非晶質磁性薄帯の鉄損に及ぼす スクラッチ・部分的結晶化の効果

Effect of Scratching or Local Crystallization on the Core Loss in an Amorphous Ribbon

成田賢仁・秦 久敏・山崎二郎・福永博俊 九州大学工学部, 福岡市東区箱崎 6-10-1

K. Narita, H. Hata, J. Yamasaki and H. Fukunaga

Dept. of electrical engng., Kyushu Univ., Fukuoka 812

Amorphous ribbons have a large core loss at high-frequency driving field because of their wide magnetic domains. In this paper, we report on the improvement for high frequency loss by scratching or local crystallization.

The core loss measured at 20 kHz decreases by scratching or local crystallization, and this effect becomes remarkable with decreasing the space of scratches or locally crystallized regions. On the contrary, the squareness ratio of the DC hysteresis loops becomes small and then the DC hysteresis loss increases after scratching or local crystallization.

It is observed that magnetic domains are refined by scratching. However, this refinement occurs only in the vicinity of scratches when the space of scratches is wide. When the spaces are narrow, domains are refined in all the region between scratches and the number of domain walls is large. In the case of local crystallization, it is also observed that domains are refined.

These results suggest that the observed improvement in high frequency core loss can be attributed to the decrease in the eddy current loss which is caused by the refinement of magnetic domains.

1. ま え が き

非晶質磁性リボンは一般に磁壁の数が少ないため、その鉄損の周波数特性は、試料の抵抗率、厚みおよび直流特性などから期待されるほど良好でない¹⁾。そこで近年、アモルファスリボンの高周波での鉄損を低減する目的から、磁壁の数を増加させる方法がいくつか提案されている^{2,3,4)}。そこで筆者らも、方向性けい素鋼板の鉄損低減策として用いられているスクラッチ加工⁵⁾およびスクラッチ加工と同様な効果が期待できる部分的結晶化を行ない、磁壁の数を増加させ、アモルファスリボンの高周波での鉄損の低減を試みるとともに、直流磁気特性および磁区構造に及ぼす影響を検討した。

2. 試料および実験方法

試料としては、片ロール法で作製した非晶質 $\text{Fe}_{78}\text{Co}_8\text{Si}_5\text{B}_{15}$ 合金 (幅約1.0 mm, 厚み約20 μm) を用いた。この試料に350℃で30分間磁界中 (約20 Oe) で熱処理を施した後、スクラッチ加工および部分的結晶化を行なった。スクラッチ加工および部分的結晶化は、Fig. 1(a) に示すように、リボンの自由面にリボン軸に垂直に施した。ス

クラッチ加工はガラス切りで行ない、スクラッチの幅を約10~40 μm とした、また、赤熱した直径50 μm のタングステン線に試料を数秒間押しあてることにより部分的結晶化を行なった (Fig. 1(b)参照)。なお、スクラッチおよび部分的結晶化の間隔は10, 5, 2.5 mm とした。

スクラッチ加工および部分的結晶化前後において、試料のヒステリシスループおよび鉄損の測定、ならびに磁区模様の観察を行なった。磁化特性および鉄損の測定は

Fig. 1

Methods of scratching and local crystallization.

直線状試料（長さ約30 cm）について行ない、鉄損は磁化力正弦波のもとで測定した。磁区模様の観察には走査型電子顕微鏡（加速電力30 kV）を用いた。なお、磁区模様を観察する場合の試料の長さは約5 cmとした。

3. 実験結果および検討

1) スクラッチ加工

Fig. 2にスクラッチ間隔の逆数に対する鉄損の変化を示す。鉄損としては、励磁周波数20 kHz, 最大磁束密度 $B_m = 0.5, 1.0, 1.4$ Tにおける値を示してある。縦軸はスクラッチ加工前の鉄損の値（ $B_m = 0.5, 1.0, 1.4$ Tでそれぞれ12.8, 34.3, 55.0 mJ/kg）を1として、スクラッチ加工後の鉄損の値を規格化したものである。スクラッチ加工により鉄損は減少し、その鉄損減少効果はスク

Fig. 2 Effect of scratch on core loss.

Fig. 3 DC hysteresis loops measured before and after scratching.

- (a) before scratching
- (b) spacing of scratches = 10 mm
- (c) spacing of scratches = 5 mm
- (d) spacing of scratches = 2.5 mm

ラッチ間隔が小さくなるほど著しくなっていく傾向にあることが認められる。また、 B_m が低いほど減少効果は著しく、スクラッチ間隔0.25 cmの場合、 B_m が0.5, 1.0, 1.4 Tでスクラッチ加工前に比べてそれぞれ40%, 20%, 7%の鉄損減少となっている。

つぎにスクラッチ加工による鉄損の軽減効果を理解するために、スクラッチ加工の直流磁化特性に及ぼす効果を検討した。**Fig. 3**にスクラッチ加工前後の直流ヒステリシスループを示す。スクラッチ加工を施すと角形比が悪くなり、しかもスクラッチ間隔が小さくなるほど角形比の減少が顕著となっていることが認められる。角形比の悪化は、スクラッチ加工時に生ずる応力および表面の凹凸に基づく反磁界によるものと考えられる。**Fig. 4**には、スクラッチ加工前および0.25 cm間隔でスクラッチ加工を施した後の直流ヒステリシス損失を最大磁束密度 B_m に対して示してある。スクラッチ加工によりヒステリシス損失は増加し、その増加は B_m が高いほど大きいことが認められる。

以上のように、スクラッチ加工は、直流ヒステリシス損失を増加せしめるにもかかわらず高周波での鉄損を減少せしめることが明らかとなった。これは、スクラッチ加工により磁壁の数が増加し、うず電流損失が小さくなったためと考えられる。そこで、スクラッチ加工前後の磁区模様を観察することにした。

Fig. 5には磁界中熱処理後、スクラッチ加工を施していない試料の磁区模様を示す。(a)は磁界なしの状態、試料のほぼ中央に180°磁壁が1枚観察される。直流磁界をリボン軸方向に印加すると、(b)のように磁壁の移動のみが観察される。このように、磁界中熱処理を行なったままのリボンでは1枚の磁壁の移動のみにより磁化過程が進み、磁界を印加しても磁壁の発生は見られなかった。

Fig. 4 DC hysteresis loss measured before and after scratching.

