

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7492110号
(P7492110)

(45)発行日 令和6年5月29日(2024.5.29)

(24)登録日 令和6年5月21日(2024.5.21)

(51)国際特許分類		F I			
C 2 2 C	38/00	(2006.01)	C 2 2 C	38/00	3 0 3 U
C 2 2 C	38/60	(2006.01)	C 2 2 C	38/60	
H 0 1 F	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	B

請求項の数 8 (全119頁)

(21)出願番号	特願2020-18267(P2020-18267)	(73)特許権者	000006655 日本製鉄株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(22)出願日	令和2年2月5日(2020.2.5)	(74)代理人	100106909 弁理士 棚井 澄雄
(65)公開番号	特開2021-123753(P2021-123753 A)	(74)代理人	100175802 弁理士 寺本 光生
(43)公開日	令和3年8月30日(2021.8.30)	(74)代理人	100134359 弁理士 勝俣 智夫
審査請求日	令和4年10月6日(2022.10.6)	(74)代理人	100188592 弁理士 山口 洋
		(72)発明者	森本 翔太 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内
		(72)発明者	中村 修一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 方向性電磁鋼板

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

G o s s 方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板において、
前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

- S i : 2 . 0 ~ 7 . 0 %、
- B i : 0 . 0 0 0 5 ~ 0 . 0 1 0 0 %、
- N b : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、
- V : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、
- M o : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、
- T a : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、
- W : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、
- C : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、
- M n : 0 ~ 1 . 0 %、
- S : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、
- S e : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、
- A l : 0 ~ 0 . 0 6 5 0 %、
- N : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、
- C u : 0 ~ 0 . 4 0 %、
- B : 0 ~ 0 . 0 8 0 %、
- P : 0 ~ 0 . 5 0 %、

$Ti : 0 \sim 0.0150\%$ 、
 $Sn : 0 \sim 0.10\%$ 、
 $Sb : 0 \sim 0.10\%$ 、
 $Cr : 0 \sim 0.30\%$ 、
 $Ni : 0 \sim 1.0\%$ 、

を含有し、残部がFeおよび不純物からなる化学組成を有し、
 圧延面法線方向Zを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_z と定義し、
 圧延直角方向Cを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_c と定義し、
 圧延方向Lを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_l と定義し、
 板面上で隣接し且つ間隔が1mmである2つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を $(\theta_{z1}, \theta_{c1}, \theta_{l1})$ および $(\theta_{z2}, \theta_{c2}, \theta_{l2})$ と表し、
 境界条件BAを $|\theta_{z2} - \theta_{z1}| \leq 0.5^\circ$ と定義し、
 境界条件BBを $[(\theta_{z2} - \theta_{z1})^2 + (\theta_{c2} - \theta_{c1})^2 + (\theta_{l2} - \theta_{l1})^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

前記境界条件BAを満足し且つ前記境界条件BBを満足しない粒界が存在し、且つ前記境界条件BAを満足する境界数を、前記境界条件BBを満足する境界数で割った値が、1.1以上であり、

前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{AL} と定義し、
 前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{BL} と定義するとき、

前記粒径 R_{AL} と前記粒径 R_{BL} とが、 $1.10 \leq R_{BL} \div R_{AL}$ を満たし、

圧延方向の磁束密度 B_g が1.920T以上である、
 ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

【請求項2】

Goss方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板において、
 前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

$Si : 2.0 \sim 7.0\%$ 、
 $Bi : 0.0005 \sim 0.0100\%$ 、
 $Nb : 0 \sim 0.030\%$ 、
 $V : 0 \sim 0.030\%$ 、
 $Mo : 0 \sim 0.030\%$ 、
 $Ta : 0 \sim 0.030\%$ 、
 $W : 0 \sim 0.030\%$ 、
 $C : 0 \sim 0.0050\%$ 、
 $Mn : 0 \sim 1.0\%$ 、
 $S : 0 \sim 0.0150\%$ 、
 $Se : 0 \sim 0.0150\%$ 、
 $Al : 0 \sim 0.0650\%$ 、
 $N : 0 \sim 0.0050\%$ 、
 $Cu : 0 \sim 0.40\%$ 、
 $B : 0 \sim 0.080\%$ 、
 $P : 0 \sim 0.50\%$ 、
 $Ti : 0 \sim 0.0150\%$ 、
 $Sn : 0 \sim 0.10\%$ 、
 $Sb : 0 \sim 0.10\%$ 、
 $Cr : 0 \sim 0.30\%$ 、
 $Ni : 0 \sim 1.0\%$ 、

を含有し、残部がFeおよび不純物からなる化学組成を有し、
 圧延面法線方向Zを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_z と定義し、
 圧延直角方向Cを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_c と定義し、

10

20

30

40

50

圧延方向Lを回転軸とする理想G o s s方位からのずれ角を と定義し、
板面上で隣接し且つ間隔が1 mmである2つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を (α_1 、 α_2) および (β_1 、 β_2) と表し、
境界条件BAを $|\alpha_2 - \alpha_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、
境界条件BBを $[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2 - \beta_1)^2 + (\gamma_2 - \gamma_1)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、
前記境界条件BAを満足し且つ前記境界条件BBを満足しない粒界が存在し、且つ前記境界条件BAを満足する境界数を、前記境界条件BBを満足する境界数で割った値が、1.1以上であり、
前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径R_{A_C}と定義し、
前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径R_{B_C}と定義するとき、
前記粒径R_{A_C}と前記粒径R_{B_C}とが、 $1.10 \leq R_{B_C} \div R_{A_C}$ を満たし、
圧延方向の磁束密度B_gが1.920 T以上である、
ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

10

【請求項3】

G o s s方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板において、

前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

S i : 2.0 ~ 7.0 %、

B i : 0.0005 ~ 0.0100 %、

N b : 0 ~ 0.030 %、

V : 0 ~ 0.030 %、

M o : 0 ~ 0.030 %、

T a : 0 ~ 0.030 %、

W : 0 ~ 0.030 %、

C : 0 ~ 0.0050 %、

M n : 0 ~ 1.0 %、

S : 0 ~ 0.0150 %、

S e : 0 ~ 0.0150 %、

A l : 0 ~ 0.0650 %、

N : 0 ~ 0.0050 %、

C u : 0 ~ 0.40 %、

B : 0 ~ 0.080 %、

P : 0 ~ 0.50 %、

T i : 0 ~ 0.0150 %、

S n : 0 ~ 0.10 %、

S b : 0 ~ 0.10 %、

C r : 0 ~ 0.30 %、

N i : 0 ~ 1.0 %、

を含有し、残部がF eおよび不純物からなる化学組成を有し、

圧延面法線方向Zを回転軸とする理想G o s s方位からのずれ角を と定義し、

圧延直角方向Cを回転軸とする理想G o s s方位からのずれ角を と定義し、

圧延方向Lを回転軸とする理想G o s s方位からのずれ角を と定義し、

板面上で隣接し且つ間隔が1 mmである2つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を (α_1 、 α_2) および (β_1 、 β_2) と表し、

境界条件BAを $|\alpha_2 - \alpha_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、

境界条件BBを $[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2 - \beta_1)^2 + (\gamma_2 - \gamma_1)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

前記境界条件BAを満足し且つ前記境界条件BBを満足しない粒界が存在し、且つ前記

20

30

40

50

境界条件 B A を満足する境界数を、前記境界条件 B B を満足する境界数で割った値が、 1.1 以上であり、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{A_L} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{B_L} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_L} と前記粒径 R_{B_L} とが、 $1.10 \leq R_{B_L} \div R_{A_L}$ を満たし、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{A_C} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{B_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_C} と前記粒径 R_{B_C} とが、 $1.10 \leq R_{B_C} \div R_{A_C}$ を満たし、

圧延方向の磁束密度 B_8 が 1.920 T 以上である、

ことを特徴とする方向性電磁鋼板。

【請求項 4】

前記方向性電磁鋼板上に接して配された中間層と、前記中間層上に接して配された絶縁被膜とを有し、直径 20 mm の丸棒に巻き付けて曲げ戻した時の被膜残存面積率が $90 \sim 100\%$ である、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 5】

前記化学組成として、Nb、V、Mo、Ta、および W からなる群から選択される少なくとも 1 種を合計で $0.0030 \sim 0.030$ 質量% 含有する、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 4 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 6】

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{A_L} と定義し、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{A_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_L} と前記粒径 R_{A_C} とが、 $1.15 \leq R_{A_C} \div R_{A_L}$ を満たす、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 7】

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{B_L} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{B_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{B_L} と前記粒径 R_{B_C} とが、 $1.50 \leq R_{B_C} \div R_{B_L}$ を満たす、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 6 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 8】

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{A_L} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{B_L} と定義し、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{A_C} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{B_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_L} と前記粒径 R_{A_C} と前記粒径 R_{B_L} と前記粒径 R_{B_C} とが、

$(R_{B_C} \times R_{A_L}) \div (R_{B_L} \times R_{A_C}) < 1.0$ を満たす、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 7 の何れか一項に記載の方向性電磁鋼板。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、方向性電磁鋼板に関する。

【背景技術】

【0002】

方向性電磁鋼板は、Siを7質量%以下含有し、{110}<001>方位(Goss方位)に集積した二次再結晶集合組織を有する。なお、{110}<001>方位とは、結晶の{110}面が圧延面と平行に配し、且つ結晶の<001>軸が圧延方向と平行に配することを意味する。

【0003】

方向性電磁鋼板の磁気特性は、{110}<001>方位への集積度に大きく影響される。特に、鋼板の使用時に主たる磁化方向となる鋼板の圧延方向と、磁化容易方向である結晶の<001>方向との関係が重要と考えられている。そのため、近年の実用の方向性電磁鋼板では、結晶の<001>方向と圧延方向とがなす角が5°程度の範囲内に入るように、制御されている。

【0004】

方向性電磁鋼板の実際の結晶方位と理想的な{110}<001>方位とのずれは、圧延面法線方向Z周りにおけるずれ角 θ_z 、圧延直角方向C周りにおけるずれ角 θ_c 、および圧延方向L周りにおけるずれ角 θ_l の3成分により表すことができる。

【0005】

図1は、ずれ角 θ_z 、ずれ角 θ_c 、及びずれ角 θ_l を例示する模式図である。図1に示すように、ずれ角 θ_z とは、圧延面法線方向Zから見たときに圧延面に射影した結晶の<001>方向と圧延方向Lとがなす角である。ずれ角 θ_c は、圧延直角方向C(板幅方向)から見たときにL断面(圧延直角方向を法線とする断面)に射影した結晶の<001>方向と圧延方向Lとがなす角である。ずれ角 θ_l は、圧延方向Lから見たときにC断面(圧延方向を法線とする断面)に射影した結晶の<110>方向と圧延面法線方向Zとがなす角である。

【0006】

ずれ角 θ_z 、 θ_c 、 θ_l のうち、ずれ角 θ_z は、磁歪に影響を与えることが知られている。なお、磁歪とは、磁性体が磁場印加によって形状変化する現象である。変圧器のトランスなどに用いられる方向性電磁鋼板では、磁歪が振動・騒音の原因となるため、磁歪が小さいことが求められている。

【0007】

例えば、特許文献1~3には、ずれ角 θ_z を制御することが開示されている。また、ずれ角 θ_c に加えて、ずれ角 θ_l を制御することが、特許文献4および5に開示されている。さらに、ずれ角 θ_z 、ずれ角 θ_c 、およびずれ角 θ_l を指標として用い、結晶方位の集積度をさらに詳細に分類して鉄損特性を向上する技術が特許文献6に開示されている。

【0008】

また、ずれ角 θ_z 、 θ_c 、 θ_l の絶対値の大きさ及び平均値を単に制御するだけでなく、変動(偏差)を含めて制御することが、例えば特許文献7~9に開示されている。さらに、特許文献10~12には、方向性電磁鋼板にNbやVなどを添加することが開示されている。

【0009】

また、方向性電磁鋼板は、磁歪に加えて磁束密度にも優れることが求められている。これまで、二次再結晶における結晶粒の成長を制御して磁束密度の高い鋼板を得る方法などが提案されている。例えば、特許文献13および14には、仕上げ焼鈍工程にて、一次再結晶粒を蚕食しつつある二次再結晶粒の先端領域で、鋼板に温度勾配を与えながら二次再結晶を進行させる方法が開示されている。

【0010】

ただ、温度勾配を用いて二次再結晶粒を成長させた場合、粒成長は安定するものの、結晶粒が過度に大きくなりすぎることがある。結晶粒が過度に大きくなれば、コイルによる曲率の影響で磁束密度の向上効果が阻まれてしまうことがある。例えば、特許文献15に

10

20

30

40

50

は、温度勾配を与えながら二次再結晶を進行させる際に、二次再結晶の初期に発生した二次再結晶の自由な成長を抑制する処理（例えば鋼板の幅方向の端部に機械的な歪みを加える処理）が開示されている。

【 0 0 1 1 】

また、特許文献 1 6 には、方向性電磁鋼板の製造時にスラブに B i を添加することで、方向性電磁鋼板の磁束密度が向上することが開示されている。

【 0 0 1 2 】

ただ、方向性電磁鋼板の製造時にスラブに B i を添加した場合、磁束密度は向上するものの、被膜密着性が低下することが知られている。被膜密着性が低下すると、鋼板に張力を付与することが難しくなり、その結果、方向性電磁鋼板として要求される鉄損特性を満足しにくくなる。例えば、特許文献 1 7 には、スラブに B i が添加されても、脱炭焼鈍条件を緻密に制御することで被膜密着性の低下を抑制する方法が開示されている。特許文献 1 8 には、スラブに B i が添加されても、脱炭焼鈍後の酸素量を制御し且つ焼鈍分離剤に塩素化合物や S b 化合物などを添加することで被膜密着性の低下を抑制する方法が開示されている。

10

【 0 0 1 3 】

また、特許文献 1 9 には、フォルステライトを主成分とする一次被膜中に、希土類金属元素、硫化化合物などを含有させることで被膜密着性を改善する方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【 0 0 1 4 】

【文献】日本国特開 2 0 0 1 - 2 9 4 9 9 6 号公報

【文献】日本国特開 2 0 0 5 - 2 4 0 1 0 2 号公報

【文献】日本国特開 2 0 1 5 - 2 0 6 1 1 4 号公報

【文献】日本国特開 2 0 0 4 - 0 6 0 0 2 6 号公報

【文献】国際公開第 2 0 1 6 / 0 5 6 5 0 1 号

【文献】日本国特開 2 0 0 7 - 3 1 4 8 2 6 号公報

【文献】日本国特開 2 0 0 1 - 1 9 2 7 8 5 号公報

【文献】日本国特開 2 0 0 5 - 2 4 0 0 7 9 号公報

【文献】日本国特開 2 0 1 2 - 0 5 2 2 2 9 号公報

30

【文献】日本国特開昭 5 2 - 0 2 4 1 1 6 号公報

【文献】日本国特開平 0 2 - 2 0 0 7 3 2 号公報

【文献】日本国特許第 4 9 6 2 5 1 6 号公報

【文献】日本国特開昭 5 7 - 0 0 2 8 3 9 号公報

【文献】日本国特開昭 6 1 - 1 9 0 0 1 7 号公報

【文献】日本国特開平 0 2 - 2 5 8 9 2 3 号公報

【文献】日本国特開平 6 - 8 8 1 7 3 号公報

【文献】日本国特開平 6 - 1 5 8 1 6 9 号公報

【文献】日本国特開平 8 - 2 3 2 0 1 9 号公報

【文献】日本国特許第 5 4 1 9 4 5 9 号

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 5 】

本発明者らが検討した結果、特許文献 1 ~ 9 により開示された従来の技術は、結晶方位を制御しているにも関わらず、特に、磁歪の低減が十分とは言えない。

【 0 0 1 6 】

また、特許文献 1 0 ~ 1 2 により開示された従来の技術は、単に N b 及び V を含有させただけであるため、磁歪の低減は十分とは言えない。さらに、特許文献 1 3 ~ 1 5 により開示された従来の技術は、生産性の観点で問題があるばかりでなく、磁歪の低減が十分とは言えない。

50

【 0 0 1 7 】

また、特許文献 1 6 により開示された従来の技術は、単に B i などを添加しているだけであり、被膜密着性が十分とは言えない。さらに、特許文献 1 7 ~ 1 9 により開示された従来の技術は、製造過程での鋼板状況のゆらぎに起因した局所的な被膜密着性の低下が発生することが問題となっており、新たな被膜密着性の改善技術が求められている。これに加え、これら従来の技術においては、被膜密着性の確保の観点から、スラブでの B i 添加量および最終製品での B i 含有量の上限に制約があった。このため、B i による磁束密度向上効果を十分に享受できておらず、より多量の B i の活用を可能とする技術が求められている。

