

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6315084号  
(P6315084)

(45) 発行日 平成30年4月25日(2018.4.25)

(24) 登録日 平成30年4月6日(2018.4.6)

(51) Int. Cl.	F I		
<b>C 2 2 C</b> 38/00 (2006.01)	C 2 2 C	38/00	3 0 3 U
<b>H 0 1 F</b> 1/147 (2006.01)	H 0 1 F	1/147	1 8 3
C 2 1 D 8/12 (2006.01)	C 2 1 D	8/12	D
C 2 1 D 9/46 (2006.01)	C 2 1 D	9/46	5 0 1 B
C 2 2 C 38/60 (2006.01)	C 2 2 C	38/60	

請求項の数 5 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2016-517949 (P2016-517949)	(73) 特許権者	000006655
(86) (22) 出願日	平成27年5月8日(2015.5.8)		新日鐵住金株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2015/063357		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(87) 国際公開番号	W02015/170755	(74) 代理人	100064908
(87) 国際公開日	平成27年11月12日(2015.11.12)		弁理士 志賀 正武
審査請求日	平成28年10月28日(2016.10.28)	(74) 代理人	100175802
(31) 優先権主張番号	特願2014-97685 (P2014-97685)		弁理士 寺本 光生
(32) 優先日	平成26年5月9日(2014.5.9)	(74) 代理人	100106909
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		弁理士 棚井 澄雄
		(74) 代理人	100134359
			弁理士 勝俣 智夫
		(74) 代理人	100188592
			弁理士 山口 洋

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 低鉄損で低磁歪の方向性電磁鋼板

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

鋼板母材と、前記鋼板母材の表面に形成された1次被膜と、前記1次被膜の表面に形成された張力絶縁被膜とを有する方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行な方向の長さが300mmかつ板幅方向と平行な方向の長さが60mmである短冊状のサンプルを前記方向性電磁鋼板から採取し、前記サンプルの少なくとも片面を酸洗することにより、前記張力絶縁被膜の表面から、前記鋼板母材と前記1次被膜との界面よりも前記鋼板母材側に5μmの深さ位置までの範囲を除去した後に前記サンプルの反り量を測定したとき、

前記反り量が下記の式A及び式Bを満たし、

前記張力絶縁被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_t$ を前記1次被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_p$ で除した値 $d_t / d_p$ が0.1以上3.0以下である

ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

$$15000\mu\text{m} \leq SA - SC \leq 35000\mu\text{m} \dots (\text{式A})$$

$$900\mu\text{m} \leq SB + SC \leq 14000\mu\text{m} \dots (\text{式B})$$

ここで、SA、SB、SCは以下を示す。

SA；前記1次被膜及び前記張力絶縁被膜が形成された片面のみを酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位μmでの反り量

SB；前記1次被膜及び前記張力絶縁被膜が形成された前記片面と反対側の片面のみを酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位μmでの反り量

S C ; 両面を酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位  $\mu\text{m}$  での反り量

ただし、S A と S B の測定の際には酸洗した面と同一方向への反りを正の値とし、S C は S A と同じ方向への反りを正の値と定義する。

【請求項 2】

前記張力絶縁被膜の単位  $\mu\text{m}$  での平均膜厚  $d_t$  を前記 1 次被膜の単位  $\mu\text{m}$  での平均膜厚  $d_p$  で除した値  $d_t / d_p$  が 0.1 以上 1.5 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 3】

前記張力絶縁被膜の単位  $\mu\text{m}$  での平均膜厚  $d_t$  を前記 1 次被膜の単位  $\mu\text{m}$  での平均膜厚  $d_p$  で除した値  $d_t / d_p$  が 0.1 以上 1.0 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の方向性電磁鋼板。

10

【請求項 4】

前記張力絶縁被膜の平均膜厚が  $0.5 \mu\text{m}$  以上  $4.5 \mu\text{m}$  以下であることを特徴とする請求項 1 から 3 の何れか 1 項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 5】

前記 1 次被膜及び前記張力絶縁被膜によって前記鋼板母材に与えられる合計の張力が  $1 \text{MPa}$  以上  $10 \text{MPa}$  以下であることを特徴とする請求項 1 から 4 の何れか 1 項に記載の方向性電磁鋼板。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、トランスなどの鉄心に用いられる方向性電磁鋼板に関するものであり、特に、鉄心の低鉄損化のみならず低騒音化にも寄与する、低鉄損で低磁歪の方向性電磁鋼板に関するものである。

本願は、2014年5月9日に、日本に出願された特願2014-97685号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

方向性電磁鋼板は、主として変圧器に代表される静止誘導器に使用される。その満たすべき特性としては、鉄損が低いこと、容易に励磁できること、磁歪が小さいこと等があげられる。

30

変圧器は、据え付けられてから廃棄されるまで長期間にわたって連続的に励磁され、エネルギー損失を発生し続けることから、これらの特性うち、特に鉄損が低いことが求められている。

【0003】

方向性電磁鋼板の鉄損を低減するためには、ゴス方位と呼ばれる(110)[001]方位への集積を高めること、製品鋼板中の不純物を低減すること、結晶粒の大きさを小さくすること、鋼板に面張力を与える被膜を付与すること等の冶金学的手法により鉄損が改善されてきたが、これらの手段には限度があり他の手法による鉄損低減が求められていた。

40

【0004】

このような課題に対し、磁区そのものを細分化する手法が開発され、現在では、鋼板の表面に対しレーザを照射することによって歪を導入し、磁区の幅を細分化して鉄損を低減する技術が広く用いられるようになってきている。

【0005】

このようにして、方向性電磁鋼板の鉄損は著しく改善されてきたが、また一方で、トランスなどの電磁応用機器にも騒音や振動の低減がより一層要請されるようになり、トランスの鉄心に使われる方向性電磁鋼板には、低鉄損とともに低磁歪であることも求められている。

【0006】

50

鉄損を低減するためのレーザー照射は、残留歪の導入により磁区幅の細分化に効果があるが、一方で磁歪の発生源となることが知られている。

そこで、被膜が形成された方向性電磁鋼板にレーザー照射して磁区制御を行う際に、レーザー照射条件及び被膜張力を調整することにより磁歪を低減して、低鉄損と低磁歪とを両立させるための技術が、特許文献1～4に開示されている。

【0007】

特許文献1には、磁歪を決める因子として、1次被膜の張力、張力絶縁被膜の張力、及びレーザー照射による微少歪みの付与が非常に重要であり、これらの因子を制御することによって、低騒音のための磁歪特性を持ち、かつ、低鉄損である方向性電磁鋼板が提供できることが開示されている。

