日本金属学会誌 第 49 卷 第 3 号 (1985) 238-242

方向性けい素鋼板の磁気特性におよぼす板厚と張力の影響

田 口 悟*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 49, No. 3 (1985), pp. 238-242

Effects of Thickness and Tensile Stress on Magnetic Properties of Grain-Oriented Electrical Steel

Satoru Taguchi*

In general, decrease in sheet thickness decreases the core loss due to the decreased classical eddy current loss. However, at small thickness, surface pinning effects on the domain wall movement become dominant. The proportion of anomalous eddy-current loss arising from the domain wall movement is as much as about 45% of the total loss at the commercial frequencies, 50 and 60 Hz, but the relationship between the anomalous loss and the sheet thickness has not been clarified yet. The tensile stress imparted by the inorganic coating decreases the core loss, but there is no evaluation of the effect of thickness with tensile stress on the core loss.

The systematic investigation has been made on specimens with various sheet thickness, for which the chemical polishing technique has been used.

The decrease in core loss with tensile stress was greater for smaller thickness. Especially, for $B_0=1.77$ T, the applied tensile stress increased the core loss for larger thickness and decreased the core loss for smaller thickness. The greater tensile stress decreases the domain wall spacing. The decrease in domain wall spacing with tensile stress was greater for larger thickness than for smaller thickness.

The magnetostriction measurements indicated that the 90° domain volume at a demagnetized state was smaller for smaller thickness, and the volume of new 90° domains created at intermediate inductions due to the need of reducing magnetostatic energy was smaller for smaller thickness. The applied stress decreased the 90° domain volume at a demagnetized state and suppressed the formation of 90° domains at intermediate inductions. The magnetostatic energy due to free poles appearing on the surface was less effective in reducing the domain wall spacing and creating 90° domains for smaller thickness.

The decrease in core loss with stress was due mainly to the decreasing supplementary domains, especially 90° domain volume. The behavior of magnetization for a smaller thickness sheet was similar to that for a larger thickness sheet with larger B_0 .

(Received June 8, 1984)

Keywords: iron-silicon alloy, grain oriented electrical steel, domain structure, domain wall spacing, magnetostriction, core loss, eddy current loss, applied stress

I. 結 言

方向性けい素鋼板は鉄損の減少のために、板厚は薄手化の方向に向っている。古典的渦電流損は板厚の 2 乗に比例するので、鉄損の減少のためには板厚を薄くすることが最も有効である。しかし、板厚が薄くなると表面性状の影響が強くなり、鉄損の減少を妨げる。また、鉄損の最も大きい部分を占める磁壁移動に起因する異常渦電流損は、薄くなると、どのような挙動を示すか明らかでない。方向性けい素鋼板は表面に生成するグラス被膜 (forsterite coating) とさらにその上に塗布する張力コーティングによって地鉄に張力をおよぼし、鉄損を減少させているが、板厚の薄い場合の張力効果と板厚の関係は明らかでない。

そこで先きに、鉄損におよぼす板厚と張力の影響を、方向性の異なる試料を化学処理によって薄くして、調べてみた。この結果、薄くなるほど張力による鉄損の減少率が大きくなる。特に、非常に方向性の悪いものは、板厚が厚いときには、張力を加えると鉄損が増大するが、板厚が薄くなると張力を加えると鉄損が減少する⁽¹⁾。磁区幅と板厚の関係は、板厚が薄くなるほど磁区幅が広がることが明らかになり⁽¹⁾⁻⁽³⁾、また、張力を加えた場合は、磁区幅が僅かしか狭くならない張力の範囲内で、鉄損の著しい減少が見られる⁽⁴⁾。従来、鉄損減少の主要因は張力効果によって磁区幅が狭くなり、異常渦電流損が減少するためと考えられてきた。しかし、これらの現象は、従来の考え方では説明することは難しい。また、板厚と磁歪の関係については

* 新日本製鉄株式会社第三技術研究所 (R. & D. Laboratories-III, Nippon Steel Corporation, Kitakyushu)

未だ論じられていない。本研究では、これらの現象を理解するために系統的な実験を行い、原因について考察した。

II. 実験方法

板厚 0.30 mm, 幅 60 mm, 長さ 300 mm で、大きな結晶の試料を用いた。3%Si で、市販の高透磁率方向性けい素鋼板(オリエントコア・ハイビー)と同じ組成である。

減厚し、平滑な表面をうるためには、過酸化水素に弗化水素を加えた液で処理した。表面の粗さは、触針式表面粗さ測定器を用いて、カットオフ λ_c 0.08 mm の条件で測定した。得られた平均粗さ R_a は 0.03~0.06 μm であった。

磁気測定は、ヨークを使用し、磁場の強さを H コイルで測定する方式の単板測定器⁽⁵⁾で測定した。磁歪は、ヨークを使用した閉磁路で、差動トランス方式の磁歪測定装置⁽⁶⁾で測定した。周波数は 60 Hz である。磁区の観察は、垂直磁界印加コロイド法⁽⁷⁾で、60 Hz で消磁した試料を電磁石の上に乗せ、5~6 mT (50~60 G) の垂直磁界を加えた。試料の上片面に白ラッカーを噴霧して、コロイドの濃淡が鮮明に判別できるようにした。強磁性コロイド液は市販の Ferrofluid を希釈して使用した。