【 0 0 1 8 】

本発明は、上記の課題に鑑みてなされた。本発明は、磁歪の低減が方向性電磁鋼板に求められている現状を踏まえ、磁歪を改善した方向性電磁鋼板を提供することを課題とする。特に、低磁場領域（1.5 T 程度の磁場）での磁歪を改善した方向性電磁鋼板を提供することを課題とする。

【 0 0 1 9 】

さらに、本発明は、低磁場領域での磁歪を改善した上で、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる方向性電磁鋼板を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 2 0 】

本発明の要旨は、次のとおりである。

【 0 0 2 1 】

(1) 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、G o s s 方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

S i : 2 . 0 ~ 7 . 0 %、

B i : 0 . 0 0 0 5 ~ 0 . 0 1 0 0 %、

N b : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、

V : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、

M o : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、

T a : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、

W : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、

C : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、

M n : 0 ~ 1 . 0 %、

S : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、

S e : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、

A l : 0 ~ 0 . 0 6 5 0 %、

N : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、

C u : 0 ~ 0 . 4 0 %、

B : 0 ~ 0 . 0 8 0 %、

P : 0 ~ 0 . 5 0 %、

T i : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、

S n : 0 ~ 0 . 1 0 %、

S b : 0 ~ 0 . 1 0 %、

C r : 0 ~ 0 . 3 0 %、

N i : 0 ~ 1 . 0 %、

を含有し、残部が F e および不純物からなる化学組成を有し、

圧延面法線方向 Z を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ と定義し、

圧延直角方向 C を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を ϕ と定義し、

圧延方向 L を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を ψ と定義し、

板面上で隣接し且つ間隔が 1 m m である 2 つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を (

10

20

30

40

50

θ_1 および θ_2 と表し、
 境界条件 B A を $|\theta_2 - \theta_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、
 境界条件 B B を $[(\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_2 - \theta_1)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

前記境界条件 B A を満足し且つ前記境界条件 B B を満足しない粒界が存在し、且つ前記境界条件 B A を満足する境界数を、前記境界条件 B B を満足する境界数で割った値が、1.1以上であり、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{A_L} と定義し、
 前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{B_L} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_L} と前記粒径 R_{B_L} とが、 $1.10 \leq R_{B_L} \div R_{A_L}$ を満たし、

圧延方向の磁束密度 B_8 が 1.920 T 以上である。

(2) 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、G o s s 方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

$S i : 2.0 \sim 7.0 \%$ 、

$B i : 0.0005 \sim 0.0100 \%$ 、

$N b : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$V : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$M o : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$T a : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$W : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$C : 0 \sim 0.0050 \%$ 、

$M n : 0 \sim 1.0 \%$ 、

$S : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$S e : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$A l : 0 \sim 0.0650 \%$ 、

$N : 0 \sim 0.0050 \%$ 、

$C u : 0 \sim 0.40 \%$ 、

$B : 0 \sim 0.080 \%$ 、

$P : 0 \sim 0.50 \%$ 、

$T i : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$S n : 0 \sim 0.10 \%$ 、

$S b : 0 \sim 0.10 \%$ 、

$C r : 0 \sim 0.30 \%$ 、

$N i : 0 \sim 1.0 \%$ 、

を含有し、残部が F e および不純物からなる化学組成を有し、

圧延面法線方向 Z を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_z と定義し、

圧延直角方向 C を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_c と定義し、

圧延方向 L を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_l と定義し、

板面上で隣接し且つ間隔が 1 mm である 2 つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を θ_1 および θ_2 と表し、

境界条件 B A を $|\theta_2 - \theta_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、

境界条件 B B を $[(\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_2 - \theta_1)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

前記境界条件 B A を満足し且つ前記境界条件 B B を満足しない粒界が存在し、且つ前記境界条件 B A を満足する境界数を、前記境界条件 B B を満足する境界数で割った値が、1.1以上であり、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{A_C} と定義し、

10

20

30

40

50

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{B_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_C} と前記粒径 R_{B_C} とが、 $1.10 \leq R_{B_C} \div R_{A_C}$ を満たし、
圧延方向の磁束密度 B_8 が 1.920 T 以上である。

(3) 本発明の一態様に係る方向性電磁鋼板は、G o s s 方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板が、質量%で、

$S i : 2.0 \sim 7.0 \%$ 、

$B i : 0.0005 \sim 0.0100 \%$ 、

$N b : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$V : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$M o : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$T a : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$W : 0 \sim 0.030 \%$ 、

$C : 0 \sim 0.0050 \%$ 、

$M n : 0 \sim 1.0 \%$ 、

$S : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$S e : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$A l : 0 \sim 0.0650 \%$ 、

$N : 0 \sim 0.0050 \%$ 、

$C u : 0 \sim 0.40 \%$ 、

$B : 0 \sim 0.080 \%$ 、

$P : 0 \sim 0.50 \%$ 、

$T i : 0 \sim 0.0150 \%$ 、

$S n : 0 \sim 0.10 \%$ 、

$S b : 0 \sim 0.10 \%$ 、

$C r : 0 \sim 0.30 \%$ 、

$N i : 0 \sim 1.0 \%$ 、

を含有し、残部が F e および不純物からなる化学組成を有し、

圧延面法線方向 Z を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_1 と定義し、

圧延直角方向 C を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_2 と定義し、

圧延方向 L を回転軸とする理想 G o s s 方位からのずれ角を θ_3 と定義し、

板上で隣接し且つ間隔が 1 mm である 2 つの測定点で測定する結晶方位のずれ角を ($\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$) および ($\theta_2 - \theta_3 - \theta_1$) と表し、

境界条件 B A を $|\theta_2 - \theta_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、

境界条件 B B を $[(\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_3 - \theta_1)^2 + (\theta_2 - \theta_3)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

前記境界条件 B A を満足し且つ前記境界条件 B B を満足しない粒界が存在し、且つ前記境界条件 B A を満足する境界数を、前記境界条件 B B を満足する境界数で割った値が、 1.1 以上であり、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{A_L} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{B_L} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_L} と前記粒径 R_{B_L} とが、 $1.10 \leq R_{B_L} \div R_{A_L}$ を満たし、

前記境界条件 B A に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{A_C} と定義し、

前記境界条件 B B に基づいて求める前記圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{B_C} と定義するとき、

前記粒径 R_{A_C} と前記粒径 R_{B_C} とが、 $1.10 \leq R_{B_C} \div R_{A_C}$ を満たし、

10

20

30

40

50

圧延方向の磁束密度 B_8 が 1.920 T 以上である。

(4) 上記(1)～(3)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記方向性電磁鋼板上に接して配された中間層と、前記中間層上に接して配された絶縁被膜とを有し、直径 20 mm の丸棒に巻き付けて曲げ戻した時の被膜残存面積率が $90\sim 100\%$ であってもよい。

(5) 上記(1)～(4)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記化学組成として、Nb、V、Mo、Ta、およびWからなる群から選択される少なくとも1種を合計で $0.0030\sim 0.030$ 質量%含有してもよい。

(6) 上記(1)～(5)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{AL} と定義し、

前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{AC} と定義するとき、

前記粒径 R_{AL} と前記粒径 R_{AC} とが、 $1.15 R_{AC} \div R_{AL}$ を満たしてもよい。

(7) 上記(1)～(6)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{BL} と定義し、

前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{BC} と定義するとき、

前記粒径 R_{BL} と前記粒径 R_{BC} とが、 $1.50 R_{BC} \div R_{BL}$ を満たしてもよい。

(8) 上記(1)～(7)のいずれか一項に記載の方向性電磁鋼板では、前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{AL} と定義し、

前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{BL} と定義し、

前記境界条件BAに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{AC} と定義し、

前記境界条件BBに基づいて求める前記圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{BC} と定義するとき、

前記粒径 R_{AL} と前記粒径 R_{AC} と前記粒径 R_{BL} と前記粒径 R_{BC} とが、

$(R_{BC} \times R_{AL}) \div (R_{BL} \times R_{AC}) < 1.0$ を満たしてもよい。

【発明の効果】

【0022】

本発明の上記態様によれば、低磁場領域（特に 1.5 T 程度の磁場）での磁歪を改善した方向性電磁鋼板が提供される。

【0023】

特に、本発明の上記態様によれば、低磁場領域での磁歪を改善した上で、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる方向性電磁鋼板が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】ずれ角、ずれ角、およびずれ角を例示する模式図である。

【図2】方向性電磁鋼板の結晶粒界を例示する模式図である。

【図3】本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の断面模式図である。

【図4】本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法の流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

本発明の好ましい一実施形態を詳細に説明する。ただ、本発明は本実施形態に開示の構成のみに制限されることなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の変更が可能である。また、下記する数値限定範囲には、下限値及び上限値がその範囲に含まれる。「超」または「未満」と示す数値は、その値が数値範囲に含まれない。また、化学組成に関する「%」は特に断りが無い限り「質量%」を意味する。

【0026】

一般的に、磁歪を小さくするには、ずれ角が小さくなるように（具体的には、ずれ角

10

20

30

40

50

の絶対値 $| \quad |$ の最大値および平均値が小さくなるように)、結晶方位が制御される。実際に、これまで、磁化する際の磁界の強さが、一般的に磁気特性を測定する際の磁界の強さである 1.7 T 近傍の磁場領域 (以降、単に「中磁場領域」と記述することがある) では、 θ と磁歪との相関は比較的高いことが確認されている。

【0027】

一方、実用の方向性電磁鋼板での二次再結晶は、コイルに巻かれた状態で進行する。つまり、二次再結晶粒は、鋼板が曲率を有している状態で成長する。このため、二次再結晶の初期段階で θ が小さい結晶粒でも、結晶粒が成長するに伴って θ が不可避免的に大きくなる。

【0028】

もちろん、二次再結晶粒の発生段階で、 θ が小さい結晶粒のみを多数生成させておくことができれば、それら個々の結晶粒がそれほど大きく成長しなくとも、ほぼ理想的な $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位の二次再結晶粒で鋼板の全領域を埋め尽くすことも可能である。しかし、実際には、そのように方位が揃った結晶粒だけを多数生成させることはできない。

【0029】

本発明者らは、実用鉄心に使用されている素材鋼板の結晶方位と騒音との関係を調査するうち、一部の材料では、 θ と騒音との相関が弱くなる場合があることを知見した。すなわち、 θ を従来のように制御した磁歪の小さな方向性電磁鋼板を使用しても、実使用環境での騒音は十分に小さくならない状況が認められた。

【0030】

本発明者らは、この原因を次のように推定した。まず、実使用環境では磁束は鋼板内を均一には流れず、局所的に磁束が集中する箇所が発生する。それに伴い磁束密度が弱まる領域も存在し、その面積は磁束が弱まる領域の方が広い。このため、実使用環境での騒音は、一般的な 1.7 T 程度の励磁条件での磁歪だけでなく、より低い励磁領域での磁歪が強く影響を及ぼしていると考えられる。

【0031】

この推定に従い、 θ と騒音との相関性が低くなる状況を調査したところ、その挙動が 1.5 T での磁気歪み量である「磁歪の最小値と最大値との差」(以下、「 $\Delta p - p @ 1.5 T$ 」と表記する) で評価できることを知見した。そして、この挙動を最適に制御できれば、変圧器の騒音のさらなる低減が可能であると考えた。

【0032】

そこで、本発明者らは、二次再結晶粒の成長の段階で結晶方位を保ったまま成長させるのではなく、方位変化を伴いながら結晶を成長させることを検討した。その結果、二次再結晶粒の成長の途中で、従来は粒界と認識されなかったほどの局所的で小傾角な方位変化を多数発生させ、一つの二次再結晶粒を θ がわずかに異なる小さな領域に分割した状態が、低磁場領域での磁歪低減に有利となることを知見した。

【0033】

また、上記の方位変化の制御には、方位変化自体を発生し易くする要因と、方位変化が一つの結晶粒の中で継続的に発生するようにする要因との考慮が重要であることを知見した。そして、方位変化自体を発生し易くさせるためには、二次再結晶をより低温から開始させることが有効で、例えば、一次再結晶粒径を制御し、Nb 等の元素を活用できることを確認した。さらに、従来から用いられるインヒビターである AlN などを適切な温度および雰囲気中で利用することによって、方位変化を二次再結晶中の一つの結晶粒の中で高温領域まで継続的に発生させることができることを確認した。

【0034】

さらに、本発明者らは、上記した方位制御による低磁場磁歪の低減に加えて、磁束密度を向上すると同時に被膜密着性の低下を回避することを検討した。

【0035】

従来知見によれば、方向性電磁鋼板の製造時にスラブに Bi を添加すれば、Bi 化合物

10

20

30

40

50

がインヒビターとして作用し、G o s s方位の集積度が高まり、その結果、方向性電磁鋼板の磁束密度が向上することが知られていた。一方、スラブにB iを添加すれば、仕上げ焼鈍時に珪素鋼板中のB iが、珪素鋼板と仕上げ焼鈍で形成される一次被膜（中間層）との界面に偏析し、この界面の嵌入構造を緩和し、その結果、被膜密着性が低下することが知られていた。

【 0 0 3 6 】

そのため、従来、スラブにB iを添加した場合には、製造時に、脱炭焼鈍条件を緻密に制御したり、追加の化合物を新たに添加したりする必要があり、また、インヒビターとして作用したB iが方向性電磁鋼板に最終的に残存しないように、仕上げ焼鈍時の純化でB iを迅速に系外に排出させる必要があった。しかし、仕上げ焼鈍時に鋼板はコイル状に巻かれた状態で焼鈍されるため、例えばコイル内部など純化雰囲気循環が停滞しやすい箇所では、純化が抑制されてB iが方向性電磁鋼板に残存し、その箇所では局所的に被膜密着性が低下するなどの問題が生じていた。また、B iの迅速かつ入念な排出を優先し、純化焼鈍を高温または長時間で実施することは、方向性電磁鋼板でのB i残存量が低減するものの、高温、長時間の滞留により界面の嵌入構造が緩和してしまい、被膜密着性を低下させることにもなっていた。また、生産性の低下にもつながってしまう。

【 0 0 3 7 】

ただ、本発明者らは、上記した方位変化の制御を行った場合には、これまで粒界と認識されなかったほどの局所的で小傾角な方位変化が一つの二次再結晶粒内で多数発生した状態となるので（すなわち、従来とは異なる材料構造となるので）、B i含有に起因する上記した特性変化に対して、従来知見が当てはまらないと考えた。そこで、本発明者らは、上記した方位変化の制御を行った上で、化学組成としてB iを含有させて磁束密度および被膜密着性の特性変化を詳細に検討した。

【 0 0 3 8 】

その結果、上記した方位変化の制御を行った場合には、たとえスラブにB iを添加しても、従来知見とは異なって、脱炭焼鈍条件を緻密に制御する必要がなく、追加の化合物を新たに添加する必要もなく、また、インヒビターとして作用したB iが方向性電磁鋼板（珪素鋼板）に残存しても、磁束密度を向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できることを知見した。

【 0 0 3 9 】

すなわち、本発明者らは、方位変化の制御を行うことで低磁場領域での磁歪を改善し、さらにB iを有効に活用することで磁束密度を向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できることを知見した。

【 0 0 4 0 】

[第 1 実施形態]

本発明の第 1 実施形態に係る方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒が、ずれ角 がわずかに異なる複数の領域に分割されている。すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、二次再結晶粒の粒界に相当する比較的に角度差が大きい粒界に加えて、二次再結晶粒内を分割している局所的で小傾角な粒界を有する。

【 0 0 4 1 】

加えて、この第 1 実施形態に係る方向性電磁鋼板は、化学組成として、質量 % で、B i を 0 . 0 0 0 5 0 ~ 0 . 0 1 0 % 含有する。

【 0 0 4 2 】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、G o s s 方位に配向する集合組織を有する方向性電磁鋼板であって、

質量 % で、S i : 2 . 0 ~ 7 . 0 %、B i : 0 . 0 0 0 5 ~ 0 . 0 1 0 0 %、N b : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、V : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、M o : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、T a : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、W : 0 ~ 0 . 0 3 0 %、C : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、M n : 0 ~ 1 . 0 %、S : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、S e : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %、A l : 0 ~ 0 . 0 6 5 0 %、N : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、C u : 0 ~ 0 . 4 0 %、B : 0 ~ 0 . 0 8 0 %、P : 0 ~ 0 . 5 0 %、T i