10

特許文献1には、1次被膜とその後に付与する2次被膜による合計の鋼板への張力を1～8MPaとし、鋼板の単位面積当たりの入熱量を1～2mJ/mm<sup>2</sup>となるようにパルスレーザー照射し、あるいは、前記張力を14MPa以上とし、前記入熱量を1.5～3mJ/mm<sup>2</sup>とすることが開示されている。

【0008】

特許文献2には、フォスファイト被膜と張力コーティングとを有する方向性電磁鋼板に対して、レーザー照射による磁区細分化を行った場合に被膜がダメージを受けて、磁歪特性が劣化するのを防止するために、フォスファイト被膜および張力コーティングにより鋼板に付与する圧延方向の合計張力Aが10.0MPa以上で、圧延方向に対して直角方向の合計張力Bが5.0MPa以上であり、かつこれらの合計張力A、Bの比A/Bを、1.0～5.0とした方向性電磁鋼板が開示されている。

20

【0009】

特許文献3には、方向性電磁鋼板にレーザーを照射して磁区制御を行う際、レーザー照射部の凝固層厚みを最大4μmとして、圧延方向の狭い範囲にのみ歪みが導入されるようにすることにより、鉄損低減と同時に磁歪変形を抑制する技術が開示されている。

【0010】

特許文献4には、方向性電磁鋼板にレーザー照射を行う前に、1次被膜量と張力絶縁被膜量とを検出し、これらの検出量に応じた適切な照射条件下でレーザー照射を行うことにより、鉄損の低減と同時に、磁歪及び変圧器の騒音を低減する技術が開示されている。

【先行技術文献】

30

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】日本国特開2002-356750号公報

【特許文献2】日本国特開2012-031498号公報

【特許文献3】日本国特開2007-002334号公報

【特許文献4】日本国特開2012-031519号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

以上のように、被膜が形成された方向性電磁鋼板にレーザー照射して磁区制御を行う際に、被膜張力やレーザー照射条件を調整して低鉄損と低磁歪とを両立させる技術が提案されている。しかしながら、レーザー照射による高い鉄損低減効果を維持した状態でさらに磁歪特性を向上させる観点からは更なる改善が望まれている。

40

本発明は、上記の事情に鑑みてなされたものであり、低鉄損と低磁歪とを両立する方向性電磁鋼板を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

方向性電磁鋼板の鉄損は、渦電流損とヒステリシス損との合計を最小化することにより低減される。そして、この渦電流損とヒステリシス損とは、種々の材料パラメータに対し複雑な変化をする。また、方向性電磁鋼板の磁歪変形も種々の材料パラメータに対し複雑

50

な変化をする。

例えば、方向性電磁鋼板に付与している被膜（張力絶縁被膜及び1次被膜（ガラス被膜））によって鋼板母材には応力が加わるが、磁区制御のためのレーザ照射によっても鋼板母材に応力が加わる。

本発明者らは、これらの応力分布の影響度合いによって、上記の鉄損及び磁歪をバランスよく最小化する被膜張力及びレーザ付与応力の範囲が存在することを見出した。

そして、上記応力を方向性電磁鋼板の反り量の変化によって評価して、磁歪が最適になる範囲を見出した。

【0014】

本発明の要旨は以下の通りである。

(1) 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、鋼板母材と、前記鋼板母材の表面に形成された1次被膜と、前記1次被膜の表面に形成された張力絶縁被膜とを有する。前記方向性電磁鋼板の圧延方向と平行な方向の長さが300mmかつ板幅方向と平行な方向の長さが60mmである短冊状のサンプルを前記方向性電磁鋼板から採取し、前記サンプルの少なくとも片面を酸洗することにより、前記張力絶縁被膜の表面から、前記鋼板母材と前記1次被膜との界面よりも前記鋼板母材側に5μmの深さ位置までの範囲を除去した後に前記サンプルの反り量を測定したとき、前記反り量が下記の式A及び式Bを満たし、前記張力絶縁被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_t$ を前記1次被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_p$ で除した値 $d_t / d_p$ が0.1以上3.0以下である。

$$15000 \mu\text{m} \quad S A - S C \quad 35000 \mu\text{m} \quad \dots \quad (\text{式 A})$$

$$900 \mu\text{m} \quad S B + S C \quad 14000 \mu\text{m} \quad \dots \quad (\text{式 B})$$

ここで、SA、SB、SCは以下を示す。

SA；前記1次被膜及び前記張力絶縁被膜が形成された片面のみを酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位μmでの反り量

SB；前記1次被膜及び前記張力絶縁被膜が形成された前記片面と反対側の片面のみを酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位μmでの反り量

SC；両面を酸洗した時の前記方向性電磁鋼板の単位μmでの反り量

ただし、SAとSBの測定の際には酸洗した面と同一方向への反りを正の値とし、SCはSAと同じ方向への反りを正の値と定義する。

【0016】

(2) 上記(1)に記載の方向性電磁鋼板において、前記張力絶縁被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_t$ を前記1次被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_p$ で除した値 $d_t / d_p$ が0.1以上1.5以下であってもよい。

【0017】

(3) 上記(1)に記載の方向性電磁鋼板において、前記張力絶縁被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_t$ を前記1次被膜の単位μmでの平均膜厚 $d_p$ で除した値 $d_t / d_p$ が0.1以上1.0以下であってもよい。

【0018】

(4) 上記(1)から(3)のいずれか一態様に記載の方向性電磁鋼板において、前記張力絶縁被膜の平均膜厚が0.5μm以上4.5μm以下であってもよい。

【0019】

(5) 上記(1)から(4)のいずれか一態様に記載の方向性電磁鋼板において、前記1次被膜及び前記張力絶縁被膜によって前記鋼板母材に与えられる合計の張力が1MPa以上10MPa以下であってもよい。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、鉄損と磁歪との両方に優れた方向性電磁鋼板を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

10

20

30

40

50

【図1】方向性電磁鋼板の表面を除去した場合の方向性電磁鋼板の反り量と鉄損及び磁歪との関係を示す図である。

【図2】サンプル先端の変位量（反り量）の測定方法を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、本発明の好適な実施形態について詳細に説明する。

両方の表面に1次被膜（ガラス被膜）と張力絶縁被膜とが形成された方向性電磁鋼板において、一方の表面にレーザー照射による磁区細分化処理が施された方向性電磁鋼板は、被膜張力による応力とレーザー照射による応力とが付加されている。

