研 究

Fe 基金属ガラス粉末を用いた圧粉磁心の作製と応用

水嶋 隆夫^{☆1}, 小柴 寿人^{☆1}, 内藤 豊^{☆1}, 井上 明久^{☆2}^{☆1} アルプス電気(株)磁気デバイス事業部, 〒949-8513 魚沼市小出島 1177.^{☆2} 東北大学, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 1-3-5.

Preparation of the Fe-based Glassy Alloy Powder Cores and their Applications

Takao Mizushima^{☆1}, Hisato Koshiba^{☆1}, Yutaka Naito^{☆1} and Akihisa Inoue^{☆2}^{☆1} Magnetic Device Div., Alps Electric Co.Ltd., 1177 Koidejima, Uonuma 949-8513, Japan.^{☆2} Tohoku University, 1-3-5 Katahira Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan.

Received July 26, 2007

SYNOPSIS

New core (LiquialloyTM core) made of soft magnetic Fe-based glassy alloy powder was fabricated by the consolidation using an uni-axial mechanical press at room temperature. This new core has the constant relative permeability (μ') of about 60 up to 1 MHz and extremely low core loss blow 200 kW/m³ at $f=100$ kHz and $B_m=0.1$ T. The efficiency of the switching power supply (η) was improved by 2~3% when the LiquialloyTM core was used instead of Fe-Al-Si core. The temperature rise near the LiquialloyTM core (ΔT) was also 10 K lower than that of the Fe-Al-Si core. These excellent properties of the LiquialloyTM core are based on its extremely low hysteresis and eddy current losses. These low losses are originated from its good soft magnetic properties ($H_c=2$ A/m) after annealing at relatively low temperature, its intrinsic hardness ($H_v=1000$) and high resistivity ($\rho=160 \mu\Omega\text{cm}$).

KEY WORDS

powder core, Fe-based glassy alloys, soft magnetic properties, core losses, efficiency of electric power supply

1 緒 言

近年, 電気電子機器の高性能・高機能化, 省電力化に対し, 小型で高効率なスイッチング電源が用いられるが, これら電源から発せられる高調波電流がノイズとして, 他の電子機器や電力系統に障害を及ぼす原因となることも問題視されている¹⁾. この対策として, アクティブフィルター方式の回路が注目されており現在実用化されている. アクティブフィルター用のチョークコイルには大きな入力電流が流入するため, 直流バイアス印加時のインダクタンス変化が小さい, 即ち直流重畳特性の優れたコイルが求められており, このような観点から, 圧粉磁心が使用されている.

他方, 圧粉磁心はフェライト磁心と比較して鉄損が大きいため, 電力変換時の効率低下は否めず, スwitchング電源用チョークコイルの用途としては鉄損の低減が強く求められている.

これまで圧粉磁心用磁性材料としては一般に鉄粉が用いられてきたが, 上述の要求の下, Ni-Fe 系合金粉や Fe-Al-Si 系合金粉を用いた圧粉磁心が比較的低鉄損特性を示すことから,

スイッチング電源用チョークコイルとして用いられるようになってきている. 更に低鉄損特性の実現を目的とし, Fe基アモルファス軟磁性合金を用いた磁心も報告されている²⁻⁴⁾.

ところで, 我々は Fe-半金属系金属ガラス合金が良好な軟磁気特性と従来のアモルファス合金には見られない大きなアモルファス形成能を示すことを報告してきた⁵⁻¹⁰⁾. また, 金属ガラス粉末を用いて作製した圧粉磁心が良好な直流重畳特性と低鉄損特性とを両立することを既に報告している¹¹⁾.

本報では, コスト面を含めた実用化を考慮し, 一般的な金属粉末を作製する方法である水アトマイズ法により Fe基金属ガラス合金粉末 (商標名: LiquialloyTM 粉末) を作製し, 従来同様の室温での一軸加圧成形にて作製した圧粉磁心の静特性及びスイッチング電源のアクティブフィルター回路に搭載したときの動特性について報告する.

2 実 験

所定の組成となるように原料金属及び合金を秤量した後, 高周波溶解により溶湯とし, これを用いて水アトマイズ法に

より LicalloyTM 粉末を作製した。この粉末に、バインダーとして Si 樹脂及びステアリン酸系の潤滑剤を添加、混合後、外径 20 mm、内径 12 mm、厚さ 13.6 mm のリング形状となる様に一軸の粉末成形プレス装置を用い、室温にて 1961 Mpa の加圧力で成形した。得られた成形体は、763 K で 3.6 ks N₂ 雰囲気中にて焼純を行い、静特性及び動特性の測定を行なった。

