

Fe-Ti 共晶合金への Co 添加による 新規軽量高強度材料の開発

徳 永 透 子*

Development of Novel Light High-strength Fe-Ti Eutectic Alloys by Co Addition

Toko TOKUNAGA*

To mitigate global warming problems, high-strength light materials have been strongly required. Recently, mille-feuille alloys composed of hard and soft alternative layers have been gaining attentions because of their simultaneous achievement in high strength and elongation. In this study, we focus on controlling the microstructures of Fe-Ti-Co and Fe-Ti-Nb ternary alloys to achieve the significant mechanical properties of the mille-feuille alloys with the solid solution effect. By directional solidification of the Fe-Ti-Nb ternary alloy, we have successfully obtained aligned lamellar structures, having high formability. After the 10% of plastic deformation at room temperature, not only the slip traces, kink bands were also observed.

1. 背景

環境負荷問題の深刻化に伴う CO₂ 削減の要請に対して、高強度軽量材料の開発による輸送機器の軽量化が強く望まれている。また、高強度軽量材料の用途を耐熱材料まで拡張し、エンジンやタービンブレード等にまで適用できれば、熱効率の向上により更なる CO₂ 排出量の削減が実現できる。しかしながら、金属材料の実用化において強度と延性の確保は必須である一方、高強度と高延性の両立は非常に困難である。これらの特性を両立する方策の一つとして結晶粒微細化が挙げられるが、この効果は高温下で著しく減少するため、耐熱材料へは適用できない。耐熱性に優れる高強度・高延性材料の開発が強く求められているにもかかわらず、その実現方策がないのが現状である。

近年、硬質層と軟質層からなる交互積層構造をもつ材料（ミルフィーユ材料）の組織を配向制御することで、特異な変形帯（キンク帯）の形成、それに伴う顕著な加工硬化現象（キンク強化）についての報告がなされている⁽¹⁾。金属材料においては、軟質相と硬質相が層状に交互積層した共晶合金（Al-Cu 系、Al-Mg 系 等）が優れた機械的特性を示すミルフィーユ材料として注目されている。しかし、共晶合金の強度は主に硬質相により担われていることから、一般的な二元系共晶合金では得られる強度に限界がある。そこで本研究では、第三元素の添加による固溶強化を狙い、共晶ミルフィーユ合金のさらなる高強度化、新規高強度構造用金属材料の創製を目的とした。

一般的に広く実用化されている高強度構造用金属材料として、鉄鋼材料（Fe 基合金）が挙げられる。しかしながら、Fe 基合金のミルフィーユ材料およびその高強度化に関する研究は Fe-C 系、Fe-Cr 系合金などに限定されており、その層状構造を活かした高強度化、またその配向化は未だ十分に実現されていない。また、Fe 基合金が使用される構造材料においては、軽量化に対する強い要望があることを踏まえ、申請者は Fe 基合金の高い強度を損なわずに軽量化を実現する二元系合金として、Fe-Ti 基合金にまず着目した。さらに、Fe-Ti 基合金の共晶組織を損なわずに、固溶強化を狙うことができる添加元素として Co と Nb に着目し、Fe-Ti-Co、Fe-Ti-Nb 三元系合金の組成の最適化および層状組織の配向制御を目指した。

2. 実験方法

Fe-Ti-Co 合金については、 α -Fe/TiFe₂ の共晶組織を得るために、Fe (>99.99%), Ti (>99.99%), Co (>99.9%) を Fe₅₀Co₃₀Ti₂₀, Fe₅₀Co₂₅Ti₂₅, Fe₄₀Co₄₀Ti₂₀ となるように、一方 Fe-Ti-Nb 合金については、Fe/Fe₂(Ti, Nb) の共晶組織を得るために、Fe (>99.99%), Ti (>99.99%), Nb (>99%) を Fe₈₇Ti₇Nb₆ (at%) 合金となるように秤量し、すべての合金をアーク溶解で母合金を作製した。Fe₈₇Ti₇Nb₆ (at%) 合金については、作製した母合金をアルミナ坩堝に入れ、アルゴンガス雰囲気中で Bridgman 法による一方向性凝固(Directional Solidification; DS)を行った。このとき、保持温度は 1600°C、成長速度は 20 mm/h とした。

2024年2月14日 受理

* 豊田理研スカラー

名古屋工業大学大学院工学研究科物理工学専攻

得られた合金に対して光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy) を用いた組織観察, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), XRD (X-Ray Diffraction) を用いた組成分析および構成相の同定を行った. 配向組織が得られた合金に対して, 室温, 400, 600, 800°C で圧縮試験を行い, 強度の温度依存性を調査した. 荷重軸が結晶の成長方向と平行となるように, 1.5 mm×1.5 mm×4.5 mm の大きさを有する角柱状試験片を切り出した. 圧縮試験後の試験片に対して組織観察を行い, 変形機構について検討した.

