K6-1

Fe-Mn-Si-Cr 形状記憶合金繊維/AI 複合材料における界面強度の焼結圧力依存性

Sintering pressure dependence of interface strength in Fe-Mn-Si-Cr shape memory Alloy fiber / Al matrix composite

○鍋島史彦¹, 瀬戸口政貴², 西村庄平², 出井裕³, 小宮良樹³ *Fumihiko Nabeshima¹, Masaki Setoguchi², Shohei Nishimura², Hiroshi Izui², Yoshiki Komiya²

Abstract: Pure aluminum is inferior strength to steel material. We evolve Al-based composite material adding an iron-based SMA fiber. Improve material properties expect compressive residual stress by SMA fibers. Fe-Mn-Si-Cr alloy is less expensive, better processability than Ti-Ni SMA. Aluminum matrix composite reinforced by iron-based SMA fibers was fabricated by SPS.

The pure Aluminum powder and SMA fiber were sintered at 773K. As a result of the pull-out test, the interface between pure Aluminum and SMA fiber was stronger in the composite sintered at 70MPa than 30, 50 MPa. From the interface observation, it was cleared that thickness of intermetallic phase affects to interfacial strength. Furthermore the mechanical properties are improved with compressive residual stress by recovery process of SMA.

1. 緒言

純 Al は他のアルミニウム合金と比較して成形性,耐食性,陽極酸化処理などに優れた性質を持つが,低強度である。そこで,形状記憶合金(Shape Memory Alloy: SMA)繊維を用いた繊維強化金属(Fiber Reinforced Metal: FRM)化による複合材料を考案した。複合材料化により純 Al の強度の向上が可能であり,SMA 繊維の形状回復効果を利用し,母材内部に圧縮方向の残留応力を付与することで,機械的特性の向上が図れる。Ti-Ni 系 SMA を用いた同様の試みは以前から行われているが[1],高コストであり冷間加工性に劣るため,大型構造材として使用するには不向きである。そこで安価であり,優れた加工性,機械的性質を有するFe-Mn-Si-Cr 系 SMA に注目した。

本研究では放電プラズマ焼結(Spark Plasma Sintering: SPS)法を用いた焼結により長繊維強化複合材の作製を行った. 焼結した複合材は圧延により繊維方向にひずみを与えた. これを熱処理することで Fe-Mn-Si-Cr 合金繊維を形状回復させることで純 Al 内部に圧縮方向の残留応力を付与し, FRM の機械的性質に及ぼす影響を考察した.

2. 実験方法

本研究では母材に純 Al 粉末(粒径 106-180 μ m, 純度 99.9%), 強化材に ϕ 8mm の Fe-Mn-Si-Cr 合金(以下 SMA) 繊維を用いた. 純 Al 粉末を高強度グラファイト製ダイパンチ(56×11 μ m²)に充填し,予備加圧 20 μ m を与えた後に,焼結温度 500°C,昇温速度 50°C/ μ min,焼結圧力 70 μ m の条件で焼結後,引張試験を行う. また,SMA

繊維と純 AI との界面強度を測定するために、引抜試験片を同様の焼結条件で作製した。SMA 繊維/AI 強化複合材(以下 FRM)は、SMA 繊維に電気炉で 900 $^{\circ}$ $^{\circ}$ の形状記憶熱処理を行った後、この SMA 繊維を純 AI 粉末中に配置し、同条件で焼結を行い作製した。長繊維強化の複合則を(1)式に示す。このとき σ_c は長繊維強化複合材の引張強度、 σ_f は繊維の引張強度、 (σ_m) は繊維破断ひずみにおける母材の引張強度、 V_f は繊維の体積含有率、 V_m は母材の体積含有率であり、 V_f + V_m = 1 が成り立つ。

$$\sigma_{c} = \sigma_{f} V_{f} + (\sigma_{m})^{2} V_{m}$$
 (1)

焼結した FRM 内の SMA 繊維に引張方向のひずみを与えるため、圧延機(ロール周速度 2.9m/min)で試験片に繊維方向に 6%、12%の圧延ひずみを付加した後、電気炉により 450℃の形状回復熱処理し、試験片形状に加工後、引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

純 AI 焼結体の引張試験では,全ての焼結圧力条件で最大引張応力は 90MPa 前後を示し,伸びは 40%程度となった. 引抜試験では焼結圧力 30MPa, 50MPa の引抜試験片において SMA 繊維の引抜が生じた. これは SMA 繊維と純 AI との間ではく離が生じたことが原因と考えられる. 一方 70MPa では引抜より先に SMA 繊維が破断したことから, SMA 繊維と純 AI の界面強度が SMA 繊維の引張強度を上回ったと考えられる. Fig.1 に各焼結圧力における界面の SEM 像と EDX 線分