磁歪が電磁鋼板に加えられる応力により大きく影響されることはよく知られている。上述の2つの応力の大きさにより、磁歪に対する影響度合いが変化する。

本発明者らは、1次被膜と張力絶縁被膜とからなる被膜張力の磁歪に対する影響度合いと、レーザー照射による応力の磁歪に対する影響度合いとについてさらに詳細に検討した。

その結果、被膜張力による応力及びレーザー照射による応力を方向性電磁鋼板の反り量で評価し、被膜張力による応力に基づく反り量の変化と、被膜張力による応力及びレーザー照射による応力に基づく反り量の変化とを調整することにより、磁歪が最適になる範囲が存在することを見出した。

【0023】

まず、そのような知見が得られた実験について説明する。

Siを3.2質量%含有し、板厚0.23mmに圧延された冷延鋼板に対して、露点を变化させて脱炭焼鈍及び一次再結晶焼鈍を施した。その後、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を鋼板表面に塗布した状態で仕上焼鈍を施して、様々な厚みの1次被膜（ガラス被膜）を有する方向性電磁鋼板素材を得た。

ついで、得られた方向性電磁鋼板素材から多数のサンプルを切り出し、コロイダルシリカとリン酸アルミニウムとを含有するコーティング処理液を塗布した。コーティング処理液の塗布量は、サンプルごとに変化させた。コーティング処理液を塗布したサンプルを800の温度で焼付けて、様々な厚みの張力絶縁被膜（2次被膜）を形成した。その後、それぞれのサンプルの片面に、異なる照射エネルギー（入熱量）の連続波レーザーを照射する磁区細分化処理を施した。

これによって、被膜の成膜条件とレーザー照射条件とが異なる多数の方向性電磁鋼板を得た。

【0024】

得られた方向性電磁鋼板から、圧延方向と平行な方向の長さが500mmであり、板幅方向と平行な方向の長さが100mmであるサンプルを切り出して、鉄損 $W_{1.7/50}$ と磁歪 $\delta_p$ とを測定した。

なお、鉄損 $W_{1.7/50}$ は、励磁磁束密度1.7Tにおける50Hzでの鉄損であり、単板磁気試験器（SST）を用いて測定した。

また、磁歪 $\delta_p$ は、例えば50Hzで励磁したときの最大励磁磁束密度における材料長さLと、磁束密度0における材料長さ $L_0$ とを用いて、下式（1）により算出した。

$$\delta_p = (L - L_0) / L_0 \cdots (1)$$

【0025】

次に、方向性電磁鋼板から、圧延方向と平行な方向の長さが300mmであり、板幅方向と平行な方向の長さが60mmである短冊状のサンプルを採取し、サンプルの片面あるいはサンプルの両面を以下のa～cの態様で酸洗した。サンプルに対して酸洗を行うことにより、張力絶縁被膜の表面から、鋼板母材と1次被膜との界面よりも鋼板母材側に5μmの深さ位置までの範囲を除去した。その後、各サンプル先端の反り量を測定した。

- a. サンプルのレーザー照射した側の片面のみを酸洗
- b. サンプルのレーザー照射した側と反対側の片面のみを酸洗
- c. サンプルの両面を酸洗

酸洗後の反り量は、図2に示すように、サンプルの長手方向の一端の30mmをクラン

10

20

30

40

50

プに挟んだ状態で垂直に載置し、反対側の一端の変位量（反り量）を測定して求めた。測定に当たっては、aの態様及びbの態様の測定の際には酸洗した面と同一方向への反りを正の値とし、cの態様の測定の際にはaの態様と同じ方向への反りを正の値とした。

【0026】

測定した結果を、被膜を有さず、かつ、レーザ照射による歪の影響を取り除いた鋼板母材に対する、被膜により与えられる張力（被膜張力）の影響、並びに被膜張力及びレーザ照射により与えられる応力（被膜張力+レーザ付与応力）の影響の観点から整理した。すなわち、

レーザ照射した側の片面のみを酸洗した時の方向性電磁鋼板の反り量（ $\mu\text{m}$ ）； $S_A$ 、

レーザ照射した側と反対側の片面のみを酸洗した時の方向性電磁鋼板の反り量（ $\mu\text{m}$ ）

； $S_B$ 、

両面を酸洗した時の方向性電磁鋼板の反り量（ $\mu\text{m}$ ）； $S_C$

とし、

$$S_C = S_A - S_C、$$

$$S_L = S_B + S_C$$

として、

各サンプルの  $S_C$  及び  $S_L$  に対する鉄損と磁歪との関係を調べた。

【0027】

結果を図1に示す。図1では、測定に用いた各サンプルについて、鉄損  $W_{17/50}$  が  $0.75 \text{ W/kg}$  以下で、負荷応力なしの場合の磁歪  $\sigma_p$  が  $0.25 \times 10^{-6}$  以下の場合を、低鉄損と低磁歪とのいずれもが満たされているとしてG (Good)、鉄損  $W_{17/50}$  が  $0.75 \text{ W/kg}$  超又は磁歪  $\sigma_p$  が  $0.25 \times 10^{-6}$  超の場合を、低鉄損又は低磁歪の一方しか満たされていないとしてF (Fair)、鉄損  $W_{17/50}$  が  $0.75 \text{ W/kg}$  超で、磁歪  $\sigma_p$  が  $0.25 \times 10^{-6}$  超の場合を、低鉄損と低磁歪とのいずれもが満たされていないとしてNG (Not Good) で表している。

図1より、 $S_C$  と  $S_L$  とのいずれもが、

$$S_C : 15000 \sim 35000 \mu\text{m}、$$

$$S_L : 900 \sim 14000 \mu\text{m}$$

の範囲にあるときに、低鉄損と低磁歪とを両立する結果が得られた。

【0028】

本実施形態は以上のような検討の結果なされたものであり、以下、本実施形態の要件や好ましい要件についてさらに説明する。

本実施形態では、製造過程の仕上焼鈍において鋼板母材の両面に形成された1次被膜（代表的にはフォスフェイト被膜）とその上に塗布・焼き付けられた張力絶縁被膜を有し、さらに、片面にレーザを照射して磁区制御がなされた方向性電磁鋼板を対象とする。

なお、日本国特開昭54-43115号公報に開示されているように、鏡面状態の表面を有する方向性電磁鋼板上に、張力絶縁被膜を形成する場合でも、本実施形態の思想を損ねるものではない。

【0029】

鋼板母材については、 $S_i$  を  $1.0 \sim 4.0$  質量%含有するけい素鋼素材を熱間圧延と冷間圧延とを経て所定の板厚の鋼板とし、その後、脱炭焼鈍、焼鈍分離剤の塗布及び仕上げ焼鈍を経て製造されたものであればよい。詳細な製造方法については後述する。