10

20

30

40

50

: 0 ~ 0.0150%、Sn: 0 ~ 0.10%、Sb: 0 ~ 0.10%、Cr: 0 ~ 0.30%、Ni: 0 ~ 1.0%、を含有し、残部がFeおよび不純物からなる化学組成を有する。

また、圧延面法線方向Zを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_z と定義し、圧延直角方向(板幅方向)Cを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_c と定義し、圧延方向Lを回転軸とする理想Goss方位からのずれ角を θ_l と定義し、並びに、

板面上で隣接し且つ間隔が1mmである2つの測定点で測定する結晶方位のずれ角をそれぞれ $(\theta_{z1}, \theta_{c1}, \theta_{l1})$ および $(\theta_{z2}, \theta_{c2}, \theta_{l2})$ と表し、境界条件BAを $|\theta_{z2} - \theta_{z1}| \leq 0.5^\circ$ と定義し、境界条件BBを $[(\theta_{z2} - \theta_{z1})^2 + (\theta_{c2} - \theta_{c1})^2 + (\theta_{l2} - \theta_{l1})^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義するとき、

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記境界条件BBを満足する粒界(二次再結晶粒界に相当する粒界)に加えて、上記境界条件BAを満足し且つ上記境界条件BBを満足しない粒界(二次再結晶粒を分割する粒界)を有する。

また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、圧延方向の磁束密度B_gが1.920T以上である。

【0043】

境界条件BBを満足する粒界は、従来の方向性電磁鋼板をマクロエッチングしたときに観察される二次再結晶粒界に実質的に対応する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記の境界条件BBを満足する粒界に加えて、境界条件BAを満足し且つ上記境界条件BBを満足しない粒界を比較的高い頻度で有する。この境界条件BAを満足し且つ上記境界条件BBを満足しない粒界は、二次再結晶粒内を分割している局所的で小傾角な粒界に対応する。すなわち、本実施形態では、二次再結晶粒が、ずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域により細かく分割された状態となる。

【0044】

従来の方向性電磁鋼板は、境界条件BBを満足する二次再結晶粒界を有するかもしれない。また、従来の方向性電磁鋼板は、二次再結晶粒の粒内でずれ角 θ の変位を有しているかもしれない。ただ、従来の方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒内でずれ角 θ が連続的に変位する傾向が強いため、従来の方向性電磁鋼板に存在するずれ角 θ の変位は、上記の境界条件BAを満足しにくい。

【0045】

例えば、従来の方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒内の長範囲領域でずれ角 θ の変位を識別できるかもしれないが、二次再結晶粒内の短範囲領域ではずれ角 θ の変位が微小なために識別しにくい(境界条件BAを満足しにくい)。一方、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、ずれ角 θ が短範囲領域で局所的に変位して粒界として識別できる。具体的には、二次再結晶粒内で隣接し且つ間隔が1mmである2つの測定点の間に、 $|\theta_{z2} - \theta_{z1}|$ の値が0.5°以上となる変位が比較的高い頻度で存在する。

【0046】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、後述するように製造条件を緻密に制御することによって、境界条件BAを満足し且つ境界条件BBを満足しない粒界(二次再結晶粒を分割する粒界)を意図的に作り込む。本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒がずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域に分割された状態となり、低磁場領域での磁歪が低減される。

【0047】

加えて、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、化学組成として、Biを0.0005~0.0100質量%含有する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記したように材料構造が従来とは異なるので、Bi含有に伴う被膜密着性の低下に関する従来知見も当てはまらず、Bi含有によって磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。

【0048】

以下、本実施形態に係る方向性電磁鋼板を詳しく説明する。

【0049】

10

20

30

40

50

1. 結晶方位

まず、本実施形態における結晶方位の記載を説明する。

本実施形態では、「実際の結晶の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位」と「理想的な $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位」との2つの $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位を区別する。この理由は、本実施形態では、実用鋼板の結晶方位を表示する際の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位と、学術的な結晶方位としての $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位とを区別して扱う必要があるためである。

【0050】

一般的に再結晶した実用鋼板の結晶方位の測定では、 $\pm 2.5^\circ$ 程度の角度差は厳密に区別せずに結晶方位を規定する。従来の方角性電磁鋼板であれば、幾何学的に厳密な $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位を中心とする $\pm 2.5^\circ$ 程度の角度範囲域を、「 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位」とする。しかし、本実施形態では、 $\pm 2.5^\circ$ 以下の角度差も明確に区別する必要がある。

10

【0051】

このため、本実施形態では、実用的な意味で方向性電磁鋼板の方位を意味する場合には、従来通り、単に「 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位 (Goss 方位)」と記載する。一方、幾何学的に厳密な結晶方位としての $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位を意味する場合には、従来の公知文献などで用いられる $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位との混同を回避するため、「理想 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位 (理想 Goss 方位)」と記載する。

【0052】

したがって、本実施形態では、例えば、「本実施形態に係る方向性電磁鋼板の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位は、理想 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位から 2° ずれている」との記載が存在することがある。

20

【0053】

また、本実施形態では、方向性電磁鋼板で観測される結晶方位に関連する以下の4つの角度、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 を使用する。

【0054】

ずれ角 θ_1 : 方向性電磁鋼板で観測される結晶方位の、圧延面法線方向 Z 周りにおける理想 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位からのずれ角。

ずれ角 θ_2 : 方向性電磁鋼板で観測される結晶方位の、圧延直角方向 C 周りにおける理想 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位からのずれ角。

30

ずれ角 θ_3 : 方向性電磁鋼板で観測される結晶方位の、圧延方向 L 周りにおける理想 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位からのずれ角。

上記のずれ角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、及びずれ角 θ_4 の模式図を、図1に示す。

【0055】

角度 θ : 方向性電磁鋼板の圧延面上で隣接し且つ間隔が 1 mm である2つの測定点で測定する結晶方位の上記ずれ角を、それぞれ (θ_1 、 θ_2 、 θ_3) および (θ_4 、 θ_5 、 θ_6) と表したとき、 $\theta = [(\theta_4 - \theta_5)^2 + (\theta_5 - \theta_6)^2 + (\theta_4 - \theta_6)^2]^{1/2}$ により得られる角度。

この角度 θ を、「空間3次元的な方位差」と記述することがある。

【0056】

40

2. 方向性電磁鋼板の結晶粒界

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、ずれ角 θ を制御するために、特に、二次再結晶粒の成長中に起こる、従来では、粒界とは認識されなかった程度の局所的な結晶方位の変化を利用する。以降の説明では、一つの二次再結晶粒内をずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域に分割するように生じる上記の方位変化を「切り替え」と記述することがある。

さらに、ずれ角 θ の角度差を考慮した結晶粒界 (境界条件 BA を満足する粒界) を「粒界」、 θ 粒界を境界として区別した結晶粒を「結晶粒」と記述することがある。

【0057】

また、本実施形態に関連する特性である 1.5 T で励磁した際の磁歪 ($p - p @ 1.5\text{ T}$) に関して、以降の説明では、単に「低磁場 (での) 磁歪」と記述することがある。

50

【 0 0 5 8 】

上記の切り替えは、結晶方位の変化が1°程度(2°未満)であり、二次再結晶粒の成長が継続する過程で発生すると考えられる。詳細は、製造法との関連で後述するが、切り替えが発生し易い状況で二次再結晶粒を成長させることが重要である。例えば、一次再結晶粒径を制御することで二次再結晶を比較的低温で開始させ、インヒビターの種類と量とを制御することで二次再結晶を高温まで継続させることが重要である。

【 0 0 5 9 】

ずれ角 の制御が低磁場磁歪に影響を及ぼす理由は必ずしも明確ではないが、以下のよう
に推定される。

【 0 0 6 0 】

一般的に低磁場での磁化挙動は、180°磁区の移動により起きる。この磁区移動は、特に粒界近傍にて隣接する結晶粒との磁区の連続性に影響を受け、隣接粒との方位差が磁化挙動の障害の大小に結びつくのではないかと考えられる。前述のように、実用の方向性電磁鋼板での二次再結晶は、コイルに巻かれた状態で進行するため、粒界における隣接結晶粒間のずれ角 の差異が大きくなる状況が考えられる。本実施形態にて制御する切り替えは、一つの二次再結晶粒内で切り替え(局所的な方位変化)が高い頻度で生じることで、隣接粒との相対的な方位差を小さくし、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性を高めるように作用していると考えられる。

【 0 0 6 1 】

本実施形態では、切り替えを含めた結晶方位の変化に関して、2種類の境界条件を規定する。本実施形態では、これらの境界条件に基づく「粒界」の定義が重要である。

【 0 0 6 2 】

現在、実用的に製造されている方向性電磁鋼板の結晶方位は、圧延方向と<001>方向とのずれ角が、概ね5°以下となるよう制御されている。この制御は、本実施形態に係る方向性電磁鋼板でも同様である。このため、方向性電磁鋼板の「粒界」を定義するとき、一般的な粒界(大傾角粒界)の定義である「隣接する領域の方位差が15°以上となる境界」を適用することができない。例えば、従来の方向性電磁鋼板では、鋼板面のマクロエッチングにより粒界を顕出するが、この粒界の両側領域の結晶方位差は通常、2~3°程度である。

【 0 0 6 3 】

本実施形態では、後述するように、結晶と結晶との境界を厳密に規定する必要がある。このため、粒界の特定法として、マクロエッチングのような目視をベースとする方法は採用しない。

【 0 0 6 4 】

本実施形態では、粒界を特定するために、圧延面上に1mm間隔で少なくとも500点の測定点を含む測定線を設定して結晶方位を測定する。例えば、結晶方位は、X線回折法(ラウエ法)により測定すればよい。ラウエ法とは、鋼板にX線ビームを照射して、透過または反射した回折斑点を解析する方法である。回折斑点を解析することによって、X線ビームを照射した場所の結晶方位を同定することができる。照射位置を変えて複数箇所
で回折斑点の解析を行えば、各照射位置の結晶方位分布を測定することができる。ラウエ法は、粗大な結晶粒を有する金属組織の結晶方位を測定するのに適した手法である。

【 0 0 6 5 】

なお、結晶方位の測定点は少なくとも500点であればよいが、二次再結晶粒の大きさに応じて、測定点を適切に増やすことが好ましい。例えば、結晶方位を測定する測定点を500点としたときに測定線内に含まれる二次再結晶粒が10個未満となる場合、測定線内に二次再結晶粒が10個以上含まれるように1mm間隔の測定点を増やして上記の測定線を延長することが好ましい。

【 0 0 6 6 】

圧延面上にて1mm間隔で結晶方位を測定し、その上で、各測定点に関して、上記した
ずれ角 、 ずれ角 、 及びずれ角 を特定する。特定した各測定点でのずれ角に基づいて

10

20

30

40

50

、隣接する2つの測定点間に粒界が存在するか否かを判断する。具体的には、隣接する2つの測定点が、上記の境界条件B Aおよび/または境界条件B Bを満足するか否かを判断する。

【0067】

具体的には、隣接する2つの測定点で測定した結晶方位のずれ角をそれぞれ(θ_1 、 θ_2)および(θ_2 、 θ_1)と表したとき、境界条件B Aを $|\theta_2 - \theta_1| \leq 0.5^\circ$ と定義し、境界条件B Bを $[(\theta_2 - \theta_1)^2 + (\theta_1 - \theta_2)^2 + (\theta_1 - \theta_2)^2]^{1/2} \leq 2.0^\circ$ と定義する。隣接する2つの測定点間に、境界条件B Aおよび/または境界条件B Bを満足する粒界が存在するか否かを判断する。

【0068】

境界条件B Bを満足する粒界は、粒界を挟む2点間の空間3次元的な方位差(角度 θ)が 2.0° 以上であり、この粒界は、マクロエッチングで認識されていた従来の二次再結晶粒の粒界とほぼ同じであると言える。

【0069】

上記の境界条件B Bを満足する粒界とは別に、本実施形態に係る方向性電磁鋼板には、「切り替え」に強く関連する粒界、具体的には、境界条件B Aを満足し且つ境界条件B Bを満足しない粒界が比較的高い頻度で存在する。このように定義される粒界は、一つの二次再結晶粒内をずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域に分割する粒界に対応する。

【0070】

上記した2つの粒界は、別の測定データを使用して求めることも可能である。ただ、測定の手間及びデータが異なることによる実態とのずれを考慮すれば、同じ測定線(圧延面上にて1mm間隔で少なくとも500点の測定点)から得られた結晶方位のずれ角を用いて、上記2つの粒界を求めることが好ましい。

【0071】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、境界条件B Bを満足する粒界に加えて、境界条件B Aを満足し且つ上記境界条件B Bを満足しない粒界を比較的高い頻度で有するので、二次再結晶粒内がずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域に分割された状態となり、その結果、低磁場領域での磁歪が低減される。

【0072】

なお、本実施形態では、鋼板中に「境界条件B Aを満足し且つ境界条件B Bを満足しない粒界」が存在すればよい。ただ、実質的には、低磁場領域の磁歪を低減するために、境界条件B Aを満足し且つ上記境界条件B Bを満足しない粒界が比較的高い頻度で存在することが好ましい。

【0073】

例えば、本実施形態では、二次再結晶粒内をずれ角 θ がわずかに異なる小さな領域に分割することを特徴とするので、粒界が、従来の二次再結晶粒界よりも比較的高い頻度で存在することが好ましい。

【0074】

具体的には、圧延面上にて1mm間隔で少なくとも500点の測定点で結晶方位を測定し、各測定点でずれ角を特定し、隣接する2つの測定点で境界条件を判定したとき、「境界条件B Aを満足する粒界」が、「境界条件B Bを満足する粒界」よりも1.1倍以上の割合で存在すればよい。すなわち、上記のように境界条件を判定したとき、「境界条件B Aを満足する境界数」を「境界条件B Bを満足する境界数」で割った値が、1.1以上となればよい。本実施形態では、上記の値が1.1以上である場合、方向性電磁鋼板に「境界条件B Aを満足し且つ境界条件B Bを満足しない粒界」が存在すると判断する。

【0075】

また、上記の「境界条件B Aを満足する境界数」を「境界条件B Bを満足する境界数」で割った値は、1.3以上であることが好ましく、1.5以上であることがさらに好ましい。

【0076】

10

20

30

40

50

なお、「境界条件 B A を満足する境界数」を「境界条件 B B を満足する境界数」で割った値の上限は、特に限定されない。例えば、この値は、80 以下であればよく、40 以下であればよく、30 以下であればよい。

【0077】

3. 化学組成

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の化学組成は詳しく後述する。ただ、本実施形態に係る方向性電磁鋼板（珪素鋼板）は、Bi を 0.0005 ~ 0.0100 質量% 含有する。

【0078】

上述したように、従来の知見として、方向性電磁鋼板の製造時にスラブに Bi が添加されれば、Bi 化合物がインヒビターとして作用して磁束密度が高まることが知られていた。ただ、スラブに Bi が添加されれば、珪素鋼板と一次被膜との界面に Bi が偏析して被膜密着性が低下することも知られていた。特に、仕上げ焼鈍時に鋼板をコイル状に巻いた状態で純化焼鈍を行えば、純化雰囲気ゆらぎ等に応じて鋼板内で Bi の純化状態が変化し、方向性電磁鋼板の被膜密着性が局所的に低下することがあった。

【0079】

ただ、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記した含有量の Bi を含有するが、従来知見とは異なって、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。

【0080】

従来知見とは異なる上記の効果が得られるメカニズムの詳細は、現時点では明確ではない。ただ、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、二次再結晶粒内を分割する小傾角な粒界を意図的に作り込むので従来とは材料構造が異なり、そのため従来知見とは異なる効果が得られると考えられる。例えば、本発明者らは、二次再結晶粒内を分割する小傾角な粒界を意図的に作り込む製造条件によって、鋼中の析出物が従来の製造条件と比較して微細に分散し、この微細に分散した析出物の表面に鋼中の Bi が偏析することで、あるいは上記の製造条件で導入される二次再結晶粒内の小傾角な粒界に Bi が偏析することで、相対的に珪素鋼板と一次被膜との界面に偏析する Bi が減少し、その結果、被膜密着性の低下が抑制されることがある。

【0081】

すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、従来知見とは異なって、Bi が純化焼鈍後に鋼に残存しても、この Bi が珪素鋼板と一次被膜との界面に偏析せずに、この Bi が本実施形態に特有の析出物の表面や小傾角な粒界に主に偏析するので、Bi が被膜密着性に悪影響を与えることなく、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できると考えられる。

