方向性珪素鋼板の耐熱型磁区細分化技術の開発

Development of Heat-Proof Domain-Refining Technique in Grain-Oriented Si Steel

佐藤圭司・福田文二郎・中野 恒・本田厚人・菅 孝宏

川崎製鉄(株)鉄鋼研究所, 岡山県倉敷市水島川崎通り1丁目 (〒712)

K. Sato, B. Fukuda, K. Nakano, A. Honda and T. Kan

Iron & Steel Res. Labs., Kawasaki Steel Corp.,

1 Kawasaki-dori, Mizushima, Kurashiki 712

A heat-proof magnetic-domain-refining technique has been developed that performs well when applied to a wound-core transformer in which the iron loss suffered with non-refined material can be reduced by about 10%. The new technique is characterized by grooves introduced on the sheet surface after the final cold-rolling process.

Key words: heat-proof magnetic domain refining, grain-oriented silicon steel

1. はじめに

方向性珪素鋼板の鉄損はその発生要因からヒステリシス損, 古典的渦電流損および異常渦電流損に大別される。このうち前者二つの低減のためには, 強力なインヒビターによる(110) [001]方位集積度の向上, 鋼中の残留不純物, 内部歪などの低減, 鋼板の薄手化, Si含有量の増大などの金属学的手法がとられてきた。一方, 異常渦電流損は主に磁区構造の存在によって生じる損失であり, これを低減するためにこれまでにさまざまな磁区細分化技術が開発されている^{1)~6)}。

その一つとして局所的な歪を導入する方法がある^{1)~3)}。これは方向性珪素鋼板の圧延方向に対して直角方向にけがきを入れる¹⁾, またはレーザー光²⁾, プラズマ炎³⁾を照射するなどにより達成される。しかしながら, これらの方法で作製した低鉄損材を高温で焼鈍すると, 導入された歪が解放されることから鉄損低減効果が消失する。したがって, これらは歪取焼鈍を必要とする巻鉄心トランス用材料としては用いることができず, 積鉄心トランス材料としてのみ利用されてきた。

これに対して, 歪取焼鈍後も有効に鉄損低減効果が維持される, 耐熱型磁区細分化技術を開発すべく幾つかの研究が行われている^{4)~6)}。

我々は耐熱型磁区細分化技術として, 最終冷間圧延板にエッチングにより局所的に線状溝を形成する技術を開発した⁶⁾。本報では, この技術(以下, エッチング法と称

する)の概要, 製品の磁気特性について述べた後, 本法をプラズマ照射法と比較しながら両者の磁区細分化効果に検討を加える。

2. 新しい耐熱型磁区細分化技術の概要

2.1 最終冷間圧延板への線状溝の形成

Fig. 1 にエッチング法による新材料の製造プロセスを示す。図中ハッチング部分が新たに開発した技術を示しており, 工業的にはハッチング部が連続的に処理される設備となっている。最終冷間圧延後の鋼板にエッチングレジストインキを局所的に非塗布部を残しつつ圧延方向に直交する向きにストライプ状に塗布する。これを電解エッチングし非塗布部(すなわち地鉄露出部)に溝を形成する。溝は幅が約200 μm , 深さが20 μm , 圧延方向の間隔を3~4 mm とする。しかる後, アルカリ浴中に浸漬することによりエッチングレジストを剥離し, 通常の脱炭焼鈍, 仕上げ焼鈍を経た後, 平坦化焼鈍および絶縁コートを形成する。得られた製品の断面のようすを

Fig. 1 Process of the newly developed technique.

Fig. 2 に示す、図にみられるように溝部にも絶縁被膜が形成されており、絶縁特性に全く問題ないことがわかる。

2.2 新材料の製品特性

Fig. 3 はエッチング法によって製造した新材料の 1.7 T, 50 Hz における鉄損 $W_{17/50}$ と 800 A/m における磁束密度 B_8 の関係を示したものである。図にはエッチング処理を行わない従来の方法によって製造した鋼板の磁気特性も示す。エッチング法により従来法に比べて 10～15% の鉄損低減効果が得られ、 $W_{17/50} < 0.80$ W/kg の低鉄損も達成可能である。また、鉄損低減効果は素材 B_8 値が高いほど大きい。これはプラズマ照射による技術と同様である。溝の導入により B_8 値は 0.02～0.03 T 減少するが、後述 (Fig. 9) するように、 $B \sim 1.7$ T あたりまでの励磁特性は溝の導入によりほとんど変化を受けな

Fig. 2 Cross-sectional view of the grooved region in a steel sheet after final annealing.

