10Mn合金の特性

Fig. 6 に室温にて均一圧縮試験を行った結果を示す。10Mn 合金は $\alpha + \beta$ 型の Ti-6Al-4V よりも変形抵抗が低く、既存の冷間加工性に優れる β 合金 Ti-22V-4Al に近い歪量まで塑性変形能を有している。Fig. 7 に回転曲げ疲労試験より得られた S-N 曲線を示す。10Mn 合金は既存の β 型合金に比較して高い疲労減強度を示す。Fig. 8 に既存のチタン合金との強度、比重比較を示す。開発し

た Ti-10Mn-3Al-1Fe 合金は既存の β 合金と比較して強度が高く、溶体化状態で Ti-6Al-4V 合金を上回る。また、開発合金は Mo などの高比重元素を含まないため、 β 合金の中では密度が低いことも特徴である。すなわち、本合金は β 型合金の特徴である高い冷間加工性を有しながら、比強度が高いことが特徴である。

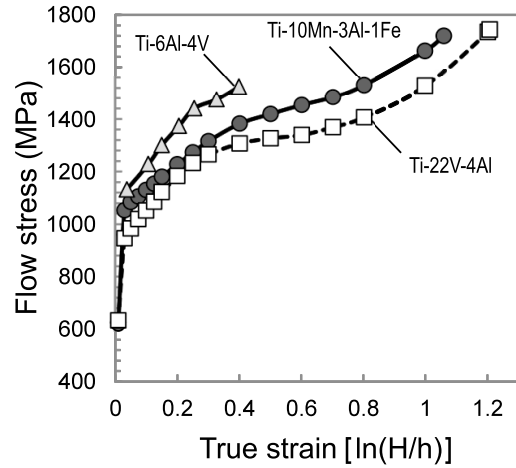


Fig. 6. Flow stress of compression test.

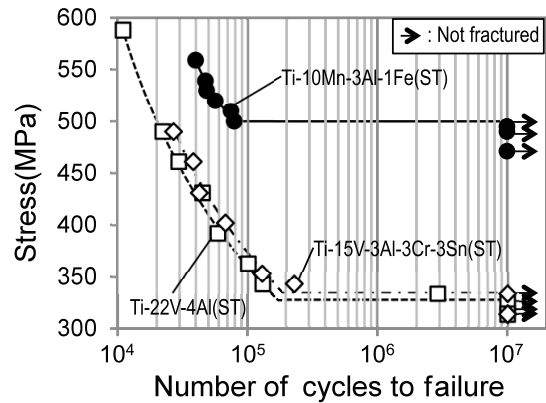


Fig. 7. Stress-number of cycles diagram of rotation-bending fatigue test.

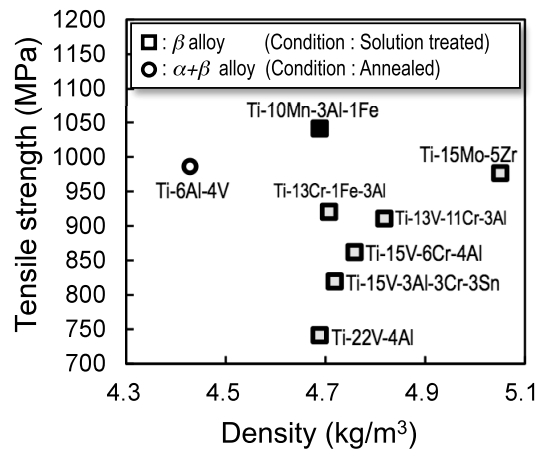


Fig. 8. Comparison of tensile property and density.

4. 今後の展開

化石燃料の枯渇懸念、排出ガスの温室効果による地球温暖化などにより、航空機、自動車などの輸送機器はこれまで以上に低燃費と排出ガス低減が求められている。そのために機体や内燃機関の動力部品の軽量化は非常に効果的であるので、比強度に優れるチタン合金の需要は今後ますます高まっていくものと期待される。しかしながら、産業発展とともに先進材料へのレアメタル使用量は増大しており、供給不安や価格の高騰などが懸念されている。今回レアメタルを含まない β 合金として開発したTi-Mn合金は良好な冷間加工性を持ちながら高い比強度を持つため、ボルト・ファスナーなどの締結部品やバルブ、コンロッドなどの内燃機関部品としても適用が期待される。

(文献)

- 1) 鈴木昭弘, 小川道治, 清水哲也: 電気製鋼, 75 (2004), 127.
- 2) 小川道治, 清水哲也, 野田俊治, 福田達雄, 池田勝彦: あたりあ, 46(2007), 96.
- 3) M. Niinomi: Structural biomaterials for the 21st century, (TMS, 2001), 3.
- 4) M. Ogawa, T. Shimizu, T. Noda, M. Ikeda: J. Japan Inst. Met. Mater., 70(2006), 359.
- 5) Materials properties handbook, Titanium alloys. ASM, (1994), 5-11.
- 6) M. Ikeda, M. Ueda, R. Matsunaga, M. Ogawa and M. Niinomi: Materials transactions, 50(2009), 2737.



鷺見芳紀



池田勝彦