3. 結果

図(a)に $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{30}\text{Ti}_{20}$ 合金の結晶成長方向に対する横断面を示す. いずれのFe-Co-Ti系合金においても初晶が形成していた. 共晶組織についてはロッド状, 粒状の組織が見られ, 板状組織は見られなかった. なお, いずれの組織も結晶成長方向に配向している様子は見られなかった.

一方, 図(b,c)に示す $\text{Fe}_{87}\text{Ti}_7\text{Nb}_6$ 合金については, 成長方向に対する横断面 (図(b)) ではロッド状組織のまわりに板状組織が広がる円形のコロニーが見られ, コロニー境界には乱れた組織が形成していた. また, 長手断面 (図(c)) においては, 板状組織が結晶成長方向に平行に成長している様子が見られ, 軟質相と硬質相が層状に交互積層したミルフィーユ合金を作製することができた.

組織の配向が見られた $\text{Fe}_{87}\text{Ti}_7\text{Nb}_6$ 合金に対して圧縮試験を行った. 試験温度の上昇に伴い降伏応力は低下したが, いずれの温度においても, 10%の塑性変形が可能であった. 400°C以上の高温試験では, 降伏後に加工硬化を示した後応力は徐々に低下したが, 室温においては塑性ひずみ10%の時点でも加工硬化を継続していた. Fe-Ti二元系, Fe-Nb二元系合金に関する予備実験においては, 降伏強度は室温でそれぞれ約800 MPa, 600 MPaが得られたが, 本三元系合金の降伏強度は約450 MPaと低い値を示した. 三元系合金の変形組織を観察したところ, α -Fe相, $\text{Fe}_2(\text{Ti,Nb})$ 相の両方ですべり線が観察され, これは二元系合金と同様であった. 変形組織に大きな違いはないものの, 二元系合金と比較して三元系合金が低い降伏強度を示した理由として, 板状組織の配向性が悪いことが考えられる. 室温の試験後には, 三元系合金において組織の配向に対して直交する向きにくさび状のキンク帯とみられる変形帯が観察された. したがって, 三元系合金においても組織の配向性をより高くすることで, さらなるキンク帯の形成およびそれに伴う高強度化の可能性が示唆された.

4. 結論

本研究では, Fe-Co-Ti, Fe-Ti-Nb 三元系ミルフィーユ合金の作製を試み, その力学特性を調査した. Fe-Co-Ti 三元系合金では, 板状組織を有するミルフィーユ合金を作製することができなかったが, Fe-Ti-Nb 合金においては, 成長方向に対してロッド状と板状の組織が配向したミルフィーユ合金を作製することができた. 圧縮試験の結果, 室温~800°Cの温度域において, 試験片全体として均一に, 塑性ひずみで10%までの変形が可能であったが, その降伏応力は二元系Fe-Ti系合金, Fe-Nb系合金よりも低くなった. これは, 二元系合金と比較して三元系合金では組織の配向性が悪かったことが降伏応力の低下につながったと考えられ, 今後, 組織の配向性を高めることでより高い強度を得ることができると期待できる.

REFERENCES

- 1) K. Hagihara, R. Ueyama, M. Yamasaki, Y. Kawamura and T. Nakano, *Acta Mater.*, **209** (2021) 116797.
- 2) K. Hagihara, T. Tokunaga, S. Ohsawa, S. Uemichi, K. Guan, D. Egusa and E. Abe, *Int. J. Plasticity*, **158** (2022) 103419.

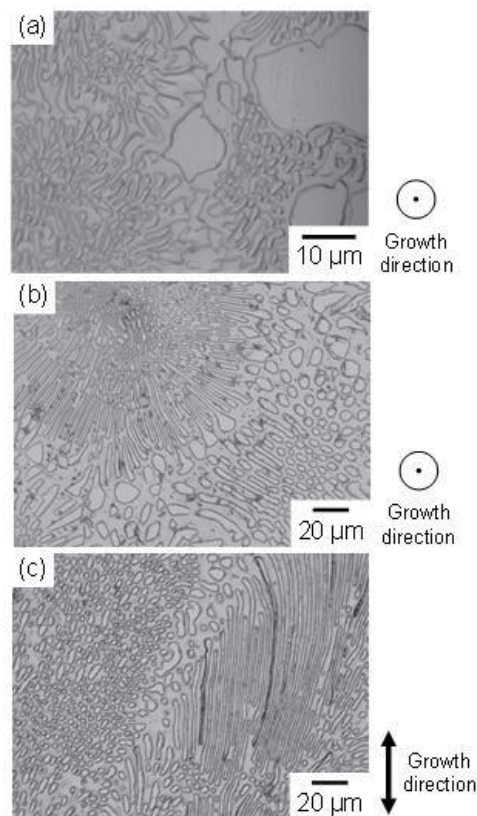


図 (a) $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{30}\text{Ti}_{20}$ 合金横断面, (b) $\text{Fe}_{87}\text{Ti}_7\text{Nb}_6$ 合金横断面, (c) $\text{Fe}_{87}\text{Ti}_7\text{Nb}_6$ 合金長手断面.