アモルファス相からの超高強度および硬質磁性ナノ結晶粒子の析出

東北大学金属材料研究所 井上 明久*

アルプス電気中央研究所 牧野 彰宏**

Fig. 1 523 K で 60 s 熱処理した $\text{Al}_{87}\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Nd}_3$ アモルファス合金の高分解能透過電顕写真。

急速凝固法によるアモルファス化が高强度化、高延性化の優れた手法であることが知られている。最近、このアモルファス相中に約 5 nm 径の金属粒子を分散析出させることにより、引張強度がアモルファス単相に比べてさらに約 1.4 倍も上昇することが見だされている⁽¹⁾。例えば、Fig. 1 は $\text{Al}_{87}\text{Ni}_7\text{Cu}_3\text{Nd}_3$ アモルファス合金を 523 K で 60 s 熱処理後の高分解能透過電顕写真を示している⁽²⁾。3~5 nm 粒径の Al 粒子がアモルファス相中に約 5 nm の間隔で分散しており、その体積分率は約 20% である。ナノ Al 中のコントラストに乱れは見られず、ナノ Al は完全結晶構造を有している。このナノ Al 粒子分散アモルファス合金の引張強度は 1470 MPa であり、アモルファス単相合金の強度 (1100 MPa) に比べて著しく高くなっている。この高强度化は、(1) Al 粒子の完全結晶化、(2) アモルファス(液相)/ナノ結晶粒の界面エネルギーが固相/固相界面エネルギーに比べて約 1 桁低く、過剰空隙などを含まない高稠密界面構造となっていること、および(3) ナノ Al 粒子がアモルファス母相のせん断変形の抑制に好都合なナノ粒径効果を有していること、の相乗効果に起因していると考えられている。ナノ結晶が析出するためには、(1) ナノ結晶が初晶として析出するに十分な核生成サイトを含んでいること、(2) 初晶から大きな原子寸法の溶質元素が排出され、その元素が初晶/アモルファス界面のアモルファス相域に濃縮され、

Fig. 2 1023 K で 60 s 熱処理した $\text{Fe}_{90}\text{Nd}_7\text{B}_3$ アモルファス合金の高分解能電子顕微鏡写真。

初晶の粒成長を抑制すること、および(3) アモルファス相への溶質元素の濃化により、残存アモルファス相の熱的安定性が向上すること、の 3 条件を満足することが必要である。このようなナノ金属粒子の析出による高强度化は、Mg 系での Mg、Ni 系での Ni、Fe-Ni 系での fcc-Fe(Ni) の各粒子の析出においても見られている。

上述したナノ結晶化の条件を満たす Fe 基合金においては、 α -Fe+残存アモルファスおよび α -Fe+ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ +残存アモルファスのナノ結晶組織が得られ、前者では優れた軟磁性⁽¹⁾が、後者では硬質磁性⁽³⁾が発現している。例えば、Fig. 2 は $\text{Fe}_{90}\text{Nd}_7\text{B}_3$ アモルファス合金を 1023 K で 60 s 熱処理後の組織である⁽³⁾。約 20 nm の bcc-Fe と約 12 nm の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ が約 10 nm 厚さのアモルファス相で囲まれたナノ複相となっている。このナノ複相合金は、1.30 T の飽和磁化、250 kA/m の保磁力および 145 kJ/m³ の最大エネルギー積を示し、高磁束密度型の永久磁石特性を有している。これらの結果より、ナノ結晶組織が高機能特性の発現に重要な役割を果たしており、これまでに有用な特性が得られていない合金もナノ結晶制御により高機能合金に生まれ変わるものと期待される。

文 献

- (1) 井上明久：まてりあ, **36**(1997), 926.
- (2) A. Inoue: Nanostruct. Mater., **6**(1995), 53.
- (3) A. Inoue, A. Takeuchi, A. Makino and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, **36**(1995), 676. (1998年2月5日受理)

Precipitation of Nanocrystalline Phases from Amorphous Phase; Akihisa Inoue*, Akihiro Makino** (*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai. **Alps Electric Co., Ltd., Nagaoka)

Keywords: aluminum-nickel-copper-neodymium, iron-neodymium-boron, nanocrystalline phase, high strength, hard magnetism

TEM specimen preparation: ion milling TEM utilized: JEM-2010F