透磁率の測定には、LCR メータ (YHP 製 4192A) を用い、10 mA/m の磁界を印加して 10 k ~ 10 MHz の範囲で測定を行なった。鉄損は、岩崎通信機製 B-H ループトレーサ (SY-8217) を用い、B_m = 100 mT の励磁磁束密度で 10 k ~ 1 MHz の範囲で測定した。

動特性の測定には、市販のアクティブフィルター方式スイッチング電源に、LicalloyTM 製圧粉磁心を搭載し、市販の Fe-Al-Si コアを搭載した場合の電源効率及びコイル付近の温度上昇値 (ΔT) との比較を行なった。

3 結果と考察

3.1 静特性

Fig.1 及び Fig.2 に本検討に用いた LicalloyTM 粉末の外観写真及び XRD パターンを示す。LicalloyTM 粉末の平均粒径 D₅₀ は 12 μ m 程度であり、概ね球状である。また、XRD パターンより、結晶構造に起因する回折線は観察されずハローなパ

Fig.1 SEM image of the LicalloyTM water atomized powder.

Fig.2 XRD pattern of the LicalloyTM water atomized powder.

ターンのみであることから、得られた粉末はアモルファス単相組織であるといえる。一般に、従来の Fe 基アモルファス合金粉末をアトマイズ法で作製する場合には、アモルファス形成能が小さいため特殊なアトマイズ装置を用いて超急冷する必要がある⁴⁾。しかし、LicalloyTM では銅鋳型鋳造法によりバルクアモルファス試料が作製できるほど大きなアモルファス形成能を有することから、一般的な結晶金属粉末を作製する場合と同様に、通常の水アトマイズ装置を用いても成形性の良い球状粉末を作製することが可能である。

Fig.3 に LicalloyTM 粉末で作製した種々の大きさのコア外観写真を示す。Fe 基アモルファス合金は硬度が高く、一般的な粉末成形機による成形では粉末自体の塑性変形量が小さいため、成形が困難であり、ホットプレス等の加熱と加圧とを同時に行なうことで成形する場合がほとんどであった³⁾。しかし、この方法では生産性が低く実用的では無いため、本検討では、一軸の粉末成形装置を用い成形を行なったが、写真に示す通り良好な性状の成形体を作製することが可能であった。

Fig.4 に一例として、 $\phi 20 \times \phi 12 \times 13.6$ t 形状試料の透磁率 (μ') の周波数依存性を示す。 μ' は、概ね 10 MHz 程度まで一定の $\mu' = 60$ 程度を示す。スイッチング電源の平滑チョークとして

Fig.3 Appearances of the LicalloyTM powder cores with various size.

Fig.4 Frequency dependence of the permeability for the LicalloyTM water atomized powder core.

の用途においては、その使用する周波数が数百kHz～1MHzであるため、10MHz程度まで一定の透磁率を示すことは本使用目的に対し良好な特性であると言える。

Fig.5に周波数 $f=100\text{ kHz}$ での鉄損(P_{cv})の最大磁束密度(B_m)依存性を示す。比較のために、同じサイズのFe-Al-Si系合金及びFe-Ni系合金圧粉磁心の値もあわせて示す。 B_m の増大に伴い、いずれの磁心においても鉄損は増加する傾向を示す。しかし、Liquialloy™圧粉磁心では、全ての B_m 、全測定周波数においてFe-Al-Si系合金磁心やFe-Ni系合金磁心よりも低い鉄損値を示しており、例えば、Fe-Al-Si系合金磁心やFe-Ni系合金磁心では $B_m=0.1\text{ T}$, $f=100\text{ kHz}$ において $W_{1/100k}=600\sim 800\text{ kW/m}^3$ 程度であるのに対し、Liquialloy™圧粉磁心では $W_{1/100k}=200\text{ kW/m}^3$ を示し、従来合金コアの1/3～1/4の非常に低い値を実現している。

Liquialloy™圧粉磁心が著しく低い鉄損を示す原因を明らかにするために、Liquialloy™磁心及びFe-Al-Si系合金磁心の損失の分離を行なった。Fig.6に各磁心の $B_m=0.1\text{ T}$ における P_{cv}/f と f の関係を示す。ここで、鉄損の分離は、観測された鉄損値 P_{cv} を測定周波数 f で除した P_{cv}/f を f でプロットし、 f を0に外押した切片を1周期当たりのヒステリシス損失(P_h)とし、 $P_{cv}-P_h$ を渦電流損失(P_e)とした。

この結果、Fe-Al-Si合金磁心の場合には、 P_{cv}/f は f に対し一次関数的に増加するのに対し、Liquialloy™圧粉磁心では、 P_{cv}/f は f の増加に対しほぼ一定の 2 J/m^3 を示しており、 P_{cv}/f の増加は見られない。即ち、渦電流損失(P_{cv})はほとんど発生していないことになる。渦電流損失 P_{cv} は磁心材料の電気抵抗の逆数に一次で比例することから、Liquialloy™圧粉磁心は高い電気抵抗を有することが予測される。Table 1に、Liquialloy™

Fig.5 Dependence of the core losses for the Liquialloy™ powder core, Fe-Al-Si powder core and Ni-Fe powder core on the maximum saturation flux density (B_m).