【0030】

本実施形態では、上記の方向性電磁鋼板について、1次被膜および張力絶縁被膜の成膜条件とレーザ照射条件とを調整して、方向性電磁鋼板からサンプルを採取し、このサンプルの片面あるいはサンプルの両面を上記a～cの態様で酸洗する。酸洗後の反り量を測定したときに、 $S_A - S_C$  で定義される  $S_C$  が  $15000 \sim 35000 \mu\text{m}$  の範囲となり、 $S_B + S_C$  で定義される  $S_L$  が  $900 \sim 14000 \mu\text{m}$  の範囲になるように制御することにより、鉄損と磁歪との両方を低減することができる。

【0031】

10

20

30

40

50

この条件は、上記図1で一例を示したように、被膜の成膜条件とレーザー照射条件とを変化させて、上記反り量が異なる多数の方向性電磁鋼板を作製して、上記のように反り量を  $S_c$  と  $S_L$  とで評価して、方向性電磁鋼板の鉄損と磁歪との関係を調べた結果、低鉄損と低磁歪とを両立した方向性電磁鋼板が得られる条件として求めたものである。

#### 【0032】

ここで、反り量を測定するための酸洗による方向性電磁鋼板の表面除去は、1次被膜、張力絶縁被膜、及び鋼板母材のレーザー照射による残留歪部の全てを除去することが好ましい。従って、張力絶縁被膜の表面から、鋼板母材と1次被膜との界面よりも鋼板母材側に  $5\mu\text{m}$  の深さ位置までの範囲を除去するように方向性電磁鋼板の表面の酸洗を行う。

酸洗により、上記界面よりも鋼板母材側に  $10\mu\text{m}$  の深さ位置まで除去することが好ましく、上記界面よりも鋼板母材側に  $15\mu\text{m}$  の深さ位置まで除去することがさらに好ましい。

10

ただし、酸洗により、上記界面よりも鋼板母材側に  $50\mu\text{m}$  の深さ位置まで除去すると、方向性電磁鋼板の板厚が薄くなりすぎ、反り量等の測定において十分な測定精度を確保できなくなる。そのため、方向性電磁鋼板の表面の酸洗を行う際には、酸洗により除去される鋼板母材の最深位置(上限値)を、上記界面よりも鋼板母材側に  $50\mu\text{m}$  未満とすることが好ましい。

#### 【0033】

なお、方向性電磁鋼板の酸洗は、例えば、次の方法によって行うことができる。方向性電磁鋼板を、 $\text{NaOH} : 10\text{質量}\% + \text{H}_2\text{O} : 90\text{質量}\%$  の水酸化ナトリウム水溶液に、高温で所定時間、浸漬する。次いで、 $\text{H}_2\text{SO}_4 : 10\text{質量}\% + \text{H}_2\text{O} : 90\text{質量}\%$  の硫酸水溶液に、高温で所定時間、浸漬する。その後、 $\text{HNO}_3 : 10\text{質量}\% + \text{H}_2\text{O} : 90\text{質量}\%$  の硝酸水溶液によって、常温で所定時間、浸漬して洗浄する。最後に、温風のブローで1分間弱、乾燥させる。上記の浸漬温度と浸漬時間とを調整することで、方向性電磁鋼板の表面除去量を制御すればよい。

20

#### 【0034】

また、方向性電磁鋼板の反り量は、方向性電磁鋼板から圧延方向と平行な方向に長さ  $300\text{mm}$  かつ板幅方向と平行な方向に長さ  $60\text{mm}$  である短冊状のサンプルを採取して上記の酸洗を行い、図2に示すように、サンプルの長手方向の一端の  $30\text{mm}$  をクランプに挟んだ状態で垂直に載置し、サンプルの反対側の一端の変位量(反り量)を測定して求める。

30

#### 【0035】

方向性電磁鋼板のレーザー照射された側の片面のみを酸洗することにより、1次被膜、張力絶縁被膜、及び鋼板母材のレーザー照射による残留歪部を除去する(上記aの態様)と、酸洗を行わなかった面の有する被膜張力によって、方向性電磁鋼板は湾曲する。その場合の反り量は、被膜張力に比例する。

また、方向性電磁鋼板のレーザー照射された側とは反対の片面のみ被膜を除去する(上記bの態様)と、酸洗を行わなかった面の有する被膜張力及びレーザー付与応力によって、方向性電磁鋼板は湾曲する。その場合の反り量は、被膜張力とレーザー付与応力との合計に比例する。

40

#### 【0036】

本発明者らは、上記の  $S_c$  の上限値 ( $35000\mu\text{m}$ ) は、被膜量  $4.5\text{g}/\text{m}^2$  の張力絶縁被膜を付与した場合に対応し、 $S_c$  の下限値 ( $15000\mu\text{m}$ ) は、被膜量  $1.0\text{g}/\text{m}^2$  の張力絶縁被膜を付与した場合に対応していることを確認した。

また、本発明者らは、 $S_L$  の上限値 ( $14000\mu\text{m}$ ) は、磁歪が過大とならないレーザー照射エネルギー強度:  $2.0\text{mJ}/\text{mm}^2$  に対応し、 $S_L$  の下限値 ( $900\mu\text{m}$ ) は、鉄損向上効果が得られるレーザー照射エネルギー密度:  $0.8\text{mJ}/\text{mm}^2$  に対応していることを確認した。

#### 【0037】

$S_c$  及び  $S_L$  を上記の範囲にするには、被膜の成膜条件、レーザーの種類及びレーザー

50

照射条件を調整する必要がある。一方、方向性電磁鋼板を鉄心に積層した場合に、方向性電磁鋼板間の絶縁抵抗と全体の占積率とが一定の条件を満たす必要がある。そのため、被膜の被膜量は、方向性電磁鋼板間の絶縁抵抗と全体の占積率とによって定められる。被膜の被膜量を好ましい範囲内とした上で、被膜の成膜条件及びレーザー照射条件を調整することにより、方向性電磁鋼板の反り量  $S_C$  及び  $S_L$  が上記の範囲になるように調整する。

【0038】

具体的には、1次被膜を有する方向性電磁鋼板の両表面に、被膜量が  $1.0 \text{ g/m}^2 \sim 4.5 \text{ g/m}^2$  の範囲の張力絶縁被膜をそれぞれ塗布及び焼付けしさらに、一方の表面に  $0.8 \text{ mJ/mm}^2 \sim 2.0 \text{ mJ/mm}^2$  の照射エネルギー密度でレーザーを照射するとよいことを確認している。

10

【0039】

張力絶縁被膜の被膜量が  $1.0 \text{ g/m}^2$  未満の場合には、積層して鉄心を作製したときに、方向性電磁鋼板間の絶縁抵抗が十分ではない。一方、張力絶縁被膜の被膜量が  $4.5 \text{ g/m}^2$  超の場合には、方向性電磁鋼板を積層して鉄心を作製した場合に占積率が低くなる。張力絶縁被膜の被膜量が  $1.0 \text{ g/m}^2$  未満の場合及び  $4.5 \text{ g/m}^2$  超の場合のいずれの場合も、変圧器のエネルギー損失が悪くなるため、張力絶縁被膜の被膜量を上述の範囲とする。

