

学位論文審査の結果の要旨

報告番号	先端科学技術 甲第 154 号	氏名	木村正宏
論文題目	金属粉末射出成形法によって作製した Fe-Cr-Si 系軟磁性材料に関する研究		
論文審査委員会	委員 (主査)	特別専任教授	清水透
	委員 (副査)	教授	渡利久規
	委員 (副査)	教授	柳田明
	委員 (副査)	准教授	山崎敬則
	委員 (副査)	教授	神雅彦 (日本工業大学)
	委員 (副査)	准教授	中山昇 (信州大学)

研究の背景

軟磁性材料は多くの産業機器、家電、自動車等に利用されており、今後も多くの需要が期待される材料の一つである。そのような多くの利用分野の中で、自動車の電子制御式燃料噴射装置は多くの自動車、自動二輪車における環境対策として採用され、そこに使われるニードルバルブの製造方法の一つとして、3次元複雑形状の金属部品をニアネットシェイプで製作できる金属粉末射出成形法 (MIM) が採用されるようになってきた。現在、MIMによるニードルバルブの生産では軟磁性材料としてPBパーマロイが採用されているが、近年では応答性の向上やコアロスの低減、さらに耐食性の改善や高硬度化と素材価格の低減等が求められている。

研究の目的

本研究では Fe-Cr 系軟磁性材料の特性向上を目的とし、Si 等の合金元素を数%添加した Fe-Cr-Si 系軟磁性材料を MIM によって作製し、その磁気特性と材料特性について明らかにすることを目的としている。

研究の内容

1つ目の研究として、MIMによってSiを数%含有させたFe-Cr-Si系軟磁性材料を作製し、CrおよびSi量が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにしている。その結果、Fe-Cr-Si系合金のSi量を3%とすることで相対密度は99%以上となり、Cr量の変化は焼結性にほとんど影響を及ぼさないことを確認した。また、CrおよびSi量を増やすことで電気抵抗率を上げ、交流磁界におけるコアロスを低減することができ、電気抵抗率の増加に対するSi量の影響が顕著であることを確認した。しかし、MIMにおける気孔率増加による電気抵抗率の増加は、渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させている。一方、Cr量を減らすことで磁束密度 B_{2000}

および最大透磁率 μ_m を高くし、保磁力 H_c を低くすることが可能である。さらに、Fe-Cr-Si 系合金の Si 量を 3% とすることで引張強さおよび硬さは上昇し、緻密化後の伸びは低くなるが、Cr 量を減らすことで伸びの低下を軽減することが可能である。これらの結果から、磁気特性に優れ、交流磁界におけるコアロス低減を可能とする Fe-Cr-Si 系合金として、Fe-9Cr-3Si が適すると報告された。この成果は、

[1] M. Kimura, T. Shimizu, H. Watari, “Effect of Cr and Si Contents on the Magnetic and Mechanical Properties of Fe-Cr-Si alloys by MIM Process”, Key Engineering Materials, Vol. 841, pp. 300-305 (2020).

[2] 木村正宏, 清水透, 渡利久規, 「MIM プロセスによって作製した Fe-Cr-Si 系軟磁性材料の磁気特性に及ぼす Cr および Si 量の影響」, 粉体および粉末冶金, Vol. 67, No. 5, pp. 231-238 (2020).

としてまとめられている。

2 つ目の研究として、Fe-Cr-Si 系軟磁性材料の Cr 量を減らすことで耐食性の低下が懸念されるため、耐食性を向上させる Mo を添加した Fe-Cr-Si-Mo 系軟磁性材料を MIM によって作製し、Mo の添加が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにしている。その結果、Fe-Cr-Si 系合金に 2% の Mo を添加することで、低温での焼結時の相対密度は向上するが、高温での焼結時にその効果はなく、最終的に緻密化されたときの相対密度は Mo を添加しない場合よりも低くなることを確認した。また、2% の Mo 添加により、電気抵抗率は増加し、交流磁界におけるコアロスを低減することができるが、低周波数域におけるコアロスの低減効果は小さいことを確認した。さらに、MIM における気孔率増加による電気抵抗率の増加は、Mo を 2% 添加した場合においても渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させる。加えて、2% の Mo 添加により、磁束密度 B_{2000} および最大透磁率 μ_m は低下し、保磁力 H_c は高くなり、磁気特性は若干低下する。一方、2% の Mo 添加により、耐食性を大幅に向上させることが可能であり、Cr 量を 10% まで減らしても 15Cr-3Si 並みの耐食性を期待できる。また、2% の Mo を添加することで引張強さおよび硬さは上昇し、緻密化後の伸びは低下するが、Cr 量を減らすことで伸びの低下を軽減することが可能である。これらの結果から、磁気特性および耐食性を兼ね備えた Fe-Cr-Si-Mo 系軟磁性材料として、Fe-10Cr-3Si-2Mo が適すると報告された。この成果は、

[3] M. Kimura, T. Shimizu, H. Watari: “Magnetic and Mechanical Properties of Fe-Cr-Si-Mo Alloys by MIM Process”, Materials Science Forum, Vol.1016, pp. 685-690 (2021).

としてまとめられている。

3 つ目の研究として、Si および Mo の添加によって高硬度化を狙った Fe-Cr-Si 系軟磁性材料を MIM によって作製し、Si 添加量の増加および Mo の添加が磁気特性と材料特性に及ぼす影響について明らかにしている。その結果、Fe-Cr-Si 系合金の Si 量を 6% とするこ

とで焼結性は著しく向上して相対密度は 99%以上となり、電気抵抗率も著しく高くなることを確認した。また、2%の Mo を添加することで焼結性は低下するが、電気抵抗率が増加することを確認した。しかし、2%の Mo を添加することで電気抵抗率を増加させ、渦電流損失を低下させても、保磁力 H_c の増加によるヒステリシス損失の増大によりコアロスが増加する。さらに、MIM における気孔率増加による電気抵抗率の増加は、Si を 6% 添加した場合においても渦電流損失の低減には効果がなく、むしろヒステリシス損失の増大を招き、コアロスを増加させる。また、Fe-Cr-Si 系合金の合金元素の添加量増加に伴い、磁束密度 B_{2000} および最大透磁率 μ_m は低下し、保磁力 H_c は高くなり、直流磁気特性は低下する。一方、Si 添加量の増加、および 2%の Mo 添加により耐食性を大幅に向上させ、硬さも上昇させることが可能である。しかし、Si を 6% 添加したときの伸びの低下は特に著しく、MIM 以外の製法による製品のニアネットシェイプ化は困難であると結論している。さらに、EPMA による面分析および多次元平衡状態図の解析により Laves 相の析出領域を予測して、磁気特性および機械的性質に影響を及ぼしているものと推察している。これらの結果から、磁気特性および機械的性質を兼ね備えた高硬度 Fe-Cr-Si 系軟磁性材料として、Fe-12Cr-4.5Si-2Mo が適すると報告された。この成果については、今後の研究報告を予定している。

以上、本論文において著者が検討して得た結論に記された事柄は、Fe-Cr 系軟磁性材料の磁気特性および機械的性質の向上を実現し、その応用分野を拡大させる可能性を示した点で極めて有用であると判断できることから、本論文の価値は工学的、工業的な観点からも十分に評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。