【0082】

また、従来技術では、純化焼鈍によって Bi を系外に排出することを前提とするため、Bi をスラブに添加する場合でも、その Bi 添加量は上限が制限されていた。そのため、従来技術では、Bi によって得られる磁束密度の向上効果も限定的であった。それに対して、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、純化焼鈍後に Bi が残存することを許容するため、Bi をスラブに添加する場合でも、その Bi 添加量を従来以上に高めることができる。そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、Bi によって得られる磁束密度の向上効果を従来以上に享受することができる。なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、上述のように、たとえ Bi が純化焼鈍後に残存しても、Bi が被膜密着性に悪影響を与えない。

【0083】

例えば、スラブに Bi を添加すると、その添加量が数 ppm であっても被膜密着性が悪化する。この悪化を回避するため、脱炭焼鈍の温度および雰囲気条件の制御、または焼鈍分離剤への特殊元素添加などの公知の対策を行った場合でも、スラブへの Bi 添加量の許容量の上限はせいぜい 20 ppm である。一方、本実施形態に特有の鋼中析出物や小傾角な粒界を活用した鋼板では、スラブに添加する Bi 許容量の上限は 100 ppm まで拡大する。さらに公知の Bi 対策を施した材料に本願効果を併用すれば、スラブへの Bi 添加

10

20

30

40

50

量が20ppmまでの領域における被膜密着性のさらなる向上も期待できる。

【0084】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、Bi含有量が上記した0.0005~0.0100%であるときに、磁束密度が好ましく向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。この効果は、Biが上記の含有量であるときに臨界的に得られる。例えば、スラブへのBi添加量が0%であれば、鋼板でのBi含有量は0%であり、そもそも磁束密度の向上効果が得られない。一方、磁束密度向上効果を狙ってスラブにBiを添加する場合、公知技術に従い、被膜密着性の低下を回避するための対策を行ったうえで適切な純化を実施して鋼板でのBi含有量を0.0005%未満に制御すれば磁束密度が高く被膜密着性を確保した鋼板を得ることが可能であり、鋼板でのBi含有量が0.0005%未満の領域には課題が存在しない。よって本実施形態は、従来技術では高い磁束密度と良好な被膜密着性の両立が実現できていない、鋼板でのBi含有量が0.0005%以上を本実施形態の対象領域とする。また、Bi含有量が0.0100%超であるときには、鋼中のBiが過多であり、このBiが微細分散した析出物の表面や小傾角な粒界に偏析するだけではなく、このBiが珪素鋼板と一次被膜との界面にも多く偏析するため、被膜密着性が低下しやすい。そのため、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、Bi含有量を0.0005~0.0100%に制御する。

10

【0085】

上記したBi含有量は、0.0005~0.0010%であることが好ましい。Bi含有量がこの範囲であるときに、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を好ましく回避できる。

20

【0086】

また、上記したBi含有量は、0.0010~0.0100%であってもよい。従来の知見として、Bi含有量がこの範囲であるとき、鋼中のBiが過多であり、被膜密着性が顕著に低下することが知られていた。しかし、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、Bi含有量が上記範囲であっても、磁束密度が好ましく向上すると同時に被膜密着性の低下を好ましく回避できる。

【0087】

本実施形態によれば、Bi含有量が上記範囲であっても、十分な被膜密着性が得られる。具体的には、Bi含有量が上記の範囲において、方向性電磁鋼板を直径20mmの丸棒に巻き付けて曲げ戻した時の被膜残存面積率が、好ましく90~100%となる。この被膜残存面積率は、被膜密着性の良し悪しを表す指標となる。被膜残存面積率の下限は、95%であることが好ましい。

30

【0088】

被膜残存面積率は、曲げ密着性試験を行って評価する。被膜付きの方向性電磁鋼板から採取した80mm×80mmの平板状の試験片を、直径20mmの丸棒に巻き付けた後、平らに伸ばし、この電磁鋼板から剥離していない被膜（絶縁被膜及び又は中間層）の面積を測定し、剥離していない面積を鋼板の面積で割った値を被膜残存面積率（%）と定義する。例えば、1mm方眼目盛付きの透明フィルムを試験片の上に載せて、被膜が剥離していない面積を測定すればよい。

40

【0089】

また、Bi含有量が上記範囲内に制御されれば、磁束密度が好ましく高まる。具体的には、Bi含有量が上記範囲内に制御されれば、圧延方向の磁束密度 B_8 が、好ましく1.920T以上となる。この磁束密度 B_8 は、1.930T以上であることがより好ましい。なお、磁束密度 B_8 の上限は、特に制限されないが、成分による飽和磁束密度まで許容される。

【0090】

方向性電磁鋼板の磁束密度は、JIS C 2556:2015に規定された単板磁気特性試験法（SST: Single Sheet Tester）に基づいて測定すればよい。磁束密度 B_8 （T）は、800A/mで励磁したときの鋼板の圧延方向の磁束密度を測

50

定すればよい。例えば、異なる箇所から採取した試験片を用いて、上記の磁束密度 B_g の測定を少なくとも3回以上行って、これらの測定結果に基づいて平均値を求めればよい。

【0091】

上記のように、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、方位変化の制御を行った上で、化学組成の制御も行うことで、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる。

【0092】

[第2実施形態]

続いて、本発明の第2実施形態に係る方向性電磁鋼板について以下に説明する。また、以下で説明する各実施形態では、上記第1実施形態との相違点を中心に説明し、その他の特徴については上記第1実施形態と同様であるとして重複する説明を省略する。

【0093】

本発明の第2実施形態に係る方向性電磁鋼板では、結晶粒の圧延方向の粒径が、二次再結晶粒の圧延方向の粒径よりも小さい。すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、圧延方向に対して粒径が制御されている結晶粒および二次再結晶粒を有する。

【0094】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件 BA に基づいて求める圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 RA_L と定義し、境界条件 BB に基づいて求める圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 RB_L と定義するとき、

粒径 RA_L と粒径 RB_L とが、 $1.10 < RB_L \div RA_L < 8.0$ を満たす。また、 $RB_L \div RA_L < 8.0$ であることが好ましい。

【0095】

この規定は、圧延方向に対する、上述の「切り替え」の状況を表す。つまり、角度 θ が 2° 以上となる境界を結晶粒界とする二次再結晶粒の中に、 $|\theta_2 - \theta_1|$ が 0.5° 以上で且つ角度 θ が 2° 未満となる境界を少なくとも一つ含む結晶粒が、圧延方向に対して相応の頻度で存在することを意味している。本実施形態では、この切り替えの状況を、圧延方向の粒径 RA_L 及び粒径 RB_L により評価し規定する。

【0096】

図2は、方向性電磁鋼板の二次再結晶粒の粒界および二次再結晶粒内で生じる切り替えの状況を示す模式図である。図2中で、仕上げ焼鈍直後（二次再結晶直後）の鋼板はコイルに巻かれて曲率を有している状態を示し、平坦化後（使用時）の鋼板はコイルから巻き戻された状態を示している。

【0097】

図2に示すように、鋼板がコイルに巻かれた状態の場合、鋼板の圧延方向（鋼板の長手方向）は、空間内で鋼板の曲率に応じて湾曲する。一方、一般的に、二次再結晶時に成長する結晶は空間内で方位を変えない。このため、一つの結晶粒内では、空間内での位置に応じて、圧延方向と結晶方向とがなす角が変化することになる。この変化は結晶粒の成長にともない大きくなる。すなわち、粒成長の最終段階で他の二次再結晶粒に到達するほど粗大化した二次再結晶粒の粒界近傍では、鋼板曲率に起因する方位変化が特に大きくなる。

【0098】

そして、このような二次再結晶粒同士が隣接すると、隣接する結晶粒間の方位差（結晶粒界の方位差）は、それぞれの結晶粒が生成した時点で有していた方位差よりも大きくなる。つまり、それぞれの結晶粒自体（再結晶核）は $Goss$ 方位に近くて且つ方位差の比較的小さい結晶粒として生成していたとしても、粒成長して隣接した時点での結晶粒界における方位差はより大きなものになってしまう。

【0099】

例えば、鋼板が直径 1000 mm 程度のコイルとして巻かれた状態で二次再結晶が進行する場合を考える。この鋼板を仕上げ焼鈍後にコイルから巻き戻して平坦化すると、鋼板が有していた曲率に起因して、圧延方向 1 mm 当たり 0.1° 程度の方位変化が生じる。方向性電磁鋼板の二次再結晶粒は粗大であり、例えば圧延方向の結晶粒径が 50 mm であ

10

20

30

40

50

れば、圧延方向に隣接する結晶粒の結晶粒界における方位差は 5° にもなる。

【0100】

一般的な二次再結晶、すなわち従来の方向性電磁鋼板における二次再結晶では、二次再結晶粒の粒成長中には切り替え（局所的な結晶方位の変化）は起きない。このため、圧延方向の粒径が 50mm 程度であれば、二次再結晶時の鋼板曲率に起因して生じる圧延方向に隣接する結晶粒の結晶粒界における方位差は 5° 程度になる。

【0101】

一方、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、二次再結晶の進行中に局所的な方位変化（切り替え）が生じる。この方位変化は、後述するように、結晶の粒界エネルギーや表面エネルギーの増加を抑制するように作用し、結晶の対称性が高い方位に近づくように生じる。本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、結晶方位は $Goss$ 方位の近傍に制御されており、上記の切り替えは、基本的には結晶の対称性が高い方位、すなわち $Goss$ 方位に近づくように生じる。すなわち、切り替えは、個々の二次再結晶粒について、鋼板曲率が原因となって生じている方位変化を解消して $Goss$ 方位に戻すように作用する。結果として、圧延方向に隣接する結晶粒の結晶粒界における方位差は、切り替えが起きない場合より小さくなる。

10

【0102】

後述するように、上記の切り替えは、二次再結晶中に二次再結晶粒内に残存する転位の再配置により生じると考えられる。この再配置に際して、転位は局所的な配置をとり、切り替えに対応する方位変化は局所的な境界、すなわち上記した粒界として識別できる。本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒内で隣接し且つ間隔が 1mm である2つの測定点の間に、 $|\theta_2 - \theta_1| \leq 0.5^\circ$ となる方位変化が識別できる。

20

【0103】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、上記した「切り替え」を制御することで、結晶粒の圧延方向の粒径を、二次再結晶粒の圧延方向の粒径よりも小さくする。具体的には、結晶粒の粒径 R_{AL} と、二次再結晶粒の粒径 R_{BL} とが、 $1.10 \leq R_{BL} \div R_{AL}$ を満たす。粒径 R_{AL} と粒径 R_{BL} とが、上記条件を満たすことによって、低磁場領域での磁歪が好ましく低減される。

【0104】

粒径 R_{BL} が小さいために、または粒径 R_{BL} は大きくても切り替えが少なく粒径 R_{AL} が大きいために、 R_{BL} / R_{AL} 値が 1.10 未満になると、切り替え頻度が十分でなくなり、低磁場磁歪が十分に改善できないことがある。 R_{BL} / R_{AL} 値は、好ましくは 1.30 以上、より好ましくは 1.50 以上、さらに好ましくは 2.0 以上、さらに好ましくは 3.0 以上、さらに好ましくは 5.0 以上である。

30

【0105】

R_{BL} / R_{AL} 値の上限については特に限定されない。切り替えの発生頻度が高く R_{BL} / R_{AL} 値が大きくなれば、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性が高くなるため、磁歪の改善にとっては好ましい。一方で、切り替えは結晶粒内での格子欠陥の残存でもあるため、あまりに発生頻度が高いと、特に鉄損への改善効果が低下する可能性が懸念される。そのため、 R_{BL} / R_{AL} 値の実用的な最大値としては 80 が挙げられる。特に鉄損についての配慮が必要であれば、 R_{BL} / R_{AL} 値の最大値として好ましくは 40 、より好ましくは 30 が挙げられる。

40

【0106】

なお、 R_{BL} / R_{AL} 値は、 1.0 未満になる場合がある。 R_{BL} は角度 θ が 2° 以上となる粒界に基づいて規定された圧延方向の平均粒径である。一方で、 R_{AL} は $|\theta_2 - \theta_1|$ が 0.5° 以上となる粒界に基づいて規定された圧延方向の平均粒径である。単純に考えると、角度差の下限が小さい粒界の方が検出される頻度が高いように思われる。つまり、 R_{BL} は常に R_{AL} よりも大きくなり、 R_{BL} / R_{AL} 値は常に 1.0 以上になるように思われる。

【0107】

50

しかしながら、 R_{BL} は角度 θ に基づく粒界によって求められる粒径であり、 R_{AL} は
 ずれ角 ϕ に基づく粒界によって求められる粒径であって、 R_{BL} および R_{AL} では粒径を
 求めるための粒界の定義が異なる。そのため、 R_{BL} / R_{AL} 値が1.0未満になる場合
 がある。

【0108】

例えば、 $|\theta_2 - \theta_1|$ が 0.5° 未満（例えば、 0° ）であっても、ずれ角 ϕ および
 /またはずれ角 ϕ が大きければ、角度 θ は十分に大きくなる。すなわち、境界条件BAを
 満たさないが、境界条件BBを満たす粒界が存在することになる。このような粒界が増え
 れば、粒径 R_{BL} の値が小さくなり、結果として、 R_{BL} / R_{AL} 値が1.0未満になりえ
 る。本実施形態では、ずれ角 ϕ による切り替えが起きる頻度が高くなるように各条件を制御
 する。切り替えの制御が十分でなく、本実施形態からのかい離が大きい場合には、ずれ
 角 ϕ の変化が起きなくなり、 R_{BL} / R_{AL} 値が1.0未満になる。なお、本実施形態で
 は 粒界の発生頻度を十分に高め、 R_{BL} / R_{AL} 値が1.10以上であることが好まし
 いことは、既に説明した通りである。

10

【0109】

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板に関して、圧延面上で隣接し且つ間隔が1mm
 である2つの測定点間の境界は、表1のケース1からケース4に分類される。上記の粒径
 R_{BL} は、表1のケース1および/またはケース2を満足する粒界に基づいて求め、粒径
 R_{AL} は、表1のケース1および/またはケース3を満足する粒界に基づいて求める。例
 えば、圧延方向に沿って少なくとも500測定点を含む測定線上で結晶方位のずれ角を測
 定し、この測定線上でケース1および/またはケース2の粒界に挟まれる線分長さの平均
 値を粒径 R_{BL} とする。同様に、上記の測定線上で、ケース1および/またはケース3の
 粒界に挟まれる線分長さの平均値を粒径 R_{AL} とする。

20

【0110】

【表1】

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
境界条件 BA	0.5° 以上	0.5° 未満	0.5° 以上	0.5° 未満
境界条件 BB	2.0° 以上	2.0° 以上	2.0° 未満	2.0° 未満
粒界種類	「従来観察され ていた通常の二 次再結晶粒界」 で且つ 「 β 粒界」	「従来観察され ていた通常の二 次再結晶粒界」	「 β 粒界」	粒界ではない (「従来観察され ていた通常の二 次再結晶粒 界」ではなく且 つ「 β 粒界」で もない)

30

【0111】

R_{BL} / R_{AL} 値の制御が低磁場磁歪に影響を及ぼす理由は必ずしも明確ではないが、
 図2で模式的に説明したように、一つの二次再結晶粒内で切り替え（局所的な方位変化）
 が生じることで、隣接粒との相対的な方位差を小さくし（結晶粒界近傍での結晶方位変化
 が緩やかになり）、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性を高めるように作用してい
 ると考えられる。

40

【0112】

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板でも、方位変化の制御を行った上で、前述のよ
 うに化学組成の制御も行うので、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上する
 と同時に被膜密着性の低下を回避できる。

【0113】

[第3実施形態]

50

続いて、本発明の第3実施形態に係る方向性電磁鋼板について以下に説明する。以下では、上記の実施形態との相違点を中心に説明し、重複する説明を省略する。

【0114】

本発明の第3実施形態に係る方向性電磁鋼板では、結晶粒の圧延直角方向の粒径が、二次再結晶粒の圧延直角方向の粒径よりも小さい。すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、圧延直角方向に対して粒径が制御されている結晶粒および二次再結晶粒を有する。

【0115】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件BAに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{AC} と定義し、境界条件BBに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{BC} と定義するとき、

粒径 R_{AC} と粒径 R_{BC} とが、 $1.10 < R_{BC} \div R_{AC}$ を満たす。また、 $R_{BC} \div R_{AC} < 80$ であることが好ましい。

【0116】

この規定は、圧延直角方向に対する、上述の「切り替え」の状況を表す。つまり、角度が 2° 以上となる境界を結晶粒界とする二次再結晶粒の中に、 $|\alpha_2 - \alpha_1|$ が 0.5° 以上で且つ角度 α が 2° 未満となる境界を少なくとも一つ含む結晶粒が、圧延直角方向に対して相応の頻度で存在することを意味している。本実施形態では、この切り替えの状況を、圧延直角方向の粒径 R_{AC} 及び粒径 R_{BC} により評価し規定する。