なお、張力絶縁被膜の製造方法については後述する。

【0040】

20

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記のように、鉄損と磁歪との両方に優れる。しかし、方向性電磁鋼板は、低鉄損であり低磁歪であることに加えて、占積率にも優れることが好ましい。

【0041】

一般的に、方向性電磁鋼板では、渦電流損失を低減させて鉄損を改善するために、鋼板母材の板厚を薄くする。鋼板母材の板厚を薄くすることによって鉄損は改善される。しかし、鋼板母材の板厚を薄くして変圧器を製造した場合には、エネルギー損失に関して大きな低減効果が必ずしも得られない。これは占積率に起因する。変圧器の鉄心は、方向性電磁鋼板を積層することにより構成されるが、被膜の膜厚を変更せずに鋼板母材の板厚を薄くした場合、鉄心全体の体積に対して鉄(鋼)の体積の占める割合(これを占積率と呼ぶ)が低下する。この占積率の低下が、エネルギー損失の低減効果に影響を与える。すなわち、占積率を高めるためには、方向性電磁鋼板の被膜の膜厚が薄いことが好ましい。

30

【0042】

しかし、方向性電磁鋼板の被膜の膜厚が薄いと、鋼板母材に付与される張力が不十分となって、鉄損および磁歪の改善効果が十分に得られなくなる。このように、鉄損および磁歪の改善と占積率の向上とはトレードオフの関係にあり両方をバランスよく両立させることは、技術的に困難であった。

【0043】

本発明者らは、鋭意検討した結果、反り量： $S_C$  及び  $S_L$  を上記範囲内に制御した上で、単位  $\mu\text{m}$  での張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  と1次被膜の平均膜厚  $d_p$  との比率  $R$  (張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  / 1次被膜の平均膜厚  $d_p$ ) を  $0.1$  以上  $3.0$  以下に制御することによって、鉄損および磁歪の改善効果を確保すると同時に、占積率をさらに高めることが可能であることを見出した。具体的には、上記の各条件を満足させれば、鉄損および磁歪の改善効果を確保すると同時に、 $97\%$  以上の占積率を得られることを見出した。すなわち、渦電流損失を低減させるために鋼板母材の板厚を薄くした場合でも、方向性電磁鋼板中の鋼板母材の体積分率を  $97\%$  以上にできることを見出した。

40

なお、方向性電磁鋼板中の鋼板母材の体積分率が  $98\%$  以上であることが好ましく、 $99\%$  以上であることがさらに好ましい。

【0044】

上記効果は、張力絶縁被膜および1次被膜の物理的性質が異なることに起因するもので

50



あると考えられる。張力絶縁被膜はリン酸塩やコロイダルシリカ等から形成され、1次被膜はフォスファイト  $Mg_2SiO_4$  等から形成される。このような材質の違いに起因して、張力絶縁被膜と1次被膜とは物理的性質に差が生じる。物理的性質が異なる張力絶縁被膜および1次被膜の膜厚の比率  $R$  には、上記の技術特性を好ましく制御する範囲が存在し、この比率  $R$  を最適に制御することによって、相反する上記の技術特性を同時に向上させることが可能になったと考えられる。

【0045】

また、方向性電磁鋼板では、低鉄損であり低磁歪であることに加えて、振動減衰率にも優れることが好ましい。方向性電磁鋼板の振動減衰率が大きい場合、トランスなどの電磁応用機器の振動をより低減することが可能となる。

10

【0046】

本発明者らは、鋭意検討した結果、上記した比率  $R$  (張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  / 1次被膜の平均膜厚  $d_p$ ) を 0.1 以上 1.5 以下に制御することによって、方向性電磁鋼板の占積率に加えて振動減衰率も合わせて向上できることを見出した。

【0047】

鋼板母材の板厚が薄い方向性電磁鋼板を積層させた鉄心では、磁歪を原因とする鉄心の振動が減衰しにくくなる。しかし、レーザ照射によって歪(応力)を付与した張力絶縁被膜および1次被膜の膜厚の比率  $R$  を適切に制御することで、振動が顕著に減衰するようになる。この詳細な理由は不明であるが、鋼板母材の板厚が薄い方向性電磁鋼板の場合、方向性電磁鋼板の伸縮による振動に加えて曲げによる振動も発生しやすくなるので、方向性電磁鋼板の表層での応力状態が振動の減衰に寄与していると考えられる。張力絶縁被膜および1次被膜は、上述のように物理的性質が異なり、形成される温度も異なり、さらにレーザ照射によって歪(応力)を付与されることで応力状態も特異な状態になっていると考えられる。詳細な説明には FEM などを用いた数値解析の適用が期待されるが、上記した比率  $R$  を 0.1 以上 3.0 以下に制御することによって、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の各条件が振動減衰率を高める状態に制御されていると考えられる。

20

【0048】

また、方向性電磁鋼板では、低鉄損であり低磁歪であることに加えて、抜熱性にも優れることが好ましい。方向性電磁鋼板の抜熱性が大きい場合、トランスの発熱(ジュール熱)を抑制して電気機器の高効率化及び小型化を達成することが可能となる。

30

【0049】

本発明者らは、鋭意検討した結果、上記した比率  $R$  (張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  / 1次被膜の平均膜厚  $d_p$ ) を 0.1 以上 1.0 以下に制御することによって、方向性電磁鋼板の抜熱性も合わせて向上できることを見出した。この効果も、張力絶縁被膜および1次被膜の物理的性質が異なることに起因して得られると考えられる。

【0050】

上記のように、反り量:  $S_c$  及び  $S_L$  を上記範囲内に制御した上で、上記の比率  $R$  を 0.1 以上 3.0 以下に制御することによって、鉄損および磁歪の改善効果を確保すると同時に、占積率を好ましく向上させることが可能となる。また、上記の比率  $R$  を 0.1 以上 1.5 以下に制御することによって、占積率に加えて振動減衰率を好ましく向上させることができる。また、上記の比率  $R$  を 0.1 以上 1.0 以下に制御することによって、占積率及び振動減衰率に加えて抜熱性を好ましく向上させることができる。

40

上記の比率  $R$  を 0.1 以上 0.8 以下に制御することにより、より好ましい占積率、振動減衰率及び抜熱性を得ることができる。上記の比率  $R$  を 0.1 以上 0.3 以下に制御することにより、さらに好ましい占積率、振動減衰率及び抜熱性を得ることができる。