磁心、Fe-Al-Si磁心、Ni-Fe磁心の直流抵抗(ρ_c)、金属自体の固有抵抗(ρ_m)、及び硬さ(H_v)を示す。Liquialloy™磁心の ρ_c はFe-Al-Si磁心やNi-Fe磁心の値よりも $10^2\sim 10^6$ 倍程度大きな値を示している。従って、著しく低い P_{cv} を示すのは、コアの高い電気抵抗に依存していると言える。Liquialloy™圧粉磁心が高い電気抵抗を有するのは、以下の通りと考えられる。即

Fig.6 Relationship between P_{cv}/f and frequency (f) for the Liquialloy™ core and the Fe-Al-Si core.

Table 1 The resistivity and the hardness of the Liquialloy™, Fe-Al-Si and Ni-Fe alloy cores and materials.

Material	Resistivity ($\Omega\text{ m}$)		Hardness (H_v)
	Core	Material	
Liquialloy™	3.07×10^3	1.68×10^{-6}	980
Fe-Al-Si	17	0.82×10^{-6}	500
Ni-Fe	0.005	0.56×10^{-6}	150

ち, Licalloy™ 金属自体がアモルファス材料特有の高い固有抵抗を有していること, また粉末粒子は均一に結着樹脂に覆われており且つ, $D_{50}=12\mu\text{m}$ と他の磁心と比較して細かく, また硬さが 2~5 倍硬いため, 圧粉成形時の粉末の塑性変形量が他材料よりも小さいことに起因して, 塑性変形に生じる粉末表面絶縁層の部分的な破壊が抑制されていることによる。また後述するが, Licalloy™ 圧粉磁心は結着樹脂が熱劣化しないような比較的低温度の熱処理で良好な磁気性能を発揮するため, このことも高い電気抵抗を発現する要因と考えられる。

他方, Licalloy™ 圧粉磁心の P_h も他の圧粉磁心より低い値を示す。結晶性軟磁性金属を用いた圧粉磁心では, 試料作製工程中に導入される応力に基づいた歪を緩和するために, 1073 K 以上の高温にて焼鈍する必要がある。他方, Licalloy™ では, 773 K 付近にガラス遷移温度を生じるため, この付近の温度で焼鈍することにより構造緩和に基づいた内部応力の開放が進むことが予測される。既存の Fe 基アモルファス薄帯及び Licalloy™ と同組成金属ガラス薄帯を丸棒に巻きつけ, 丸棒の半径 r_0 と焼鈍後薄帯の半径との比率 r/r_0 を測定すると, 金属ガラスでは, 過冷却液体領域付近の温度で概ね $r/r_0=1$ となるのに対し, Fe 基アモルファス合金では結晶化温度付近まで昇温しても $r/r_0<1$ となる。薄帯に癖がつくということは, 内部応力が緩和して丸棒の形になじんだことを示し, r/r_0 は潜在していた内部応力の緩和の程度を表していると解釈できる。 $r/r_0=1$ となる金属ガラスでは T_g 付近の熱処理で構造緩和され易く, 既存のアモルファス合金に比べ内部応力が十分に開放されることを表している。従って, Licalloy™ コアの P_h が低いのは, 熱処理により十分応力が開放されることにより, 金属ガラスの有する良好な軟磁気特性が出現したことも一因と言える。

このように Licalloy™ 圧粉磁心は, アモルファス磁性金属が有する良好な軟磁気特性を, 比較的低温度の熱処理で出現させることが可能であり, これに基づいて低いヒステリシス損

失を示すのに加え, 低温熱処理により結着樹脂の熱劣化をほとんど引き起こさず高い抵抗値を実現することに基づいて渦電流損失を生じにくいことにより, 著しく低いコアロスを実現できることが判った。

3.2 動特性

Licalloy™ 圧粉磁心が有する低鉄損特性が及ぼす電源への影響を明らかにするために, コアの動特性を測定した。Fig.7 に, 評価に用いた電源回路図を示す。コアの評価は, スイッチング電源の力率改善回路部のチョークコイルとして搭載したときの, 電源効率(η)及びコア部の温度上昇値を測定した。比較の為に, Fe-Al-Si 合金コアの測定も行なった。

Fig.8 に電流値(I)に対する η の変化を示す。いずれの I においても Licalloy™ コアの η は Fe-Al-Si 合金コアよりも大きな値を示しており, $I=5\text{A}$ 付近では, Licalloy™ コアの方が Fe-Al-Si 合金コアよりも, 約 2% 程度大きい値を示している。但し, I の増大に伴い, Licalloy™ と Fe-Al-Si 合金コアとの

Fig.8 Changes in efficiency (η) for the Licalloy™ core and Fe-Al-Si core as a function of the output current (I_o).