【0117】

粒径 R_{BC} が小さいために、または粒径 R_{BC} は大きくても切り替えが少なく粒径 R_{AC} が大きいために、 R_{BC} / R_{AC} 値が 1.10 未満になると、切り替え頻度が十分でなくなり、低磁場磁歪が十分に改善できないことがある。 R_{BC} / R_{AC} 値は、好ましくは 1.30 以上、より好ましくは 1.50 以上、さらに好ましくは 2.0 以上、さらに好ましくは 3.0 以上、さらに好ましくは 5.0 以上である。

【0118】

R_{BC} / R_{AC} 値の上限については特に限定されない。切り替えの発生頻度が高く R_{BC} / R_{AC} 値が大きくなれば、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性が高くなるため、磁歪の改善にとっては好ましい。一方で、切り替えは結晶粒内での格子欠陥の残存でもあるため、あまりに発生頻度が高いと、特に鉄損への改善効果が低下する可能性が懸念される。そのため、 R_{BC} / R_{AC} 値の実用的な最大値としては 80 が挙げられる。特に鉄損についての配慮が必要であれば、 R_{BC} / R_{AC} 値の最大値として、好ましくは 40 、より好ましくは 30 が挙げられる。

【0119】

なお、 R_{BC} は角度 α に基づく粒界によって求められる粒径であり、 R_{AC} はずれ角 β に基づく粒界によって求められる粒径である。 R_{BC} および R_{AC} では粒径を求めるための粒界の定義が異なるため、 R_{BC} / R_{AC} 値が 1.0 未満になる場合がある。

【0120】

上記の粒径 R_{BC} は、表1のケース1および/またはケース2を満足する粒界に基づいて求め、粒径 R_{AC} は、表1のケース1および/またはケース3を満足する粒界に基づいて求める。例えば、圧延直角方向に沿って少なくとも 500 測定点を含む測定線上で結晶方位のずれ角を測定し、この測定線上でケース1および/またはケース2の粒界に挟まれる線分長さの平均値を粒径 R_{BC} とする。同様に、上記の測定線上で、ケース1および/またはケース3の粒界に挟まれる線分長さの平均値を粒径 R_{AC} とする。

【0121】

R_{BC} / R_{AC} 値の制御が低磁場磁歪に影響を及ぼす理由は必ずしも明確ではないが、一つの二次再結晶粒内で切り替え（局所的な方位変化）が生じることで、隣接粒との相対的な方位差を小さくし、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性を高めるように作用していると考えられる。

【0122】

10

20

30

40

50

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板でも、方位変化の制御を行った上で、前述のように化学組成の制御も行うので、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる。

【0123】

[第4実施形態]

続いて、本発明の第4実施形態に係る方向性電磁鋼板について以下に説明する。以下では、上記の実施形態との相違点を中心に説明し、重複する説明を省略する。

【0124】

本発明の第4実施形態に係る方向性電磁鋼板では、結晶粒の圧延方向の粒径が、結晶粒の圧延直角方向の粒径よりも小さい。すなわち、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、圧延方向および圧延直角方向に対して粒径が制御されている結晶粒を有する。

10

【0125】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件BAに基づいて求める圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{AL} と定義し、境界条件BAに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{AC} と定義するとき、

粒径 R_{AL} と粒径 R_{AC} とが、 $1.15 < R_{AC} \div R_{AL}$ を満たす。また、 $R_{AC} \div R_{AL} < 1.0$ であることが好ましい。

【0126】

以後の説明で、結晶粒の形状について「(面内)異方性」又は「扁平(形状)」と記述することがある。これらの結晶粒の形状は、鋼板の表面(圧延面)から観察した際の形状について記述している。つまり、結晶粒の形状は、板厚方向の大きさ(板厚断面での観察形状)について考慮していない。ちなみに、方向性電磁鋼板では、ほぼすべての結晶粒が板厚方向に鋼板板厚と同じサイズを有している。つまり方向性電磁鋼板では、結晶粒界近傍など特異な領域を除いて鋼板板厚がひとつの結晶粒で占められることが多い。

20

【0127】

上記した R_{AC} / R_{AL} 値の規定は、圧延方向および圧延直角方向に対する、上述の「切り替え」の状況を表す。つまり、切り替えと認識される程度の局所的な結晶方位の変化が起きる頻度が、鋼板の面内方向により異なることを意味している。本実施形態では、この切り替えの状況を、鋼板面内で直交する2つの方向の粒径 R_{AC} 及び粒径 R_{AL} により評価し規定する。

30

【0128】

R_{AC} / R_{AL} 値が1超であるということは、切り替えで規定される結晶粒は平均的にみると、圧延直角方向に延伸し、圧延方向につぶれた扁平形態を有することを示している。つまり、粒界により規定される結晶粒の形態が異方性を有することを示す。

【0129】

結晶粒の形状が面内異方性を持つことにより、低磁場磁歪が向上する理由は明確ではないが、以下のように考えられる。低磁場では、 180° 磁区が移動する際、隣接する結晶粒との「連続性」が重要であることは前述の通りである。例えば、一つの二次再結晶粒を切り替えによって小領域に分割した場合、この小領域の数が同じ(小領域の面積が同じ)であれば、小領域の形状は等方性であるよりも、異方性であるほうが、切り替えによる境界(粒界)の存在比率は大きくなる。つまり、 R_{AC} / R_{AL} 値の制御によって局所的な方位変化である切り替えの存在頻度が増加することになり、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性を高めると考えられる。

40

【0130】

このような切り替え発生時の異方性は、二次再結晶前の鋼板に存在する何らかの異方性：例えば、一次再結晶粒の形状の異方性；熱延板結晶粒の形状の異方性を起因とする一次再結晶粒の結晶方位分布の異方性(コロニー的な分布)；熱延で延伸した析出物及び破砕されて圧延方向に列状となった析出物の配置；コイル幅方向や長手方向の熱履歴の変動に起因する析出物分布；結晶粒径分布の異方性；などにより生ずると考えられる。しかしながら、発生メカニズムの詳細は不明である。ただし、二次再結晶中の鋼板が温度勾配を有す

50

れば、結晶粒の成長（転位の消失および粒界の形成）に直接的な異方性を与える。すなわち、二次再結晶での温度勾配は、本実施形態で規定する上記異方性を制御する非常に有効な制御条件となる。詳細は製造法と関連して説明する。

【0131】

また、上述の二次再結晶時の温度勾配により異方性を与えるプロセスとも関連するが、本実施形態で結晶粒を延伸させる方向は、圧延直角方向であることが現状の一般的な製造法も考慮すると好ましい。この場合、圧延方向の粒径 R_{AL} が、圧延直角方向の粒径 R_{AC} よりも小さな値となる。圧延方向および圧延直角方向の関係については、製造法と関連して説明する。なお、結晶粒を延伸させる方向は、温度勾配ではなく、あくまでも、粒界の発生頻度により決定される。

10

【0132】

粒径 R_{AC} が小さいために、または粒径 R_{AC} は大きくても粒径 R_{AL} が大きいために、 R_{AC}/R_{AL} 値が1.15未満になると、切り替え頻度が十分でなくなり、低磁場磁歪が十分に改善できないことがある。 R_{AC}/R_{AL} 値は、好ましくは1.50以上、より好ましくは1.80以上、さらに好ましくは2.10以上である。

【0133】

R_{AC}/R_{AL} 値の上限については特に限定されない。切り替えの発生頻度および延伸方向が特定の方向に制限され、 R_{AC}/R_{AL} 値が大きくなれば、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性が高くなるため、磁歪の改善にとっては好ましい。一方で切り替えは結晶粒内での格子欠陥の残存でもあるため、あまりに発生頻度が高いと、特に鉄損への改善効果が低下する可能性が懸念される。そのため、 R_{AC}/R_{AL} 値の実用的な最大値としては10が挙げられる。特に鉄損についての配慮が必要であれば、 R_{AC}/R_{AL} 値の最大値として、好ましくは6、より好ましくは4が挙げられる。

20

【0134】

また、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、上記した R_{AC}/R_{AL} 値の制御に加えて、第2実施形態と同様に、粒径 R_{AL} と粒径 R_{BL} とが、 $1.10 \leq R_{BL}/R_{AL}$ を満たすことが好ましい。

【0135】

この規定は、「切り替え」が発生していることを明確にする。例えば、粒径 R_{AC} および R_{AL} は、隣接する2つの測定点間で $|\theta_2 - \theta_1|$ が 0.5° 以上となる粒界に基づく粒径であるが、「切り替え」がまったく発生しておらず、すべての粒界の角度 θ が 2.0° 以上であったとしても、上記した R_{AC}/R_{AL} 値が満足されることがある。たとえ R_{AC}/R_{AL} 値が満足されても、すべての粒界の角度 θ が 2.0° 以上であれば、一般的に認識されている二次再結晶粒が単に扁平形状になっただけであるので、本実施形態の上記効果は好ましく得られない。本実施形態では、境界条件BAを満足し且つ境界条件BBを満足しない粒界（二次再結晶粒を分割する粒界）を有することを前提とするため、すべての粒界の角度 θ が 2.0° 以上であるという状況は生じにくい。上記した R_{AC}/R_{AL} 値を満足することに加えて、 R_{BL}/R_{AL} 値を満足することが好ましい。

30

【0136】

また、本実施形態では、圧延方向に関して R_{BL}/R_{AL} 値を制御することに加えて、圧延直角方向についても、第3実施形態と同様に、粒径 R_{AC} と粒径 R_{BC} とが $1.10 \leq R_{BC}/R_{AC}$ を満たすことは何ら問題とならず、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性を高める観点ではむしろ好ましい。

40

【0137】

さらに、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、二次再結晶粒の圧延方向および圧延直角方向の粒径が制御されていることが好ましい。

【0138】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件BBに基づいて求める圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{BL} と定義し、境界条件BBに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{BC} と定義するとき、

50

粒径 R_{BL} と粒径 R_{BC} とが、 $1.50 \leq R_{BC} \div R_{BL}$ を満たすことが好ましい。また、 $R_{BC} \div R_{BL} \leq 2.0$ であることが好ましい。

【0139】

この規定は、上述の「切り替え」とは無関係であり、二次再結晶粒が圧延直角方向に延伸していることを表す。従って、この特徴それ自体は特別ではない。ただし、本実施形態では、 R_{AC} / R_{AL} 値を制御した上で、 R_{BC} / R_{BL} 値が上記の数値範囲を満たすことが好ましい。

【0140】

本実施形態では、上記の切り替えに関係して、結晶粒の R_{AC} / R_{AL} 値が制御される場合、二次再結晶粒の形態も面内異方性が大きくなる傾向がある。逆の見方をすると、本実施形態のようにずれ角の切り替えを発生させる場合、二次再結晶粒の形状が面内異方性を持つように制御することで、結晶粒の形状も面内異方性を持つ傾向がある。

10

【0141】

R_{BC} / R_{BL} 値は、好ましくは 1.80 以上、より好ましくは 2.00 以上、さらに好ましくは 2.50 以上である。 R_{BC} / R_{BL} 値の上限については特に限定されない。

【0142】

R_{BC} / R_{BL} 値を制御する実用的な方法として、例えば、仕上げ焼鈍時にコイル幅の端部からの優先的な加熱を行い、コイル幅方向（コイル軸方向）への温度勾配を付与して二次再結晶粒を成長させるプロセスが挙げられる。このとき、二次再結晶粒のコイル周方向（例えば圧延方向）の粒径を 50 mm 程度に維持したまま、二次再結晶粒のコイル幅方向（例えば圧延直角方向）の粒径をコイル幅と同じに制御することも可能である。例えば、幅 1000 mm のコイルの全幅を一つの結晶粒で占めることができる。この場合、 R_{BC} / R_{BL} 値の上限値として、 2.0 が挙げられる。

20

【0143】

なお、圧延直角方向ではなく圧延方向に温度勾配を持たせるように連続焼鈍プロセスによって二次再結晶を進行させれば、二次再結晶粒の粒径の最大値はコイル幅に制限されず、さらに大きな値とすることも可能である。この場合であっても、本実施形態によれば、切り替えによる粒界により結晶粒が適度に分割されることで、本実施形態の上記効果を得ることが可能である。

【0144】

さらに、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、ずれ角に関する切り替えの発生頻度が圧延方向および圧延直角方向に対して制御されていることが好ましい。

30

【0145】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件 BA に基づいて求める圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{AL} と定義し、境界条件 BB に基づいて求める圧延方向 L の平均結晶粒径を粒径 R_{BL} と定義し、境界条件 BA に基づいて求める圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{AC} と定義し、境界条件 BB に基づいて求める圧延直角方向 C の平均結晶粒径を粒径 R_{BC} と定義するとき、

粒径 R_{AL} と粒径 R_{AC} と粒径 R_{BL} と粒径 R_{BC} とが、 $(R_{BC} \times R_{AL}) \div (R_{BL} \times R_{AC}) < 1.0$ を満たすことが好ましい。また、下限は特に限定しないが、現状の技術を前提にすれば、 $0.2 < (R_{BC} \times R_{AL}) \div (R_{BL} \times R_{AC})$ であればよい。

40

【0146】

この規定は、上述の「切り替え」の発生頻度の面内異方性を表す。つまり、上記の $(R_{BC} \cdot R_{AL}) / (R_{BL} \cdot R_{AC})$ は、「二次再結晶粒を圧延直角方向に分割する切り替えの発生程度： R_{BC} / R_{AC} 」と、「二次再結晶粒を圧延方向に分割する切り替えの発生程度： R_{BL} / R_{AL} 」との比になっている。この値が 1 未満であるということは、一つの二次再結晶粒が、切り替え（粒界）により、圧延方向に数多く分割されていることを示している。

【0147】

また、見方を変えると、上記の $(R_{BC} \cdot R_{AL}) / (R_{BL} \cdot R_{AC})$ は、「二次再結

50

晶粒の扁平の程度： R_{Bc} / R_{Bl} 」と、「結晶粒の扁平の程度： R_{Ac} / R_{Al} 」との比になっている。この値が1未満であるということは、一つの二次再結晶粒を分割する結晶粒は、二次再結晶粒よりも扁平な形状になることを示している。

【0148】

すなわち、粒界は二次再結晶粒を圧延直角方向に分断するよりも圧延方向に分断する傾向がある。つまり、粒界は二次再結晶粒が延伸する方向に延伸する傾向がある。粒界のこの傾向は、二次再結晶粒が延伸する際に、切り替えが特定方位の結晶の占有面積を増大させるように作用していると考えられる。

【0149】

$(R_{Bc} \cdot R_{Al}) / (R_{Bl} \cdot R_{Ac})$ の値は、好ましくは0.9以下、より好ましくは0.8以下、より好ましくは0.5以下である。上記のように、 $(R_{Bc} \cdot R_{Al}) / (R_{Bl} \cdot R_{Ac})$ の下限は、特に制限されないが、工業的な実現性も考慮すると、0.2超であればよい。

10

【0150】

上記の粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} は、表1のケース1および/またはケース2を満足する粒界に基づいて求める。上記の粒径 R_{Al} および粒径 R_{Ac} は、表1のケース1および/またはケース3を満足する粒界に基づいて求める。例えば、圧延直角方向に沿って少なくとも500測定点を含む測定線上で結晶方位のずれ角を測定し、この測定線上でケース1および/またはケース3の粒界に挟まれる線分長さの平均値を粒径 R_{Ac} とする。粒径 R_{Al} 、粒径 R_{Bl} 、粒径 R_{Bc} も同様に求めればよい。

20

【0151】

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板でも、方位変化の制御を行った上で、前述のように化学組成の制御も行うので、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる。

【0152】

[各実施形態に共通する技術特徴]

続いて、上記した各実施形態に係る方向性電磁鋼板について、共通する技術特徴を以下に説明する。

【0153】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件BBに基づいて求める圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{Bl} と定義し、境界条件BBに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{Bc} と定義するとき、

30

粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} が、2.2mm以上であることが好ましい。

【0154】

切り替えは、二次再結晶粒の成長の過程で蓄積する転位により生じると考えられる。すなわち、一度切り替えが起きた後、次の切り替えが起きるまでには、二次再結晶粒が相当程度にまで成長することが必要となる。このため、粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} が1.5mm未満であると、切り替えが発生しにくく、切り替えによる低磁場磁歪の十分な改善が困難になるおそれがある。粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} は、1.5mm以上であることが好ましい。粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} は、好ましくは2.2mm以上であり、より好ましくは3.0mm以上であり、さらに好ましくは4.0mm以上である。