【0051】

張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  と1次被膜の平均膜厚  $d_p$  との比率  $R$  が 0.1 未満である場合及び 3.0 超である場合には、好ましい占積率、振動減衰率、及び抜熱性を得ることができない。

【0052】

50

張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  と1次被膜の平均膜厚  $d_p$  との比率  $R$  を0.1以上3.0以下に制限するために、張力絶縁被膜の平均膜厚は0.5  $\mu\text{m}$ 以上4.5  $\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

張力絶縁被膜の平均膜厚は、2.0  $\mu\text{m}$ 以下、1.5  $\mu\text{m}$ 以下、1.0  $\mu\text{m}$ 以下、0.8  $\mu\text{m}$ 以下であることがより好ましい。

#### 【0053】

加えて、1次被膜と張力絶縁被膜とによって鋼板母材に与えられる合計の張力が、1 MPa以上10 MPa以下であることが好ましい。1次被膜と張力絶縁被膜とによって鋼板母材に与えられる合計の張力を1 MPa以上10 MPa以下に制限することにより、方向性電磁鋼板の磁歪と鉄損とを同時に低減することができる。

#### 【0054】

なお、張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  及び1次被膜の平均膜厚  $d_p$  の測定方法としては、断面観察による平均化法を用いることができる。断面観察による平均化法では、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) を用いて、張力絶縁被膜及び1次被膜の断面を観察し、任意の10点における膜厚を測定する。張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  及び1次被膜の平均膜厚  $d_p$  としては、測定された10点の膜厚の平均値を用いる。なお、測定時にCOMPO像 (反射電子組成像) によって観察することで、張力絶縁被膜及び1次被膜が判別しやすくなる。

張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  及び1次被膜の平均膜厚  $d_p$  の測定方法としては、断面観察による平均化法以外に、カロテスト (登録商標) 法を用いることができる。

なお、被膜中に含まれる空孔は、膜厚測定の算出から除外する。例えば、張力絶縁被膜の表面から1次被膜との界面までの厚さが3  $\mu\text{m}$ であるが、その中に1  $\mu\text{m}$ の空孔が含まれる場合には、その測定箇所での張力絶縁被膜の膜厚は2  $\mu\text{m}$ とする。

また、上記の断面観察は、次の手順にて行うことが好ましい。切断方向と板厚方向とが平行となるように方向性電磁鋼板を切断する。この切断面を張力絶縁被膜および1次被膜が剥離して脱落しないように注意して研磨する。この研磨面を必要に応じて好ましいエッチング液にてエッチングして上記の断面観察を行う。

#### 【0055】

次に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法について説明する。

Siを1.0質量%~4.0質量%含有するけい素鋼素材を、熱間圧延及び冷間圧延を経て、所定の板厚を有する鋼板を製造する。なお、けい素鋼素材は、代表的な化学成分として、質量分率で、Si:1.0%~4.0%、C:0%超~0.085%、酸可溶性Al:0%~0.065%、N:0%~0.012%、Mn:0%~1%、Cr:0%~0.3%、Cu:0%~0.4%、P:0%~0.5%、Sn:0%~0.3%、Sb:0%~0.3%、Ni:0%~1%、S:0%~0.015%、Se:0%~0.015%、などを含有し、残部がFe及び不純物からなってもよい。

#### 【0056】

冷間圧延終了後、鋼板に対して脱炭焼鈍を行う。脱炭焼鈍は、鋼中のCを除去して磁気特性を向上させるのが目的である。脱炭焼鈍により、鋼中のSiが酸化され、鋼板の表面にシリカ  $\text{SiO}_2$  が形成される。シリカは、後述するマグネシア  $\text{MgO}$  と反応することにより、1次被膜を構成するフォルステライト  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  が形成される。

脱炭焼鈍により、Cの濃度を30 ppm以下に抑制することが好ましく、より好ましくは20 ppm以下である。

脱炭焼鈍の露点 (酸化度  $\text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2$ ) が高くなると、C及びSiの酸化反応が進みやすくなる。したがって、露点が高いほど多くのシリカが形成され、露点を低くすると形成されるシリカ量が少なくなる。

つまり、脱炭焼鈍時の露点を調整することにより、1次被膜の膜厚を調整することが可能である。具体的には、脱炭焼鈍時の露点を下げることにより、1次被膜の膜厚を小さくすることが、脱炭焼鈍時の露点を上げることにより、1次被膜の膜厚を大きくすることが、可能である。

10

20

30

40

50

脱炭焼鈍時の露点は特に限定されないが、例えば、 $\text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2$ の値の範囲として、 $0.3 \sim 0.5$ が挙げられる。

#### 【0057】

脱炭焼鈍後、鋼板表面に焼鈍分離剤を塗布して、 $1100$ 以上の温度で仕上げ焼鈍を行う。仕上げ焼鈍は二次再結晶を目的としているが、この過程でフォルステライトを含む1次被膜を形成する。また、仕上げ焼鈍においてはインヒビター形成元素の系外への排出が起きる。従って、最終的に得られる方向性電磁鋼板では、N及びSについては濃度の低下が顕著で、 $50 \text{ ppm}$ 以下になる。なお、N及びSの濃度を $20 \text{ ppm}$ 以下に抑制することが好ましく、より好ましくは $10 \text{ ppm}$ 以下、更に好ましくは $9 \text{ ppm}$ 以下、特に好ましくは $6 \text{ ppm}$ 以下である。

10

焼鈍分離剤の塗布方法は、公知の方法を用いることができ、特に、焼鈍分離剤を水スラリーとしてロールコーターなどで鋼板に塗布する方法、静電塗布にて鋼板に紛体を付着させる方法などが好ましい。

焼鈍分離剤の水スラリーは、マグネシアを主成分とする固形分を含んでおり、水スラリーにおける固形分の含有量及び固形分中のマグネシアの含有量を調整することにより、1次被膜の膜厚を調整することができる。具体的には、焼鈍分離剤の水スラリーにおける固形分の含有量及び固形分中のマグネシアの含有量を少なくすることにより、1次被膜の膜厚を小さくすることが可能である。

#### 【0058】

焼鈍分離剤の固形分としては、マグネシア以外に他の添加剤も使用される。添加剤には、シリカとマグネシアとの反応に関与するもの、脱炭焼鈍後に形成された鋼板表面のシリカを焼鈍分離剤中に移動させてシリカの除去を促すもの等がある。後者の添加剤としては、Li, Na, K, Rb等のアルカリ金属塩が挙げられる。