Fig.7 Electrical circuit diagram for the evaluation of Licalloy™ and Fe-Al-Si cores.

差は小さくなる。Iは比較的小さな領域では、損失の大半が鉄損であるのに対し、Iの大きな領域では巻き線の銅損が支配的となるため、上述の傾向が見られたものと考えられる。

Fig.9にIに対する温度上昇値(ΔT)を示す。Iと η の関係と同様に、いずれのIにおいてもLiquialloy™コアの ΔT はFe-Al-Si合金コアよりも低い。このようにLiquialloy™コアは低損失であるため、発熱量が小さいことが明らかとなった。以上の結果より、Liquialloy™コアの有する低損失特性に起因し、電源自体の効率改善が可能であり、これに伴って発熱量も抑制できることから、今後の電源の高性能化、省エネに有効であることが明らかとなった。

4 ま と め

Fe基金属ガラス(Liquialloy™)粉末を用い、圧粉磁心を作製し既存の圧粉磁心と比較することにより以下のことが明らかとなった。

- (1) Fe-基金属ガラス(Liquialloy™)は、その高いアモルファス形成能に起因して、一般的な水アトマイズ法にてアモルファス単相組織を有する球形粉末を作製することが可能である。
- (2) Liquialloy™ コアは、従来の圧粉磁芯と同等の良好な直流重畳特性を示し、且つフェライト磁芯に匹敵する低い鉄損を示す。これらは、Liquialloy™の有する良好な軟磁気特性と、高い固有抵抗、高い硬度及び結着樹脂の熱劣化を伴わないような低温熱処理が実現可能であることに起因する。
- (3) Liquialloy™コアをスイッチング電源の力率改善回路のコアとして用いると、従来高性能コアとして用いられているFe-Al-Si コアよりも高い電源効率を実現し、これに基づいて発熱量が低下する。

文 献

- 1) H.Sadamura, M.Namekata, M.Kono, H.Kobayashi and N.Ishikawa: "EMI reduction technique of switching regulations and its measurement verification", IEICE Trans. on Elect., (Jpn. Ed.), J86-C(2003)1169-1176.
- 2) R.Hasegawa, R.H.Hathaway and C.F.Chang: "Magnetic properties of consolidated glassy metal powder cores", J. Appl. Phys., 57(1985)3566-3568.
- 3) S.Minakawa and T.Masumoto: "Warm consolidation of amorphous metallic powder composites for AC applications", IEEE Trans. Magn., MAG-23(1987)3245-3247.
- 4) I.Endo, I.Otsuka, R.Okubo, A.Shintani, M.Yoshino and

Fig.9 Temperature rise (ΔT) for the Liquialloy™ core and Fe-Al-Si core as a function of the output current (I_o).

M.Yagi: "Fe-based amorphous soft-magnetic powder produced by spinning water atomization process (SWAP)", IEEE Trans. Magn., 35(1999)3385-3387.

- 5) A.Inoue and J.S.Gook: "Fe-Based ferromagnetic glassy alloys with wide supercooled liquid region", Mater. Trans. JIM, 36(1995)1180-1183.
- 6) A.Inoue and J.S.Gook: "Multicomponent Fe-based glassy alloys with wide supercooled liquid region before crystallization", Mater. Trans. JIM, 36(1995)1282-1285.
- 7) A.Inoue and J.S.Gook: "Effect of additional elements (M) on the thermal stability of supercooled liquid in $Fe_{72-x}Al_5Ga_2P_{11}C_6B_4M_x$ glassy alloys", Mater. Trans. JIM, 37(1996)32-38.
- 8) A.Inoue, B.Shen, H.Koshiba, H.Kato and A.R.Yavari: "Co-Based Bulk Glassy Alloy with Ultrahigh Strength and Soft Magnetic Properties", Nature Materials, 2(2003)661-663.
- 9) S.Yoshida, T.Mizushima, A.Makino and A.Inoue: "Thickness and frequency dependence of core losses in Fe-based glassy alloys", J. Magn. Soc. Jpn., 23(1999)871-874.
- 10) T.Mizushima, K.Ikarashi, S.Yoshida, A.Makino and A.Inoue: "Soft magnetic properties of ring shape bulk glassy Fe-Al-Ga-P-C-B-Si alloy prepared by copper mold casting", Mater. Trans. JIM, 40(1999)1019-1022.
- 11) S.Yoshida, T.Mizushima, T.Hatanai and A.Inoue: "Preparation of New Amorphous Powder Cores Using Fe-Based Glassy Alloy", IEEE Trans. on Mag., 36(2000)3424-3429.