40

【0155】

粒径 R_{Bl} および粒径 R_{Bc} の上限は特に限定しない。一般的な方向性電磁鋼板の製造では、一次再結晶が完了した鋼板をコイルに巻き、圧延方向に曲率を有した状態で二次再結晶により $\{110\} <001>$ 方位の結晶粒を生成・成長させるので、一つの結晶粒内で圧延方向における位置によりずれ角が連続的に変化する。そのため、粒径 R_{Bl} が増大すれば、ずれ角が増加し、磁歪が増大することにもなりかねない。このため、粒径 R_{Bl} を無制限に大きくすることは避けることが好ましい。工業的な実現性も考慮すると、粒径 R_{Bl} について、好ましい上限として400mm、さらに好ましい上限として200mm、さらに好ましい上限として100mmを挙げることができる。

50

【0156】

また、一般的な方向性電磁鋼板の製造では、一次再結晶が完了した鋼板をコイルに巻いた状態で加熱し、二次再結晶により $\{110\} <001>$ 方位の結晶粒を生成・成長させるので、二次再結晶粒は温度上昇が先行するコイル端部側から温度上昇が遅延するコイル中心側に向かって成長する。このような製造法では、例えばコイル幅を1000mmとすれば、コイル幅の半分程度となる500mmを粒径 R_{Bc} の上限として挙げることができる。もちろん各実施形態では、コイルの全幅が粒径 R_{Bc} となることを除外しない。

【0157】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、境界条件BAに基づいて求める圧延方向Lの平均結晶粒径を粒径 R_{Al} と定義し、境界条件BAに基づいて求める圧延直角方向Cの平均結晶粒径を粒径 R_{Ac} と定義するとき、

10

粒径 R_{Al} が30mm以下であり、粒径 R_{Ac} が400mm以下であることが好ましい。

【0158】

粒径 R_{Al} の値が小さいほど、圧延方向で切り替えの発生頻度が高いことを意味する。粒径 R_{Al} は、40mm以下であればよいが、30mm以下であることがより好ましく、20mm以下であることがより好ましい。

【0159】

また、十分な切り替えが起きない状況で粒径 R_{Ac} が増大すれば、ずれ角が増加し、磁歪が増大することにもなりかねない。このため、粒径 R_{Ac} を無制限に大きくすることは避けることが好ましい。工業的な実現性も考慮すると、粒径 R_{Ac} について、好ましい上限として400mm、さらに好ましい上限として200mm、さらに好ましい上限として100mm、さらに好ましい上限として40mm、さらに好ましい上限として30mmを挙げることができる。

20

【0160】

粒径 R_{Al} および粒径 R_{Ac} の下限は特に限定しない。各実施形態では、結晶方位の測定間隔を1mmとしていることから、粒径 R_{Al} および粒径 R_{Ac} の最低値は1mmとなる。しかし、各実施形態では、例えば測定間隔を1mm未満とすることにより、粒径 R_{Al} および粒径 R_{Ac} が1mm未満となるような鋼板を除外しない。ただし、切り替えは、僅かとはいえ結晶中の格子欠陥の存在を伴うので、切り替えの頻度があまりに高い場合には、磁気特性への悪影響も懸念される。また、工業的な実現性も考慮すると、粒径 R_{Al} および粒径 R_{Ac} について、好ましい下限として5mmを挙げることができる。

30

【0161】

なお、各実施形態に係る方向性電磁鋼板における結晶粒径の測定では、結晶粒一つについて、粒径が最大で2mmの不明確さを含む。そのため、粒径測定（圧延面上にて1mm間隔で少なくとも500点の方位測定）は、粒径を規定する方向と鋼板面内で直交する方向に十分離れた位置、つまり異なる結晶粒の測定となるような位置について、計5箇所以上で実施することが好ましい。その上で、計5箇所以上の測定によって得られる全ての粒径を平均することにより、上記の不明確さを解消できる。例えば、粒径 R_{Ac} および粒径 R_{Bc} については圧延方向に十分離れた5箇所以上で、粒径 R_{Al} および粒径 R_{Bl} については圧延直角方向に十分離れた5箇所以上で測定を実施し、計2500点以上の測定点で方位測定を行って平均粒径を求めればよい。

40

【0162】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、ずれ角の絶対値の標準偏差（ $|$ ）が、 0° 以上 1.70° 以下であることが好ましい。

【0163】

切り替えがあまり起きない場合、低磁場磁歪は十分に低減しない。このことは、低磁場磁歪の低減が、ずれ角が特定方向に揃うことを示していると考えられる。すなわち、低磁場磁歪の低減は、二次再結晶の核生成を含めた発生初期または成長段階での蚕食による方位選択に起因していないと考えられる。つまり、上記実施形態の効果を得るために、従来の方角制御のように結晶方位を特定の方向に近づける、例えば、ずれ角の絶対値及び標準

50

偏差を小さくすることは、特に必要な条件ではない。ただ、上述のような切り替えが十分に起きている鋼板では、「ずれ角」についても特徴的な範囲に制御されやすい。例えば、ずれ角 に関する切り替えにより少しずつ結晶方位が変化する場合、ずれ角の絶対値がゼロに近づくことは上記実施形態の支障とはならない。また、例えば、ずれ角 に関する切り替えにより少しずつ結晶方位が変化する場合、結晶方位自体が特定の方位に収束することで、結果として、ずれ角の標準偏差がゼロに近づくことは、上記実施形態の支障とはならない。

【0164】

そのため、各実施形態では、ずれ角 の絶対値の標準偏差 (| |) が、 0° 以上 1.70° 以下であってもよい。

10

【0165】

ずれ角 の絶対値の標準偏差 (| |) は、以下のように求める。

方向性電磁鋼板は、数 cm 程度の大きさに成長した結晶粒が形成される二次再結晶により $\{110\} <001>$ 方位への集積度を高めている。各実施形態では、このような方向性電磁鋼板にて結晶方位の変動を認識する必要がある。このため、少なくとも二次再結晶粒を 20 個含む領域について、500 点以上の結晶方位を測定する。

【0166】

なお、各実施形態では、「一つの二次再結晶粒を単結晶と捉え、二次再結晶粒内は厳密に同じ結晶方位を有する」と考えるべきではない。つまり、各実施形態では、一つの粗大な二次再結晶粒内に従来は粒界として認識しない程度の局所的な方位変化が存在し、この方位変化を検出することが必要になる。

20

【0167】

このため、例えば、結晶方位の測定点を、結晶粒の境界（結晶粒界）とは無関係に設定した一定面積内に等間隔で分布させることが好ましい。具体的には、鋼板面にて、少なくとも 20 個以上の結晶粒を含むように、 $L \text{ mm} \times M \text{ mm}$ （ただし $L, M > 100$ ）の面積内に、縦横 5 mm 間隔で等間隔に測定点を分布させ、各測定点での結晶方位を測定し、計 500 点以上のデータを得ることが好ましい。測定点が結晶粒界及び何らかの特異点である場合には、そのデータは用いない。また、対象となる鋼板の磁気特性を決定するために必要な領域（例えば、実機のコイルであれば、ミルシートに記載する磁気特性を測定する範囲）に応じて、上記の測定範囲を広げる必要がある。

30

【0168】

そして、各測定点について、ずれ角 を決定し、さらにずれ角 の絶対値の標準偏差 (| |) を計算する。各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、(| |) が、上記した数値範囲内であることが好ましい。

【0169】

なお、(| |) は、一般的に、1.7 T 程度の中磁場での磁気特性または磁歪を改善するために小さくすべきと考えられている因子である。ただ、(| |) だけの制御では到達する特性に限界があった。上記した各実施形態では、上記の技術特徴に加えて、(| |) を合わせて制御することで、方向性電磁鋼板全体での結晶方位の連続性に好ましく影響を及ぼす。

40

【0170】

ずれ角 の絶対値の標準偏差 (| |) は、より好ましくは 1.50 以下であり、さらに好ましくは 1.30 以下であり、さらに好ましくは 1.10 以下である。(| |) は、もちろん 0 であっても構わない。

【0171】

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、鋼板上に中間層や絶縁被膜などを有してもよいが、上記の結晶方位、粒界、平均結晶粒径などは、被膜等を有さない鋼板に基づいて特定してもよい。すなわち、測定試料となる方向性電磁鋼板が、表面に絶縁被膜等を有している場合は、被膜等を除去してから結晶方位などを測定してもよい。

【0172】

50

例えば、絶縁被膜の除去方法として、被膜を有する方向性電磁鋼板を、高温のアルカリ溶液に浸漬すればよい。具体的には、 $\text{NaOH} : 30 \sim 50$ 質量% + $\text{H}_2\text{O} : 50 \sim 70$ 質量%の水酸化ナトリウム水溶液に、 $80 \sim 90$ で $5 \sim 10$ 分間、浸漬した後に、水洗して乾燥することで、方向性電磁鋼板から絶縁被膜を除去できる。なお、絶縁被膜の厚さに応じて、上記の水酸化ナトリウム水溶液に浸漬する時間を変えればよい。

【0173】

また、例えば、中間層の除去方法として、絶縁被膜を除去した電磁鋼板を、高温の塩酸に浸漬すればよい。具体的には、溶解したい中間層を除去するために好ましい塩酸の濃度を予め調べ、この濃度の塩酸に、例えば $30 \sim 40$ 質量%塩酸に、 $80 \sim 90$ で $1 \sim 5$ 分間、浸漬した後に、水洗して乾燥させることで、中間層が除去できる。通常は、絶縁被膜の除去にはアルカリ溶液を用い、中間層の除去には塩酸を用いるように、処理液を使い分けて各被膜を除去する。

10

【0174】

次いで、各実施形態に係る方向性電磁鋼板の化学組成を説明する。各実施形態の方向性電磁鋼板は、化学組成として、基本元素を含み、必要に応じて選択元素を含み、残部がFe及び不純物からなる。

【0175】

各実施形態に係る方向性電磁鋼板は、基本元素（主要な合金元素）として、質量分率で、Si（シリコン）： $2.0 \sim 7.0$ %、およびBi（ビスマス）： $0.0005 \sim 0.0100$ %を含有する。

20

【0176】

Siは、結晶方位を $\{110\} <001>$ 方位に集積させるために、含有量が $2.0 \sim 7.0$ %であることが好ましい。

【0177】

Biは、化学組成として珪素鋼板に含有されれば、磁束密度を好ましく向上する元素である。また一般的には被膜密着性を低下させるが、上記のように二次再結晶粒内が小傾角な粒界で分割された上でBiが含有されれば、被膜密着性の低下は問題とならない。このため、Biを $0.0005 \sim 0.0100$ %と従来よりも高い範囲で含有させることで、従来知見とは異なって、被膜密着性を確保したまま顕著な磁束密度向上効果を得ることが可能となる。このBi含有量は、 $0.0005 \sim 0.0010$ %であることが好ましい。また、Bi含有量は、 $0.0010 \sim 0.0100$ %であってもよい。

30

【0178】

各実施形態では、化学組成として、不純物を含有してもよい。なお、「不純物」とは、鋼を工業的に製造する際に、原料としての鉱石やスクラップから、または製造環境等から混入する元素を指す。不純物の合計含有量の上限は、例えば、5%であればよい。

【0179】

また、各実施形態では、上記した基本元素および不純物に加えて、選択元素を含有してもよい。例えば、上記した残部であるFeの一部に代えて、選択元素として、Nb、V、Mo、Ta、W、C、Mn、S、Se、Al、N、Cu、B、P、Ti、Sn、Sb、Cr、Niなどを含有してもよい。これらの選択元素は、その目的に応じて含有させればよい。よって、これらの選択元素の下限値を限定する必要がなく、下限値が0%でもよい。また、これらの選択元素が不純物として含有されても、上記効果は損なわれない。

40

【0180】

Nb（ニオブ）： $0 \sim 0.030$ %

V（バナジウム）： $0 \sim 0.030$ %

Mo（モリブデン）： $0 \sim 0.030$ %

Ta（タンタル）： $0 \sim 0.030$ %

W（タングステン）： $0 \sim 0.030$ %

Nb、V、Mo、Ta、及びWは、各実施形態で特徴的な効果を有する元素として活用することができる。以降の説明では、Nb、V、Mo、Ta、及びWのうちの一つまたは

50

二種以上の元素をまとめて、「Nb群元素」と記述することがある。

【0181】

Nb群元素は、各実施形態に係る方向性電磁鋼板の特徴である切り替えの形成に好ましく作用する。ただし、Nb群元素が切り替え発生に作用するのは製造過程であるので、Nb群元素が各実施形態に係る方向性電磁鋼板に最終的に含有される必要はない。例えば、Nb群元素は、後述する仕上げ焼鈍における純化により系外に排出される傾向が少なからず存在している。そのため、スラブにNb群元素を含有させ、製造過程でNb群元素を活用して切り替えの頻度を高めた場合でも、その後の純化焼鈍によりNb群元素が系外に排出されることがある。そのため、最終製品の化学組成として、Nb群元素が検出できない場合がある。

10

【0182】

そのため、各実施形態では、最終製品である方向性電磁鋼板の化学組成として、Nb群元素の含有量の上限についてのみ規定する。Nb群元素の上限は、それぞれ0.030%であればよい。一方、上述の通り、製造過程でNb群元素を活用したとしても、最終製品ではNb群元素の含有量がゼロになることがある。そのため、Nb群元素の含有量の下限は特に限定されず、下限がそれぞれ0%であってもよい。

【0183】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、化学組成として、Nb、V、Mo、Ta、およびWからなる群から選択される少なくとも1種を合計で0.0030~0.030質量%含有することが好ましい。

20

【0184】

Nb群元素の含有量が製造途中で増加することは考えにくいので、最終製品の化学組成としてNb群元素が検出されれば、製造過程でNb群元素による切り替え制御が行われたことが示唆される。製造過程で切り替えを好ましく制御するには、最終製品のNb群元素の合計含有量が、0.0030%以上であることが好ましく、0.0050%以上であることがさらに好ましい。一方、最終製品のNb群元素の合計含有量が0.030%を超えると、切り替えの発生頻度を維持できるが磁気特性が低下することがある。そのため、最終製品のNb群元素の合計含有量が、0.030%以下であることが好ましい。なお、Nb群元素の作用は製造法と関連して後述する。

【0185】

C (炭素) : 0 ~ 0.0050 %
 Mn (マンガン) : 0 ~ 1.0 %
 S (硫黄) : 0 ~ 0.0150 %
 Se (セレン) : 0 ~ 0.0150 %
 Al (酸可溶性アルミニウム) : 0 ~ 0.0650 %
 N (窒素) : 0 ~ 0.0050 %
 Cu (銅) : 0 ~ 0.40 %
 B (ボロン) : 0 ~ 0.080 %
 P (燐) : 0 ~ 0.50 %
 Ti (チタン) : 0 ~ 0.0150 %
 Sn (スズ) : 0 ~ 0.10 %
 Sb (アンチモン) : 0 ~ 0.10 %
 Cr (クロム) : 0 ~ 0.30 %
 Ni (ニッケル) : 0 ~ 1.0 %

30

これらの選択元素は、公知の目的に応じて含有させればよい。これらの選択元素の含有量の下限値を設ける必要はなく、下限値が0%でもよい。なお、S及びSeの含有量が合計で0~0.0150%であることが好ましい。S及びSeの合計とは、S及びSeの少なくとも一方を含み、その合計含有量であることを意味する。

40

【0186】

なお、方向性電磁鋼板では、脱炭焼鈍および二次再結晶時の純化焼鈍を経ることで、比

50

較的大きな化学組成の変化（含有量の低下）が起きる。元素によっては純化焼鈍によって、一般的な分析手法では検出できない程度（1 ppm以下）にまで含有量が低減することもある。各実施形態に係る方向性電磁鋼板の上記化学組成は、最終製品における化学組成である。一般に、最終製品の化学組成と、出発素材であるスラブの化学組成とは異なる。

【0187】

各実施形態に係る方向性電磁鋼板の化学組成は、鋼の一般的な分析方法によって測定すればよい。例えば、方向性電磁鋼板の化学組成は、ICP-AES（Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry）を用いて測定すればよい。具体的には、方向性電磁鋼板から採取した35mm角の試験片を、島津製作所製ICPS-8100等（測定装置）により、予め作成した検量線に基づいた条件で測定することにより、化学組成が特定される。なお、CおよびSは燃焼-赤外線吸収法を用いて測定し、Nは不活性ガス融解-熱伝導度法を用いて測定すればよい。