20

焼鈍分離剤にアルカリ金属塩を添加することにより、仕上げ焼鈍の過程で、アルカリ金属塩が脱炭焼鈍で形成された鋼板表面のシリカに作用する。これにより、少なくとも一部のシリカの融点が下がり、シリカが流動性を示すようになる。流動性が高くなったシリカは、焼鈍分離剤中（マグネシア粉末中）に移動しやすくなり、焼鈍分離剤中に移動したシリカは仕上げ焼鈍後に焼鈍分離剤の除去と共に除去される。すなわち、焼鈍分離剤中へ移動したシリカは、マグネシウムケイ酸塩を含む1次被膜の形成には関与せず、その結果としてMg量が抑制できる。

30

#### 【0059】

焼鈍分離剤に $\text{TiO}_2$ を添加することにより、上述のアルカリ金属塩の効果がより顕著になる。

アルカリ金属塩の作用によって流動性を示すようになったシリカは、焼鈍分離剤中、すなわち、マグネシア粉末中に移動するが、マグネシア粒子の表面に接触すると、反応して流動性を失ってしまう。一方、 $\text{TiO}_2$ は、マグネシアに比べてシリカと反応し難いので、 $\text{TiO}_2$ が存在することにより、シリカが反応せずにその表面を移動することができ、より多くのシリカを焼鈍分離剤中に吸収させることができる。

上述の理由から、焼鈍分離剤中の $\text{TiO}_2$ の含有量を調整することにより、1次被膜の膜厚を調整することが可能である。具体的には、焼鈍分離剤中の $\text{TiO}_2$ の含有量を少なくすることにより、1次被膜の膜厚を小さくすることが可能である。

40

焼鈍分離剤中の $\text{TiO}_2$ の含有量はアルカリ金属塩の含有量とのバランスにより決められ、特に限定されないが、例えば、焼鈍分離剤中における含有量は1質量%～10質量%である。

#### 【0060】

仕上げ焼鈍後、鋼板の表面に張力絶縁被膜を形成する。張力絶縁被膜の例としては、リン酸塩とコロイダルシリカとを含む水系塗布溶液を塗布して形成される被膜が挙げられる。この場合、リン酸塩としては、例えば、Ca, Al, Mg, Sr等のリン酸塩が挙げられる。

#### 【0061】

50

張力絶縁被膜を形成する方法は特に限定されないが、上述の水系塗布溶液を、溝付き塗布ロール等を用いて鋼板表面に塗布し、空気中で焼き付けることにより、張力絶縁被膜を形成することが可能である。

ここで、溝付き塗布ロールの溝ピッチの間隔及び深さを調整することにより、張力絶縁被膜の膜厚を調整することができる。具体的には、溝付き塗布ロールの溝ピッチを狭く、かつ、深さを浅くすることにより、張力絶縁被膜の膜厚を小さくすることができる。

#### 【0062】

張力絶縁被膜を形成する際の焼付け温度及び焼付け時間を調整することによっても、張力絶縁被膜の膜厚を僅かながら調整することが可能である。具体的には、張力絶縁被膜を形成する際の焼付け温度を高温にし、焼付け時間を長時間にすることにより、傾向として、張力絶縁被膜の膜厚を薄くすることができる。

10

張力絶縁被膜を形成する際の焼付け温度及び焼付け時間は特に限定されないが、例えば、焼付け温度は700 ~ 900、焼付け時間は10秒 ~ 120秒が挙げられる。

#### 【0063】

張力絶縁被膜形成後、方向性電磁鋼板に対してレーザー照射を行う。

レーザー照射は、圧延方向に間隔を置いて、板幅方向に連続線状に照射すればよい。レーザーの種類は、CO<sub>2</sub>レーザー、YAGレーザー又はファイバーレーザー等を用いることができる。

レーザー照射による鋼板反りへの影響を抑えるには、レーザーは連続波レーザーとすることが好ましい。パルスレーザーでは、レーザーによる衝撃反力によって鋼板に応力が付与されるのに対し、連続波レーザーでは、主に熱効果によって鋼板に応力が付与されるため、応力の分布状態が異なり、パルスレーザーに比べ反りが抑制されるものと考えられる。

20

#### 【0064】

レーザー照射を行う際に、レーザー照射の出力は一定でもよいし、照射線長手方向の中心部と端部とでレーザー照射の出力を変化させてもよい。照射線長手方向の中心部と端部とでレーザー照射の出力を変化させることにより、板幅方向の鉄損特性及び磁歪特性を均一化することが可能になる。

レーザー照射の出力を一定にする場合のレーザー出力は特に限定されないが、例えば、0.8 mJ/mm<sup>2</sup> ~ 2.0 mJ/mm<sup>2</sup>が挙げられる。

照射線長手方向の中心部と端部とでレーザー照射の出力を変化させる場合において、レーザー照射の出力は特に限定されないが、例えば、照射線長手方向の中心部におけるレーザー照射の出力を1.2 mJ/mm<sup>2</sup> ~ 2.0 mJ/mm<sup>2</sup>としてレーザーを照射し、照射線長手方向の端部におけるレーザー照射の出力を0.8 mJ/mm<sup>2</sup> ~ 1.6 mJ/mm<sup>2</sup>としてレーザーを照射することが可能である。

30

ここで、照射線長手方向の端部とは、照射線の長手方向の長さを1とした場合に、1/3で表される範囲を指し、照射線長手方向の中心部とはそれ以外の範囲を指す。

#### 【0065】

本実施形態では、レーザー照射時にレーザー光をスキャン（走査）する中心位置での方向は、圧延面に対して直角の方向でもよいし、圧延面に対して直角の方向から1° ~ 10°の範囲でずらしてもよい。レーザー光をスキャンする方向を、圧延方向に対して直角の方向から1° ~ 10°の範囲でずらすことにより、より低い磁歪特性を得ることが可能になる。

40

#### 【0066】

方向性電磁鋼板の製造方法については、所望のS<sub>C</sub>、S<sub>L</sub>、1次被膜の膜厚及び張力絶縁被膜の膜厚に応じて、適宜選択することが可能である。

#### 【0067】

以下に、本発明の態様を実施例により具体的に説明する。これらの実施例は、本発明の効果を確認するための一例であり、本発明を限定するものではない。

#### 【実施例】

#### 【0068】

Siを3質量%含有するけい素鋼を用いて製造された板厚0.23 mmの冷延板を、脱

50

炭焼鈍した後、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を塗布して最終仕上げ焼鈍を施し、1次被膜を有する方向性電磁鋼板を得た。次いで、この鋼板に、コロイダルシリカ、リン酸アルミニウム及びリン酸マグネシウムからなるコーティング処理液を塗布し、焼付けて、張力絶縁被膜を形成した。この時、コーティング処理液の塗布量を変更することにより、鋼板表裏面おける張力絶縁被膜の被膜量を変化させた。その後、さらに、張力絶縁被膜を形成後の鋼板の片面に、照射エネルギーの異なる連続波レーザーを照射する磁区細分化処理を施した。レーザーは、CO<sub>2</sub>レーザーであり、圧延方向の照射線長さ：0.1mm、出力：2kW、走査速度：100～600m/sの条件で、圧延方向と直角方向に、5mmの間隔で照射した。