1:日大理工・院(前)・航宇、2:日大理工・学部・航宇、3:日大理工・教員・航宇

析の結果を示す. 図中の左の層が SMA 繊維, 右の層が AI である. 純 AI と SMA 繊維の界面付近生成されている中間層は金属間化合物によるものである. 幸田ら「2月3」の研究によれば、この中間層は Fe2Al5のような、AI リッチな金属間化合物であると考えられている. 一見すると、焼結圧力の増加とともにこの中間層厚は減少しているように見える. EDX による線分析結果では、70MPa では 30、50MPa と比較して AI 中の Fe の濃度が上昇していることが確認できることから、焼結圧力の増加によって AI 中へ Fe の拡散が促進され、中間層厚が減少し、引抜強度が上昇したと考えられる. 以上の結果から、複合材の焼結圧力は 70MPa と決定した.

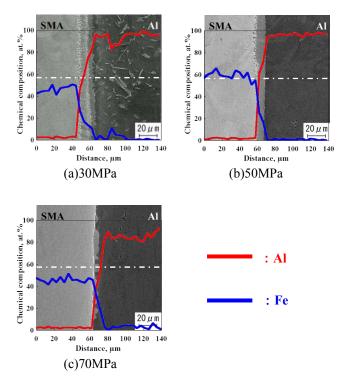


Fig.1 SEM micrographs and EDX line analysis of interface between Al and Fe-Mn-Si-Cr alloy fiber

FRM を作製するにあたり, 複合則を用いて理論値を決定する. 純 Al の引張試験結果から, SMA 繊維の破断ひずみにおいて純 Al の引張強度 σ_m =85.2MPa, SMA 繊維の引張強度 σ_f =1064MPa と決定した. SMA 繊維の添加本数は、引張試験片の断面(3×4 mm²)中に 4 本(V_f =16.9%)とし、(1)式を用いてより 250MPa となった.

Fig.2 に FRM の引張試験結果を示す. 圧延前の FRM の最大引張強度は 200MPa で理論値より低い値となり, 伸びは純 Al の半分以下の値となった. また, 伸びが 18%程度の位置から引張強度が徐々に低下し, 破断が 複数見られる. これは添加した 4本の SMA 繊維が個々に破断が生じた結果である. 圧延処理後の引張強度は

圧延ひずみ 6,12%ともに引張強度が 250MPa を超える 結果となり、伸びは 8%程度となった.これは圧延に よる加工硬化の影響であると考えられる.一方、形状 回復熱処理後の伸びは 12%以上となり、熱処理前と比較して加工硬化の影響が改善した.これは形状回復熱処理を行った際、純 Al が再結晶により回復したことが 原因であると考えられる.一方で引張強度は形状回復 前とほぼ同等の 250MPa 程度を維持しているが、これは埋め込んだ SMA 繊維の形状回復効果により、純 Al 中に圧縮方向の残留応力が付与され、引張強度が向上したものと考えられる.

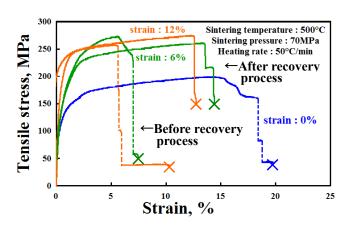


Fig.2 Stress-strain curve of FRM

4. 結言

本研究では SPS を用いた焼結により FRM の作製を 行い,以下の結論を得た.

- ・焼結圧力を 30MPa から 70MPa まで増加させると, 金属間化合物の中間層厚が 18μm から 5μm 以下まで 減少し, SMA 繊維の引抜強度は上昇した.
- ・形状回復熱処理後の FRM は、形状回復熱処理前と同等の引張強度 250MPa 程度を維持しつつ、伸びが 約 2 倍の 12%を示した.

5. 参考文献

[1] 紀博徳,川節望,長谷崎和洋,William D. Armstrong:「形状記憶合金を使用した金属基複合材料」, 三菱重工技報,Vol.32,No.6,pp.441-444,1995年 [2] 幸田成康,諸住正太郎,金井章:「アルミニウム被膜鋼の合金層の組成および成因について」,日本金属学会誌,vol.26,No12,pp.764-769,1962年 [3] 柴田皓二,諸住正太郎,幸田成康:「固相拡散による Fe-Al 合金層の生成」,日本金属学会誌,vol.30,No.4,pp.382-388,1966年