10

【0188】

また、上記の化学組成のうち、微量に含有される元素は、その含有量をICP-MS（Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry）を用いて測定してもよい。例えば、Biは、その含有量が0.001%未満の範囲を、ICP-AESではなく、ICP-MSを用いて測定することが好ましい。

【0189】

なお、上記の化学組成は、方向性電磁鋼板の成分である。測定試料となる方向性電磁鋼板が、表面に絶縁被膜等を有している場合は、被膜等を上記の方法で除去してから化学組成を測定する。

20

【0190】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板は、二次再結晶粒がずれ角がわずかに異なる小さな領域に分割されていることを特徴とし、この特徴によって低磁場領域での磁歪が低減される。さらに、各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、化学組成の制御も合わせて行うことで、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。なお、各実施形態に係る方向性電磁鋼板は、鋼板上の被膜構成や、磁区細分化処理の有無にかかわらず、珪素鋼板（方向性電磁鋼板）の特徴によって上記の効果が得られる。そのため、各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、鋼板上の被膜構成や、磁区細分化処理の有無などは特に制限されない。各実施形態では、目的に応じて任意の被膜を鋼板上に形成し、必要に応じて磁区細分化処理を施せばよい。

30

【0191】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、中間層上に接して配された絶縁被膜とを有してもよい。

【0192】

図3は、本発明の好適な実施形態に係る方向性電磁鋼板の断面模式図である。図3に示すように、本実施形態に係る方向性電磁鋼板10（珪素鋼板）は、切断方向が板厚方向と平行な切断面を見たとき、方向性電磁鋼板10（珪素鋼板）上に接して配された中間層20と、中間層20上に接して配された絶縁被膜30とを有してもよい。

40

【0193】

例えば、上記の中間層は、酸化物を主体とする層、炭化物を主体とする層、窒化物を主体とする層、硼化物を主体とする層、珪化物を主体とする層、りん化合物を主体とする層、硫化物を主体とする層、金属間化合物を主体とする層などであればよい。これらの中間層は、酸化還元性を制御した雰囲気中での熱処理、化学蒸着（CVD）、物理蒸着（PVD）などによって形成できる。

【0194】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、上記中間層が平均厚さ1~3μmのフォスファイト被膜であってもよい。なお、フォスファイト被膜とは、Mg₂SiO₄を主体とする被膜である。このフォスファイト被膜と方向性電磁鋼板との界面は、上記

50

断面で見たとき、フォルステライト被膜が鋼板に嵌入した界面となる。

【0195】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、上記中間層が平均厚さ2～500nmの酸化膜であってもよい。なお、酸化膜とは、SiO₂を主体とする被膜である。この酸化膜と方向性電磁鋼板との界面は、上記断面で見たとき、平滑界面となる。

【0196】

また、上記の絶縁被膜は、りん酸塩とコロイド状シリカとを主体とし平均厚さが0.1～10μmの絶縁被膜や、アルミナゾルと硼酸とを主体とし平均厚さが0.5～8μmの絶縁被膜であればよい。

【0197】

本発明の各実施形態に係る方向性電磁鋼板では、局所的な微小歪の付与または局所的な溝の形成の少なくとも1つによって磁区が細分化されていてもよい。なお、局所的な微小歪や局所的な溝は、レーザー、プラズマ、機械的方法、エッチング、その他の手法によって付与または形成すればよい。例えば、局所的な微小歪または局所的な溝は、鋼板の圧延面上で圧延方向と交差する方向に延伸するように線状または点状に、且つ圧延方向の間隔が2mm～10mmになるように付与または形成すればよい。

【0198】

[方向性電磁鋼板の製造方法]

次に、本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法を説明する。

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板を製造する方法は、下記の方法に限定されない。下記の製造方法は、本実施形態に係る方向性電磁鋼板を製造するための一つの例である。

【0199】

図4は、本発明の一実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法を例示する流れ図である。図4に示すように、本実施形態に係る方向性電磁鋼板（珪素鋼板）の製造方法は、鑄造工程と、熱間圧延工程と、熱延板焼鈍工程と、冷間圧延工程と、脱炭焼鈍工程と、焼鈍分離剤塗布工程と、仕上げ焼鈍工程とを備える。また、必要に応じて、脱炭焼鈍工程から仕上げ焼鈍工程までの任意のタイミングで窒化処理を行ってもよく、仕上げ焼鈍工程後に絶縁被膜形成工程や磁区制御工程をさらに有してもよい。

【0200】

具体的には、本実施形態に係る方向性電磁鋼板（珪素鋼板）の製造方法は、

鑄造工程で、化学組成として、質量%で、Si：2.0～7.0%、Bi：0.0010～0.0200%、Nb：0～0.030%、V：0～0.030%、Mo：0～0.030%、Ta：0～0.030%、W：0～0.030%、C：0～0.0850%、Mn：0～1.0%、S：0～0.0350%、Se：0～0.0350%、Al：0～0.0650%、N：0～0.0120%、Cu：0～0.40%、B：0～0.080%、P：0～0.50%、Ti：0～0.0150%、Sn：0～0.10%、Sb：0～0.10%、Cr：0～0.30%、Ni：0～1.0%を含有し、残部がFeおよび不純物からなるスラブを鑄造し、

脱炭焼鈍工程で、一次再結晶粒径を24μm以下に制御し、

仕上げ焼鈍工程で、

上記スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030～0.030%であるとき、加熱過程にて、700～800でのPH₂O/PH₂を0.10～1.0とするか、又は950～1000でのPH₂O/PH₂を0.010～0.070とするか、のうちの少なくとも一方を制御し、且つ850～950での保持時間を120～600分とし、

上記スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030～0.030%でないとき、加熱過程にて、700～800でのPH₂O/PH₂を0.10～1.0とし、950～1000でのPH₂O/PH₂を0.010～0.070とし、且つ850～950での保持時間を120～600分とする。

【0201】

10

20

30

40

50

上記の P_{H_2O} / P_{H_2} は、酸素ポテンシャルと呼ばれ、雰囲気ガスの水蒸気分圧 P_{H_2O} と水素分圧 P_{H_2} との比である。

【0202】

本実施形態の「切り替え」は、主として、方位変化（切り替え）自体を発生し易くする要因と、方位変化（切り替え）が一つの二次再結晶粒の中で継続的に発生するようにする要因との二つによって制御される。

【0203】

切り替え自体を発生し易くさせるためには、二次再結晶をより低温から開始させることが有効である。例えば、一次再結晶粒径を制御し、Nb群元素を活用することによって、二次再結晶の開始をより低温に制御できる。

10

【0204】

切り替えを一つの二次再結晶粒の中で継続的に発生させるためには、二次再結晶粒を低温から高温まで継続的に成長させることが有効である。例えば、従来から用いられるインヒビターであるAlNなどを適切な温度および雰囲気中で利用することによって、低温で二次再結晶粒を発生させ、インヒビター効果を高温まで継続して作用させ、切り替えを一つの二次再結晶粒の中で高温まで継続的に発生させることができる。

【0205】

すなわち、切り替えを好ましく発生させるためには、高温での二次再結晶粒の発生を抑制したまま、低温で発生した二次再結晶粒を高温まで優先的に成長させることが有効となる。

20

【0206】

また、本実施形態では、上記の二つの要因に加え、結晶粒の形状に面内異方性を付与するため、最終的な二次再結晶過程で、二次再結晶粒の成長に異方性を持たせる方法を採用してもよい。

【0207】

本実施形態の特徴である切り替えを制御するには、上記の要因が重要である。その他の製造条件は、従来の公知の方向性電磁鋼板の製造方法を適用することができる。例えば、高温スラブ加熱によって形成するMnSやAlNをインヒビターとして利用する製造方法や、低温スラブ加熱とその後の窒化処理によって形成するAlNをインヒビターとして利用する製造方法などがある。本実施形態の特徴である切り替えは、何れの製造方法でも適用が可能であり、特定の製造方法に限定されない。以下では、窒化処理を適用する製造方法にて切り替えを制御する方法を一例として説明する。

30

【0208】

（ 鑄造工程 ）

鑄造工程では、スラブを準備する。スラブの製造方法の一例は次のとおりである。溶鋼を製造（溶製）する。溶鋼を用いてスラブを製造する。連続鑄造法によりスラブを製造してもよい。溶鋼を用いてインゴットを製造し、インゴットを分塊圧延してスラブを製造してもよい。スラブの厚さは、特に限定されない。スラブの厚さは、たとえば、150～350mmである。スラブの厚さは、好ましくは、220～280mmである。スラブとして、厚さが10～70mmの、いわゆる薄スラブを用いてもよい。薄スラブを用いる場合、熱間圧延工程にて、仕上げ圧延前の粗圧延を省略できる。

40

【0209】

スラブは、化学組成として、基本元素であるSiおよびBiを含有し、必要に応じて選択元素を含み、残部がFe及び不純物からなればよい。上記した基本元素以外の化学組成は、一般的な方向性電磁鋼板の製造に用いられるスラブの化学組成を用いることができる。スラブの化学組成はたとえば、次の元素を含有する。

【0210】

C : 0 ~ 0 . 0 8 5 0 %

炭素（C）は、製造過程では一次再結晶組織の制御に有効な元素であるものの、最終製品のC含有量が過剰であると磁気特性に悪影響を及ぼす。したがって、スラブのC含有量

50

は0～0.0850%であればよい。C含有量の好ましい上限は0.0750%である。Cは後述の脱炭焼鈍工程及び仕上げ焼鈍工程で純化され、仕上げ焼鈍工程後には0.0050%以下となる。Cを含む場合、工業生産における生産性を考慮すると、C含有量の下限は0%超であってもよく、0.0010%であってもよい。

【0211】

Si：2.0～7.0%

シリコン(Si)は、方向性電磁鋼板の電気抵抗を高めて鉄損を低下させる。Si含有量が2.0%未満であれば、仕上げ焼鈍時にオーステナイト変態が生じて、方向性電磁鋼板の結晶方位が損なわれてしまう。一方、Si含有量が7.0%を超えれば、冷間加工性が低下して、冷間圧延時に割れが発生しやすくなる。Si含有量の好ましい下限は2.50%であり、さらに好ましくは3.0%である。Si含有量の好ましい上限は4.50%であり、さらに好ましくは4.0%である。

10

【0212】

Bi：0.0010～0.0200%

ビスマス(Bi)は、二次再結晶粒内を分割する小傾角な粒界を意図的に作り込む製造条件を採用するとき、化学組成としてスラブに添加されれば、最終製品の磁束密度を好ましく向上する元素である。この際、従来技術のように最終製品の被膜密着性の低下を考慮する必要はない。Bi添加量は、0.0010～0.0200%であればよい。Bi添加量が0%であるときには、そもそも最終製品の磁束密度の向上効果が得られない。一方、磁束密度の向上効果を狙ってスラブにBiを添加するとしても、0.0010%未満では仕上げ焼鈍の純化工程で不可避免的に系外への排出が起きてしまい、最終製品の残存量を0.0005%以上に制御することが困難となる。ただし後述するように、焼鈍分離剤にBi含有化合物を添加することでスラブにおけるBi添加量がゼロであっても、Biによる磁束密度の向上効果を楽しむことは可能である。よって、スラブにおけるBi添加量の下限はあくまでもひとつの目安としての値である。また、スラブへのBi添加量が過剰になると適切な二次再結晶の発生および進行を阻害し、最終製品での磁束密度を顕著に阻害する。また、一次被膜の形成にも悪影響を及ぼすようになり被膜密着性の確保も困難となる。さらに、スラブに高濃度で添加されたBiを純化により上記実施形態が必要とする0.0100%以下まで低減するには、高温長時間の念入りな純化が必要となるが、これは前述のように界面の嵌入構造を緩和させて被膜密着性の低下要因ともなる。これらのことから、スラブにおけるBiの過剰な添加は回避すべきであり、添加量の上限目安は0.0200%となる。

20

30

【0213】

Mn：0～1.0%

マンガン(Mn)は、S又はSeと結合して、MnS、又は、MnSeを生成し、インヒビターとして機能する。Mn含有量は0～1.0%であればよい。Mnを含有させる場合、Mn含有量が0.05～1.0%の範囲内にある場合に、二次再結晶が安定するので好ましい。本実施形態では、インヒビターの機能の一部をNb群元素の窒化物によって担うことが可能である。この場合は、一般的なインヒビターとしてのMnS、又は、MnSe強度は弱めに制御する。このため、Mn含有量の好ましい上限は0.50%であり、さらに好ましくは0.20%である。

40

【0214】

S：0～0.0350%

Se：0～0.0350%

硫黄(S)及びセレン(Se)は、Mnと結合して、MnS又はMnSeを生成し、インヒビターとして機能する。S含有量は0～0.0350%であればよく、Se含有量は0～0.0350%であればよい。S及びSeの少なくとも一方を含有させる場合、S及びSeの含有量が合計で0.0030～0.0350%であれば、二次再結晶が安定するので好ましい。本実施形態では、インヒビターの機能の一部をNb群元素の窒化物によって担うことが可能である。この場合は、一般的なインヒビターとしてのMnS、又は、M

50

n S e 強度は弱めに制御する。このため、S 及び S e 含有量の合計の好ましい上限は 0 . 0 2 5 0 % であり、さらに好ましくは 0 . 0 1 0 % である。S 及び S e は仕上げ焼鈍後に残留すると化合物を形成し、鉄損を劣化させる。そのため、仕上げ焼鈍中の純化により、S 及び S e をできるだけ少なくすることが好ましい。

【 0 2 1 5 】

ここで、「S 及び S e の含有量が合計で 0 . 0 0 3 0 ~ 0 . 0 3 5 0 %」であるとは、スラブの化学組成が S 又は S e のいずれか一方のみを含有し、S 又は S e のいずれか一方の含有量が 0 . 0 0 3 0 ~ 0 . 0 3 5 0 % であってもよいし、スラブが S 及び S e の両方を含有し、S 及び S e の含有量が合計で 0 . 0 0 3 0 ~ 0 . 0 3 5 0 % であってもよい。

【 0 2 1 6 】

A l : 0 ~ 0 . 0 6 5 0 %

アルミニウム (A l) は、N と結合して (A l , S i) N として析出し、インヒビターとして機能する。A l 含有量は 0 ~ 0 . 0 6 5 0 % であればよい。A l を含有させる場合、A l の含有量が 0 . 0 1 0 ~ 0 . 0 6 5 % の範囲内にある場合に、後述の窒化により形成されるインヒビターとしての A l N は二次再結晶温度域を拡大し、特に高温域での二次再結晶が安定するので好ましい。A l 含有量の好ましい下限は 0 . 0 2 0 % であり、さらに好ましくは 0 . 0 2 5 0 % である。二次再結晶の安定性の観点から、A l 含有量の好ましい上限は 0 . 0 4 0 % であり、さらに好ましくは 0 . 0 3 0 % である。

【 0 2 1 7 】

N : 0 ~ 0 . 0 1 2 0 %

窒素 (N) は、A l と結合してインヒビターとして機能する。N 含有量は 0 ~ 0 . 0 1 2 0 % であればよい。N は製造過程の途中で窒化により含有させることが可能であるため下限が 0 % でもよい。一方、N を含有させる場合、N 含有量が 0 . 0 1 2 0 % を超えれば、鋼板中に欠陥の一種であるプリスタが発生しやすくなる。N 含有量の好ましい上限は 0 . 0 1 0 % であり、さらに好ましくは 0 . 0 0 9 0 % である。N は仕上げ焼鈍工程で純化され、仕上げ焼鈍工程後には 0 . 0 0 5 0 % 以下となる。

【 0 2 1 8 】

N b : 0 ~ 0 . 0 3 0 %

V : 0 ~ 0 . 0 3 0 %

M o : 0 ~ 0 . 0 3 0 %

T a : 0 ~ 0 . 0 3 0 %

W : 0 ~ 0 . 0 3 0 %

N b、V、M o、T a、及び W は、N b 群元素である。N b 含有量は 0 ~ 0 . 0 3 0 % であればよく、V 含有量は 0 ~ 0 . 0 3 0 % であればよく、M o 含有量は 0 ~ 0 . 0 3 0 % であればよく、T a 含有量は 0 ~ 0 . 0 3 0 % であればよく、W 含有量は 0 ~ 0 . 0 3 0 % であればよい。

【 0 2 1 9 】

また、N b 群元素として、N b、V、M o、T a、および W からなる群から選択される少なくとも 1 種を合計で 0 . 0 0 3 0 ~ 0 . 0 3 0 質量% 含有することが好ましい。