Fig. 5
Domain patterns
observed before
scratching or local
crystallization.

Fig. 6
Domain patterns
observed after
scratching.

つぎに、スクラッチ加工後の磁区模様を観察した。

Fig. 6 (a)にスクラッチを1本入れた状態の磁区模様を示す。(a)ではスクラッチの近傍で磁壁間隔の狭い磁区が観察されるが、その磁区は試料端の方に曲がったり、消滅したりしている。このようにスクラッチ間隔が広い場合には加工による磁区の細分化はスクラッチ近傍でのみ起こり、試料全体にわたっての磁壁の数の増加はあまり大きくないと考えられる。一方、**Fig. 6 (b)**に見られるように、スクラッチを0.25 mm間隔で2本入れた状態では、2本のスクラッチにほぼ垂直な数本の磁壁が観察され、スクラッチに挟まれた全領域で磁区の細分化が起こっている。このため、スクラッチ間隔を狭くすると試料全体にわたっての磁壁の数の増加は著しくなると考えられる。

以上のように、磁界中熱処理を施したままの試料では磁区幅が広く、1枚の磁壁の移動によって磁化過程が進むが、スクラッチ加工をすれば磁区の細分化が行なわれ、試料全体にわたっての磁壁の数の増加はスクラッチ間隔が小さくなるにつれて大きくなる。このような静的な磁区模様は高周波領域では必ずしもそのまま保存され

ないであろうが傾向としては一致していると考えられ、**Fig. 6**で観察された磁区の細分化がうず電流損失低減の主要な要因の一つであると考えられる。

一方、さらに高い周波数、大振幅磁界駆動領域ではスクラッチの有無にかかわらず磁区の発生、磁化回転などが起こると考えられるため、スクラッチ加工によるうず電流損失の低減効果は減殺されよう。**Fig. 2**に示された高磁束密度領域($B_m=1.4$ T)でスクラッチ加工の効果が $B_m=1.0, 0.5$ Tの場合に比べて小さいのはこのような理由によるものと思われる。

u) 部分的結晶化

Fig. 7に結晶化間隔の逆数に対する鉄損の変化を示す。励磁周波数20 kHz, $B_m=0.5, 1.0, 1.4$ Tの結果である。部分的結晶化もスクラッチ加工と同様に、いずれの B_m に対しても結晶化間隔が小さくなるほど鉄損は減少している。結晶化間隔0.25 cmの場合についてみると、 B_m が0.5, 1.0, 1.4 Tで部分的結晶化前に比べてそれぞれ10%, 6%, 5%の鉄損減少が見られ、 B_m が低いほど減少効果は大であるが、スクラッチ加工と比べると

Fig. 7

Effect of local crystallization on core loss.

その効果は小さい。

一方、直流磁気特性に及ぼす効果は、部分的結晶化もスクラッチ加工と同様で、角形比は悪化し、ヒステリシス損失の増加も認められた。

以上のように、部分的結晶化による高周波損失の低減も、スクラッチ加工の場合と同様にうず電流損失の減少によるものと考えられ、磁区模様の変化が予測される。そこで、部分的結晶化による磁区模様の変化について調べた。

Fig. 8 に結晶化後の磁区模様を示す。この場合も、スクラッチ加工の場合と同様に、磁壁の増加が観察される。

以上のように、部分的結晶化もスクラッチ加工と同様に磁壁の数の増加によりうず電流損失を減少させ、高周波での鉄損を低減させるものと考えられる。

4. む す び

以上、スクラッチ加工および部分的結晶化による鉄損の変化を述べた。これらの手法により、高周波での鉄損

Fig. 8

Domain patterns observed after local crystallization.

が減少することが確かめられた。スクラッチ加工では、スクラッチ間隔が小さくなるほど試料全体にわたっての磁壁の数が增加する。部分的結晶化でも同様な効果が観察された。このような磁壁の数の増加がうず電流損失を少させていると考えられる。

スクラッチ加工あるいは部分的結晶化による鉄損低減の機構をより鮮明にするためには、今後、交番磁界化での磁区模様の変化を明らかにする必要がある。

〔参考文献〕

- 1) 高橋：日本応用磁気学会誌，**1**, 3, 6 (1977).
- 2) H. Fujimori, H. Yoshimoto and H. Morita: IEEE Trans. Magn., **MAG-16**, 1227 (1980).
- 3) R. F. Krause and F. E. Werner: Dig. Intermag. Conf., Grenoble, 10-1 (1981).
- 4) R. Hasegawa, G. E. Fish and V. R. V. Ramanan: Dig. RQ4 Conf., Sendai, 4.4(1) (1981).
- 5) T. Nozawa, T. Yamamoto, Y. Matsuo and Y. Ohya: IEEE Trans. Magn., **MAG-15**, 972 (1979).

1981年12月14日受理，1982年2月9日採録