Fig. 3 Iron losses of steel sheets with and without grooves (0.23 mm in thickness).

いため実用上問題ないと考えられる。溝の導入によって鉄損が減少するのは主として溝近傍に生成する磁極による反磁界効果のため磁区が細分化すること起因すると考えられる。

Fig. 4 に新材料と従来材の磁歪特性を示すが、両者で大差は認められない。

Fig. 4 Magnetostriction curves of materials with and without grooves.

Fig. 5 Photograph of step-lap wound core made with the newly developed materials.

Table 1 Magnetic properties of wound-core transformers (0.23 mm in thickness)

Materials	Magnetic properties of sheets			Magnetic properties of transformer cores			Building factor (B.F.)	
	B8	W17/50	W15/60	W17/50	W15/60	Noise17/50	W17/50	W15/60
	(T)	(w/kg)	(w/lb)	(w/kg)	(w/lb)	(dB)		
With grooves	1.90	0.782	0.343	0.793	0.339	43	1.01	0.99
Without grooves	1.93	0.892	0.389	0.911	0.384	42	1.02	0.99

$$B.F. = \frac{\text{Iron loss of transformer cores}}{\text{Iron loss of materials}}$$

Fig. 6 Relationship between iron loss and flux density of the original sheets before and after plasma irradiation and grooving.

2.3 巻鉄心変圧器特性

新材料の実機特性を評価するため巻トランスを作製した。トランス形状は Fig. 5 に示すとおりであり、容量 20 kVA、鉄心重量 46 kg のステップラップ型鉄心である。

測定結果を Table 1 に示す。なお、表中には新材料とともに比較のために従来法による材料の結果も示す。表より鉄心のビルディングファクター (B.F.) は両者とも 1.0 程度で同等であり、素材特性がトランス特性に十分反映されていることがわかる。また、騒音についても両者はほぼ同等である。なお、騒音測定方法は Fig. 5 に示したとおりである。

3. エッチング法とプラズマ照射法の磁区細分化効果に関する検討

前述のとおり、エッチング法における鉄損減少は主として溝による反磁界効果に起因すると考えられる。ここではエッチング法とプラズマ照射法を比較しながら磁区細分化効果に関し検討を行った。

3.1 エッチング材とプラズマ照射材の相違

ここでは二つの方法を比較するため製品板（未処理材）を出発材とし、プラズマ照射後およびエッチング後の磁気特性や磁化過程について比較を行った。プラズマ照射は未処理製品板表面に 7.5 mm 間隔で行いエッチング処理は未処理製品板表面に 3 mm 間隔で線状にレーザー照射して被膜を局部的に除去した後、電解エッチングによって除去部に溝を形成した。溝形成後の鋼板は歪取焼鈍を施した。最終冷間圧延板と製品板に溝を形成した場合、得られる特性は完全には同一ではないが、溝による反磁界効果は製品への溝の導入により評価できると考えられ、比較が容易なように製品板にエッチング処理することとした。

Fig. 6 は製品板、プラズマ照射前後およびエッチング、歪取焼鈍前後の鉄損 $W_{17/50}$ を処理前の B_8 に対して示したものである。製品板にプラズマ照射またはエッチングを施すことによって大きな鉄損低減効果が得られているが、エッチング、歪取焼鈍後はプラズマ照射後に比べて $W_{17/50}$ が 0.02 W/kg 程度高い。次に、両者の効果をさらに詳細に検討するため、同一製品板に処理して比較材、プラズマ照射材およびエッチング材を作製し磁気特性や磁化過程について比較を行った。すなわち、製品板の状態、その表面に 7.5 mm 間隔でプラズマ照射した状態およびこれに線状にレーザー照射して絶縁被膜を局部的に除去し、電解エッチングによって除去部に溝を形成した後 Ar 雰囲気中で 800℃×3 h の歪取焼鈍を施した

Fig. 7 Domain patterns before and after PJ irradiation and grooving.