III. 実験結果と考察

Fig.1 には、方向性の異なる試料を化学研磨により薄くしながら逐次的に測定し、鉄損におよぼす張力と板厚の影響を示した。方向性は、800 A/m の磁場における磁束密度 B_g によく対応する。 $B_g=1.98\text{ T}$ は非常に方向性のすぐれたもので、[001]軸の圧延方向からのばらつきは平均は約 3° である。 $B_g=1.84\text{ T}$ は従来の 2 段冷延法で得られる程度の方向性のもので、[001]軸のばらつきは平均は約 7° である。 $B_g=1.77\text{ T}$ は非常に悪いもので、[001]軸のばらつきは平均は 10° 以上で、現在は市販されない程度の方向

Fig.1 Effect of thickness and tensile stress on core loss for various B_g samples.

性のものである。張力による鉄損の減少は方向性のよいものほど大きく、板厚の薄いものほど大きい。しかし、鉄損の板厚依存性は方向性の悪いもので異常を示しており、 $B_g=1.77\text{ T}$ のものは張力効果によって鉄損の逆転が見られる。

Fig.2 は $B_g=1.77\text{ T}$ の試料の 1.7 T, 50 Hz における鉄損 $W_{17/50}$ および 1.7 T における直流ヒステリシス損を 50 倍したヒステリシス損 $Wh_{17/50}$ と張力の関係を示す。ヒステリシス損も張力によって若干の減少はするが、張力による鉄損の増減量は、主として異常渦電流損の増減によることが分かる。

Fig.2 Effect of thickness and tensile stress on core loss and hysteresis loss.

Fig.3 は磁区におよぼす張力の影響を示す。板厚の厚い 0.24 mm のものは、15 MPa の張力を加えると磁区幅は著しく狭くなるが、0.1 mm 程度の板厚になると、張力による磁区幅の減少は僅かである⁽⁸⁾。 $B_g=1.84\text{ T}$ の試料も同様な結果を示す。この結果を Fig.1 および Fig.2 の鉄損と比較すると、鉄損は薄くなるほど張力による減少量が大いだが、磁区幅は薄くなるほど張力による減少は小さくなるという対応のあることが分かる。張力による鉄損の減少の主要因は異常渦電流損の減少であるので、上記の結果は、従来のように磁区幅と異常渦電流損を結びつける考え方とは相反するものである。また、 $B_g=1.77\text{ T}$ の場合のように、張力効果による逆転の現象を説明することはできない。

方向性けい素鋼板の磁区構造は、主として各結晶粒内で [001] 方向に揃った 180° 磁区構造から成っているが、詳細には [001] 軸は圧延方向から傾きがあるので、補助磁区 (90° 磁区および 180° 磁区) の発生と主構造である 180° 磁区幅の細分化によって、静磁エネルギーを効果的に減少させる磁区構造となっていると考えられている。このような補助磁区を考慮すると、張力を加えると、初め 90° と 180° の補助磁区が消失し、その後 180° の主磁区だけになるの

Fig.3 Effect of thickness and tensile stress on domain structure.

で、静磁エネルギーを減少させるために 180° 磁区の細分化がおこると期待される。また、板厚が薄いほど、張力によって磁区幅の減少が小さいという観測事実は次のように説明することができる。薄くなるほど表面磁極の発生に基づく静磁エネルギーが小さいので、消磁状態では、薄くなるほど磁区幅が広くなり、同時に 90° 磁区の発生量も少なくなる筈である。したがって、張力による磁区構造変化は薄くなるほど小さくなる。

Fig.4 は磁歪と板厚の関係を示す。板厚が薄くなると正の磁歪の値が減少している。けい素鋼板では、 90° 磁区が消失すれば正の磁歪を示し、 90° 磁区が発生すれば負の磁

歪となるので、Fig.4 の結果は、板厚が薄くなるほど、消磁状態で 90° 磁区の量が少なくなることを示している⁽⁸⁾。このことは、薄くなるほど静磁エネルギーの影響が少なくなり、 90° 磁区が減少するという上述の考え方を支持している。

磁化は 180° 磁区幅の増大と 90° 磁区の消失によって進行するが、静磁エネルギーの増大をより効果的に緩和するために、磁化過程でむしろ 90° 磁区が発生する必要がある。この 90° 磁区の発生と板厚の関係を解明するため、方向性のよい鋼板を圧延方向および圧延方向から 10° および 15° の方向に切断した試料で以下の実験を行った。この結

Fig. 4 Magnetostriction vs. flux density for various B_8 samples.

Fig. 5 Effect of thickness and tensile stress on core loss for samples taken at various angles (0° , 10° , 15°) to rolling direction.