【0069】

得られたNo.1～7の方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{17/50}$ 及び磁歪 $\sigma_p$ を測定した。

鉄損 $W_{17/50}$ は、単板磁気試験器(SST)を用いて測定した。

磁歪 $\sigma_p$ は、最大励磁磁束密度における材料長さLと、磁束密度0における材料長さ $L_0$ とから算出した。

【0070】

また、No.1～7の方向性電磁鋼板から圧延方向と平行な方向に長さ300mmかつ板幅方向と平行な方向に長さ60mmの短冊状のサンプルをそれぞれ3枚採取した。採取したサンプルを酸洗して、レーザー照射した側の片面のみを酸洗したサンプルA、レーザー照射した側と反対側の片面のみを酸洗したサンプルB、両面を酸洗したサンプルCを作製し、それらの反り量 $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ を、図1を求めた場合と同様に測定した。

【0071】

張力絶縁被膜の平均膜厚 $d_t$ 及び1次被膜の平均膜厚 $d_p$ は、断面観察による平均化法を用いた。具体的には、走査型電子顕微鏡を用いて、張力絶縁被膜及び1次被膜の断面を観察し、任意の10点における膜厚を測定し、測定された10点の膜厚の平均値を用いた。

また、方向性電磁鋼板の占積率は、JIS C 2550：2011に準ずる方法で測定した。

【0072】

No.1～7の方向性電磁鋼板について、1次被膜の平均膜厚 $d_p$ 、張力絶縁被膜の平均膜厚 $d_t$ 、 $d_t/d_p$ 、張力絶縁被膜の被膜量、レーザー照射エネルギー、鋼板反り量 $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_C(=S_A-S_C)$ 、 $S_L(=S_B+S_C)$ 、鉄損 $W_{17/50}$ 、磁歪 $\sigma_p$ 、占積率をまとめて表1に示す。

なお、表1に示す張力絶縁被膜の被膜量は、鋼板片面当たりの被膜量を表している。

【0073】

この結果、 $S_C$ と $S_L$ の値が本発明の規定する範囲内のものは、低鉄損と低磁歪とを両立させることができることが確認された。一方、比較例のものは少なくとも鉄損と磁歪とのいずれかが劣っていた。

【0074】

10

20

30

【表 1】

No.	1次被膜の 平均膜厚 $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	張力絶縁 被膜の 平均膜厚 $d_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_t/d_p$	張力絶縁 被膜の 被膜量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	レーザー エネルギー ( $\text{mJ}/\text{mm}^2$ )	$S_A$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_B$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_C$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta S_C$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta S_L$ ( $\mu\text{m}$ )	鉄損 $W_{17/50}$ ( $\text{W}/\text{kg}$ )	磁歪 $\lambda_{0-p}$ ( $\times 10^{-6}$ )	占積率 (%)	備考
1	2.8	0.8	0.29	1.0	1.3	16000	7000	200	15800	7200	0.74	0.23	98.3	発明例
2	1.6	1.6	1.00	2.7	1.1	29000	13600	300	28700	13900	0.73	0.20	97.8	発明例
3	1.9	1.2	0.63	2.0	1.8	21000	1200	-200	21200	1000	0.72	0.24	98.2	発明例
4	3.6	2.1	0.58	3.6	1.5	30000	7300	-100	30100	7200	0.74	0.21	97.6	発明例
5	1.2	2.5	2.08	4.2	1.4	34700	8500	400	34300	8900	0.73	0.23	97.9	発明例
6	3.5	0.3	0.09	0.5	0.9	13400	3700	-200	13600	3500	0.77	0.28	96.8	比較例
7	1.0	3.2	3.20	5.0	1.6	37600	15800	500	37100	16300	0.72	0.31	96.0	比較例

【0075】

また、表1の結果と別の実験結果とから、張力絶縁被膜の平均膜厚  $d_t$  と1次被膜の平均膜厚  $d_p$  との比率  $d_t/d_p$  が0.1~3.0の場合には占積率が好ましく向上し、比率  $d_t/d_p$  が0.1~1.5の場合には占積率に加えて振動減衰率が好ましく向上し、比率  $d_t/d_p$  が0.1~1.0の場合には占積率及び振動減衰率に加えて抜熱性が好ま

10

20

30

40

50

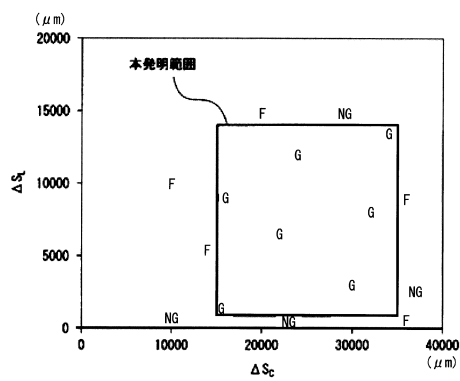
しく向上することが明らかになった。例えば、No. 3の試料（比率  $d_t / d_p$  が 0.63）ではNo. 7の試料（比率  $d_t / d_p$  が 3.20）に比べて、振動減衰率が20%、積層方向の抜熱率が15%改善した。

【産業上の利用可能性】

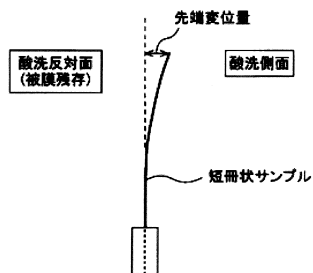
【0076】

本発明によれば、鉄損と磁歪との両方に優れた方向性電磁鋼板を提供することができる。

【図1】



【図2】



## フロントページの続き

- (72)発明者 新井 聡  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 濱村 秀行  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 村上 健一  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 藤井 浩康  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 小林 英之  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 藤井 宣憲  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 溝上 雅人  
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内

審査官 鈴木 葉子

- (56)参考文献 特開2002-356750(JP,A)  
国際公開第2012/017670(WO,A1)  
特開2005-317683(JP,A)  
特開平08-222423(JP,A)  
特開2011-246770(JP,A)  
特開2012-031519(JP,A)  
国際公開第2013/099160(WO,A1)  
特開2012-036447(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C21D 8/12, 9/46  
C22C 38/00-38/60  
H01F 1/12-1/38, 1/44