状態の各状態について比較を行った。

Fig. 7 は製品板および各処理後の SEM 観察による磁区模様を示している。製品板では磁区幅が広く、ばらつきが大きいのにに対して、エッチング、歪取焼鈍後、プラズマ照射後は磁区幅が狭くしかも均一になっている。両者を比較するとプラズマ照射後の方が磁区幅がやや狭い。

Fig. 8 に製品板および各処理後の総鉄損、直流ヒステリシス損および渦電流損（総鉄損からヒステリシス損を引いて求めた）と磁区幅の関係を示す。プラズマ照射後とエッチング後でヒステリシス損はほぼ同等である。

また、磁区幅は前述の通りエッチング後の方がプラズマ照射後よりも広く渦電流損は前者の方がやや高い。したがって Fig. 6 で生じた 0.02 W/kg の鉄損差は両者の磁区細分化効果の差に基づく渦電流損低減量の差によ

Fig. 8 Relationship between domain wall spacing and iron loss before and after PJ irradiation and grooving.

Fig. 9 DC magnetization curves before and after grooving and plasma irradiation.

て生じるといえる。

3.2 考察

エッチング法とプラズマ照射法によるヒステリシス損および渦電流損の変化について以下に考察する。

3.2.1 ヒステリシス損の変化 Fig. 9 に直流 B - H 特性を示す。製品板に比べてプラズマ照射後の試料は 0.5 ~ 1.9 T では励磁特性が劣るが飽和磁束密度は製品板と同等である。一方、エッチング後の試料は B が 1.7 T 程

Fig. 10 Change in the domain structure during DC magnetization.

度までは製品板と同等の挙動を示すが、1.7 T 以上では製品板に比べて励磁特性はやや劣り、飽和磁束密度は低い。

Fig. 10 はプラズマ照射後およびエッチング後の試料の処理面、断面および非処理面の磁化過程の磁区を観察したものを示している。エッチングした試料は1.7 T 程度までは処理面側は溝の存在によって磁化が遅れる傾向があるがその分、非処理面側の磁化が速く進行することで磁束密度は製品板と同等になる。したがって溝の形成により B_0 は低下するが、1.7 T あたりまでの励磁特性は変わらず、ヒステリシス損も劣化しないと考えられる。しかし、1.7 T 程度で非処理面側の磁束密度が飽和に達した後 (Fig. 10 Grooving Bottom-C) は、磁化が進行せず、結局飽和磁束密度は製品板に比べて低くなる。一方、プラズマ照射後の試料には照射部に 90° 磁区が形成されており、その影響は非処理面にまで及んでいる。したがって処理、非処理面側ともに磁化が遅れている。この

場合、さらに強い外部磁界を印加することで 90° 磁区は消失し製品板と同等の飽和磁化が得られる。プラズマ照射の場合、1.7 T あたりでの励磁特性は劣化するものの、 B_0 、 H_c も小さくなるためヒステリシス損は増加しないものと考えられる。

4. ま と め

方向性珪素鋼板の最終冷間圧延板にエッチングにより局所的に線状溝を形成する耐熱型磁区細分化技術を開発した。本法によれば、

- (1) 従来材に比べて 10~15% の鉄損低減効果があり、素材の B_0 が高いほど低鉄損が得られた。
- (2) 巻トランスの特性は B.F., 騒音ともに従来材とは同等であった。
- (3) 溝形成による鉄損低減は主として溝部での反磁界効果により磁区が細分化されたものと考えられた。
- (4) 励磁特性は 1.7 T までは従来材と同等であり、し

たがってヒステリシス損の増加も観察されなかった。

文 献

- 1) T. Yamamoto and S. Taguchi: *Soft Magnetic Materials 2, Cardiff Conf. Proceedings*, p. 15 (1975).
- 2) T. Iuchi, S. Yamaguchi and T. Ichiyama: *J. Appl. Phys.*, **53**, 2410 (1982).
- 3) B. Fukuda, K. Sato, T. Sugiyama, A. Honda and Y. Ito: *Proc. ASM Conf. of Hard and Soft Magnetic Materials*,

8710-008, USA (1987).

- 4) T. Nozawa, Y. Matsuo, O. Tanaka, H. Kobayashi, K. Kuroki, M. Yabumoto, K. Hirose and T. Takahashi: *Proceeding of ASM Annual Meeting* (1987).
- 5) H. Kobayashi, E. Sasaki, M. Iwasaki and N. Takahashi: *Soft Magnetic Materials, Conference Digests*, p. 402 (1987).
- 6) K. Sato, B. Fukuda and T. Kan: *11th Annual Conference IIT, Chicago, May* (1992).

1992 年 11 月 19 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録