果を Fig. 5 に示す。板厚と張力の鉄損におよぼす影響は Fig. 1 の場合と非常によく似ている。Fig. 6 はこれら試料の磁歪を示す。図に見るように、切断角が増大すると大きな負の磁歪が発生している。しかし、薄くなるほど負の磁歪が小さくなる。先きに指摘したように、負の磁歪は 90° 磁区の発生を意味するので、薄くなるほど負の磁歪が小さくなるのは、磁化が進行し、 180° 磁区幅が広がっても、薄いほど静磁エネルギーの増大の影響が小さいので、 90° 磁区の発生量が少なくてもよいことを示している⁽⁸⁾。

同一の板厚の場合、30 MPa 以上の大きな張力を加えると、磁歪の負の極大値は張力とともに大幅に減少することが実験と理論によって示されている⁽⁹⁾。7 および 15 MPa の張力を加えた場合の磁歪を Fig. 7 に示す。 $B_8=1.84$ T

Fig. 6 Effect of thickness on magnetostriction for samples taken at various angles (0° , 10° , 15°) to rolling direction.

Fig. 7 Effect of thickness and tensile stress on magnetostriction for various B_8 samples.

と $B_8=1.80$ T の試料では、磁歪の負の極大値は、張力の増加によって、わずかであるが減少している。張力を加えると消磁状態の 90° 磁区が消失するので、Fig. 7 の負の磁歪の変化は、磁化過程で発生する 90° 磁区の量に対応している。板厚が薄くなるほど、磁化過程で発生する 90° 磁区の量が少ないことが分かる。

以上の実験と考察から、張力を加えた場合、磁区幅が僅

かしか狭くならない範囲の張力で、鉄損は大幅に減少すること⁽⁴⁾、および、張力による鉄損の減少は板厚が薄くなるほど大きく、張力による磁区幅の減少は薄くなるほど小さいという現象は、張力による補助磁区、特に 90° 磁区の消滅と磁化過程における 90° 磁区の発生を考慮することによって定性的に説明できることが分かった。

同一の板厚では、方向性のよいものほど、消磁状態で 90° 磁区の量が少なく、磁化過程で発生する 90° 磁区の量も少ない。従って、方向性に対応する B_8 の値は、薄くなってもほとんど変わらないが、磁化の過程では、板厚が薄くなるほど、90° 磁区の量が少なくなるので、より方向性のよいものと類似な挙動をする。

IV. 結 言

方向性けい素鋼板におよぼす板厚と張力の影響について実験した結果、以下のことが判明した。

(1) 方向性のよいものほど、張力による鉄損の減少量が大きい。板厚が薄いほど、張力による鉄損の減少量が大きい。ただし、非常に方向性の悪いものは、板厚が厚いとき張力を加えると鉄損が逆に増大する。

(2) 張力を加えた場合の 180° 磁区幅の減少は板厚が薄くなるほど少ない。非常に薄い場合は、大きな張力でも、磁区幅は僅かしか狭くならない。

(3) 板厚が薄くなるほど、正の磁歪が小さくなり、消磁状態で 90° 磁区の量が少なくなることを示している。

(4) 張力を加えて消磁状態の 90° 磁区を消失した場合は、板厚が薄くなるほど負の磁歪が小さくなる。同一板厚

では、張力が大きいほど負の磁歪が小さくなる。このことは、板厚が薄いほど磁化過程で発生する 90° 磁区の量が少ないこと、および同じ板厚では、張力が大きいほど磁化過程で発生する 90° 磁区の発生量が少ないことを示している。

これらのことから、(1) 板厚が薄くなるほど、磁極の発生による静磁エネルギーの増大が少なくなり、磁区幅の減少と 90° 磁区の発生が少なくなること、(2) 張力による鉄損の減少の主要因は、補助磁区特に 90° 磁区の量の減少であること、(3) 磁化過程では、板厚が薄くなるほど、90° 磁区の量が少なくなり、より方向性のよいものと類似な挙動することなどが指摘される。

文 献

- (1) 田口 悟：日本金属学会講演概要，(1981・11 月)，444.
- (2) S.D.Washko and R.F.Miller：J.Mag. Mater.，**19** (1980)，361.
- (3) 西池氏裕，飯田嘉明，佐藤圭司，的場伊三夫：日本金属学会講演概要，(1984・4 月)，p.320.
- (4) 田口 悟：日本金属学会誌，**48**(1984)，97.
- (5) T.Yamamoto and Y.Ohya：IEEE Trans. Mag.，**MAG-10**(1974)，157.
- (6) 山本孝明，大宅良宏：電子計測，磁性材料合同研究会資料，EM-78-32，MAG-78-54.
- (7) K.Mohri，S.Takeuchi and T.Fujimoto：IEEE Trans. Mag.，**MAG-15**(1979)，1598.
- (8) 田口 悟：日本金属学会講演概要，(1984・4 月)，p.320.
- (9) P.Allia，A.Ferro-Milone，G.Montalenti，G.P. Soard and F.Vinai：IEEE Trans. Mag.，**MAG-14** (1978)，362.