【 0 2 2 0 】

N b 群元素を切り替えの制御に活用する場合、スラブでの N b 群元素の合計含有量が 0 . 0 3 0 % 以下 (好ましくは 0 . 0 0 3 0 % 以上 0 . 0 3 0 % 以下) であると、適切なタイミングで二次再結晶を開始させる。また、発生する二次再結晶粒の方位が非常に好ましいものとなり、その後の成長過程で、本実施形態が特徴とする切り替えが起きやすくなり、最終的に磁気特性にとって好ましい組織に制御できる。

【 0 2 2 1 】

N b 群元素を含有することにより、脱炭焼鈍後の一次再結晶粒径は、N b 群元素を含有しない場合に比べて好ましく小径化する。この一次再結晶粒の微細化は、炭化物、炭窒化物、窒化物等の析出物によるピン止め効果、および固溶元素としてのドラッグ効果などにより得られると考えられる。特に、N b 及び T a はその効果が好ましく得られる。

10

20

30

40

50

【 0 2 2 2 】

N b 群元素による一次再結晶粒径の小径化によって、二次再結晶の駆動力が大きくなり、二次再結晶が従来よりも低温で開始する。また、N b 群元素の析出物は、A l N などの従来インヒビターよりも比較的低温で分解するため、仕上げ焼鈍の昇温過程にて、二次再結晶が従来よりも低温で開始する。これらのメカニズムについては後述するが、低温で二次再結晶が開始することで、本実施形態の特徴である切り替えが起き易くなる。

【 0 2 2 3 】

なお、二次再結晶のインヒビターとしてN b 群元素の析出物を活用する場合、N b 群元素の炭化物及び炭窒化物は、二次再結晶が可能な温度域よりも低い温度域で不安定となるため、二次再結晶開始温度を低温にシフトさせる効果が小さいと考えられる。このため、二次再結晶開始温度を好ましく低温にシフトさせるためには、二次再結晶が可能な温度域まで安定であるN b 群元素の窒化物を活用することが好ましい。

10

【 0 2 2 4 】

二次再結晶開始温度を好ましく低温シフトさせるN b 群元素の析出物（好ましくは窒化物）と、二次再結晶開始後も高温まで安定なA l N、(A l、S i) N などの従来インヒビターとを併用することにより、二次再結晶粒である{ 1 1 0 } < 0 0 1 > 方位粒の優先成長温度域を従来よりも拡大することができる。そのため、低温から高温までの幅広い温度域で切り替えが発生し、方位選択が広い温度域で継続する。その結果、最終的な 粒界の存在頻度が高まるとともに、方向性電磁鋼板を構成する二次再結晶粒の{ 1 1 0 } < 0 0 1 > 方位集積度を効果的に高めることができる。

20

【 0 2 2 5 】

なお、N b 群元素の炭化物や炭窒化物などのピン止め効果により、一次再結晶粒の微細化を指向する場合は、鑄造時点でスラブのC含有量を50ppm以上としておくことが好ましい。ただし、二次再結晶におけるインヒビターとしては、炭化物もしくは炭窒化物よりも、窒化物が好ましいことから、一次再結晶完了後は、脱炭焼鈍によりC含有量を30ppm以下、好ましくは20ppm以下、さらに好ましくは10ppm以下にして、鋼中のN b 群元素の炭化物や炭窒化物を十分に分解しておくことが好ましい。脱炭焼鈍にて、N b 群元素の大部分を固溶状態にしておくことで、その後の窒化処理にて、N b 群元素の窒化物（インヒビター）を、本実施形態にとって好ましい形態（二次再結晶が進行しやすい形態）に調整することができる。

30

【 0 2 2 6 】

N b 群元素の合計含有量は、0.0040%以上であることが好ましく、0.0050%以上であることがより好ましい。また、N b 群元素の合計含有量は、0.020%以下であることが好ましく、0.010%であることがより好ましい。

【 0 2 2 7 】

スラブの化学組成の残部はF e 及び不純物からなる。なお、ここでいう「不純物」は、スラブを工業的に製造する際に、原材料に含まれる成分、又は製造の過程で混入する成分から不可避免的に混入し、本実施形態の効果に実質的に影響を与えない元素を意味する。

【 0 2 2 8 】

また、スラブは、製造上の課題解決のほか、化合物形成によるインヒビター機能の強化や磁気特性への影響を考慮して、上記F e の一部に代えて、公知の選択元素を含有してもよい。選択元素として、たとえば、次の元素が挙げられる。

40

【 0 2 2 9 】

C u : 0 ~ 0 . 4 0 %
 B : 0 ~ 0 . 0 8 0 %
 P : 0 ~ 0 . 5 0 %
 T i : 0 ~ 0 . 0 1 5 0 %
 S n : 0 ~ 0 . 1 0 %
 S b : 0 ~ 0 . 1 0 %
 C r : 0 ~ 0 . 3 0 %

50

Ni : 0 ~ 1 . 0 %

これらの選択元素は、公知の目的に応じて含有させればよい。これらの選択元素の含有量の下限値を設ける必要はなく、下限値が 0 % でもよい。

【 0 2 3 0 】

(熱間圧延工程)

熱間圧延工程は、所定の温度 (例えば 1 1 0 0 ~ 1 4 0 0) に加熱されたスラブの熱間圧延を行い、熱間圧延鋼板を得る工程である。熱間圧延工程では、例えば、鑄造工程後に加熱された珪素鋼素材 (スラブ) の粗圧延を行った後、仕上げ圧延を行って所定厚さ、例えば、 1 . 8 ~ 3 . 5 m m の熱間圧延鋼板とする。仕上げ圧延終了後、熱間圧延鋼板を所定の温度で巻き取る。

10

【 0 2 3 1 】

インヒビターとしての Mn S 強度はそれほど必要でないため、生産性を考慮すれば、スラブ加熱温度は 1 1 0 0 ~ 1 2 8 0 とすることが好ましい。

【 0 2 3 2 】

なお、熱延工程にて、鋼帯の幅または長手方向に上記範囲内で温度勾配を設けることにより、結晶組織、結晶方位、及び析出物について、鋼板面内位置での不均一性を生じさせてもよい。これにより、最終的な二次再結晶過程での二次再結晶粒の成長に異方性を持たせ、本実施形態にとって必要な結晶粒の形状に面内異方性を好ましく付与することが可能である。例えば、スラブ加熱にて、板幅方向に温度勾配を設けて高温部の析出物を微細化し、高温部のインヒビター機能を高めることで、二次再結晶時に低温部から高温部に向けた優先的な粒成長を誘起することが可能である。

20

【 0 2 3 3 】

(熱延板焼鈍工程)

熱延板焼鈍工程は、熱間圧延工程で得た熱間圧延鋼板を所定の温度条件 (例えば 7 5 0 ~ 1 2 0 0 で 3 0 秒間 ~ 1 0 分間) で焼鈍して、熱延焼鈍板を得る工程である。

【 0 2 3 4 】

なお、熱延板焼鈍工程にて、鋼帯の幅または長手方向に上記範囲内で温度勾配を設けることにより、結晶組織、結晶方位、及び析出物について、鋼板面内位置での不均一性を生じさせてもよい。これにより、最終的な二次再結晶過程での二次再結晶粒の成長に異方性を持たせ、本実施形態にとって必要な結晶粒の形状に面内異方性を好ましく付与することが可能である。例えば、熱延板焼鈍にて、板幅方向に温度勾配を設けて高温部の析出物を微細化し、高温部のインヒビター機能を高めることで、二次再結晶時に低温部から高温部に向けた優先的な粒成長を誘起することが可能である。

30

【 0 2 3 5 】

(冷間圧延工程)

冷間圧延工程は、熱延板焼鈍工程で得た熱延焼鈍板を、1 回の冷間圧延、又は焼鈍 (中間焼鈍) を介して複数回 (2 回以上) の冷間圧延 (例えば総冷延率で 8 0 ~ 9 5 %) により、例えば、 0 . 1 0 ~ 0 . 5 0 m m の厚さを有する冷間圧延鋼板を得る工程である。

【 0 2 3 6 】

(脱炭焼鈍工程)

脱炭焼鈍工程は、冷間圧延工程で得た冷間圧延鋼板に脱炭焼鈍 (例えば 7 0 0 ~ 9 0 0 で 1 ~ 3 分間) を行い、一次再結晶が生じた脱炭焼鈍鋼板を得る工程である。冷間圧延鋼板に脱炭焼鈍を行うことで、冷間圧延鋼板中に含まれる C が除去される。脱炭焼鈍は、冷間圧延鋼板中に含まれる「C」を除去するために、湿潤雰囲気中で行うことが好ましい。

40

【 0 2 3 7 】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法では、脱炭焼鈍鋼板の一次再結晶粒径を 2 4 μ m 以下に制御することが好ましい。一次再結晶粒径を微細化することによって、二次再結晶開始温度を好ましく低温にシフトさせることができる。

【 0 2 3 8 】

例えば、前述の熱間圧延および熱延板焼鈍の条件を制御したり、脱炭焼鈍温度を必要に

50

応じて低温化したりすることによって、一次再結晶粒径を小さくすることができる。または、スラブにN b群元素を含有させ、N b群元素の炭化物や炭窒化物などのピン止め効果によって、一次再結晶粒を小さくすることができる。

【0239】

なお、脱炭焼鈍に起因する脱炭酸化量及び表面酸化層の状態は、中間層（グラス被膜）の形成に影響を及ぼすため、本実施形態の効果を発現するために従来の方法を使って適宜調整してもよい。

【0240】

切り替えを起きやすくする元素として含有させてもよいN b群元素は、この時点では、炭化物や炭窒化物や固溶元素などとして存在し、一次再結晶粒径を微細化するように影響を及ぼす。一次再結晶粒径は、23 μm以下であることが好ましく、20 μm以下であることがより好ましく、18 μm以下であることがより好ましい。また、一次再結晶粒径は、8 μm以上であればよく、12 μm以上であってもよい。

10

【0241】

なお、脱炭焼鈍工程にて、鋼帯の幅または長手方向に上記範囲内の温度勾配や脱炭挙動差を設けることにより、結晶組織、結晶方位、及び析出物について、鋼板面内位置での不均一性を生じさせてもよい。これにより、最終的な二次再結晶過程での二次再結晶粒の成長に異方性を持たせ、本実施形態にとって必要な結晶粒の形状に面内異方性を好ましく付与することが可能である。例えば、スラブ加熱にて、板幅方向に温度勾配を設けて低温部の一次再結晶粒径を微細化して二次再結晶開始の駆動力を高め、低温部での二次再結晶を早期に開始させることで、二次再結晶粒の成長時に低温部から高温部に向けた優先的な粒成長を誘起することが可能である。

20

【0242】

また、脱炭焼鈍工程では、スラブへのB i添加による最終製品での被膜密着性の低下を回避するための公知の焼鈍条件を適用してもよい。例えば、必要に応じて、特許文献17が開示するように、脱炭焼鈍の前部領域の温度を800～880とし、続く後部領域の温度を850～930で10～30秒、その雰囲気PH₂O / PH₂を0.15以下に制御してもよい。また、必要に応じて、特許文献18が開示するように、脱炭焼鈍後の酸化膜の酸素量を600～900ppmに制御してもよい。

【0243】

（窒化处理）

窒化处理は、二次再結晶におけるインヒビターの強度を調整するために実施する。窒化处理では、上述の脱炭焼鈍の開始から、後述する仕上げ焼鈍における二次再結晶の開始までの間の任意のタイミングで、鋼板の窒素量を40～300ppm程度に増加させればよい。窒化处理としては、例えば、アンモニア等の窒化能のあるガスを含有する雰囲気中で鋼板を焼鈍する処理や、MnN等の窒化能を有する粉末を含む焼鈍分離剤を塗布した脱炭焼鈍鋼板を仕上げ焼鈍する処理等が例示される。

30

【0244】

スラブがN b群元素を上記の数値範囲で含有する場合は、窒化处理によって形成されるN b群元素の窒化物が比較的低温で粒成長抑止機能が消失するインヒビターとして機能するので、二次再結晶が従来よりも低温から開始する。この窒化物は、二次再結晶粒の核発生の選択性に関して有利に作用し、高磁束密度化を実現している可能性も考えられる。また、窒化处理ではAlNも形成され、このAlNが比較的高温まで粒成長抑止機能が継続するインヒビターとして機能する。これらの効果を得るためには、窒化处理後の窒化量を130～250ppmとすることが好ましく、さらには150～200ppmとすることが好ましい。

40

【0245】

なお、窒化处理にて、鋼帯の幅または長手方向に上記範囲内で窒化量に差を設けることにより、インヒビター強度について、鋼板面内位置での不均一性を生じさせてもよい。これにより、最終的な二次再結晶過程での二次再結晶粒の成長に異方性を持たせ、本実施形

50

態にとって必要な 結晶粒の形状に面内異方性を好ましく付与することが可能である。例えば、板幅方向に窒化量の差を設けて高窒化部のインヒビター機能を高めることで、二次再結晶時に低窒化部から高窒化部に向けた優先的な粒成長を誘起することが可能である。

【0246】

(焼鈍分離剤塗布工程)

焼鈍分離剤塗布工程は、脱炭焼鈍鋼板に焼鈍分離剤を塗布する工程である。焼鈍分離剤としては、例えば、MgOを主成分とする焼鈍分離剤や、アルミナを主成分とする焼鈍分離剤を用いることができる。

【0247】

なお、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を用いた場合には、仕上げ焼鈍によって中間層としてフォスフェイト被膜(Mg₂SiO₄を主体とする被膜)が形成されやすく、アルミナを主成分とする焼鈍分離剤を用いた場合には、仕上げ焼鈍によって中間層として酸化膜(SiO₂を主体とする被膜)が形成されやすい。これらの中間層は、必要に応じて除去してもよい。

10

【0248】

焼鈍分離剤を塗布後の脱炭焼鈍鋼板は、コイル状に巻取った状態で、次の仕上げ焼鈍工程で仕上げ焼鈍される。

【0249】

また、焼鈍分離剤塗布工程では、スラブへのBi添加による最終製品での被膜密着性の低下を回避するための公知の焼鈍分離剤を用いてもよい。例えば、必要に応じて、特許文献18が開示するように、MgO100重量部に対し塩素化合物を塩素分として0.01~0.10重量部、及び/又はSb、B、Sr、Ba、Ce、Caの化合物の1種又は2種類以上を0.05~2.0重量部添加する焼鈍分離剤を用いてもよい。または、特許文献19が開示するように、希土類金属の酸化物、硫化物、硫酸塩、ケイ化物、リン酸塩、水酸化物、炭酸塩、硼素化合物、塩化物、フッ化物の1種または2種以上を希土類金属換算で0.1~10質量%、Ca、SrまたはBaの中から選ばれる1種以上のアルカリ土類金属の酸化物、硫化物、硫酸塩、ケイ化物、リン酸塩、水酸化物、炭酸塩、硼素化合物、塩化物、フッ化物の1種または2種以上をアルカリ土類金属換算で0.1~10質量%、および硫黄化合物をS換算で0.01~5質量%添加する焼鈍分離材を用いてもよい。さらに、焼鈍分離剤にBiを含有する化合物を添加し、仕上げ焼鈍工程の前半において鋼板中にBiを拡散させ、このBiによりインヒビターを強化し二次再結晶における{110}<001>方位への集積度向上に寄与させることも可能である。この場合、製品におけるBi含有量がスラブでのBi添加量を上回ることも起こり得る。

20

30

【0250】

(仕上げ焼鈍工程)

仕上げ焼鈍工程は、焼鈍分離剤が塗布された脱炭焼鈍鋼板に仕上げ焼鈍を施し、二次再結晶を生じさせる工程である。この工程は、一次再結晶粒の成長をインヒビターにより抑制した状態で二次再結晶を進行させることによって、{100}<001>方位粒を優先成長させ、磁束密度を飛躍的に向上させる。

【0251】

仕上げ焼鈍は、本実施形態の特徴である切り替えを制御するために重要な工程である。本実施形態では、仕上げ焼鈍にて、以下の(A)、(B)、(D)の3つの条件を基本として、ずれ角を制御する。

40

【0252】

なお、仕上げ焼鈍工程の説明における「Nb群元素の合計含有量」は、仕上げ焼鈍直前の鋼板(脱炭焼鈍鋼板)のNb群元素の合計含有量を意味する。つまり、仕上げ焼鈍条件に影響するのは、仕上げ焼鈍直前の鋼板の化学組成であり、仕上げ焼鈍および純化が起きた後の化学組成(例えば方向性電磁鋼板(仕上げ焼鈍鋼板)の化学組成)とは無関係である。

【0253】

50

(A) 仕上げ焼鈍の加熱過程にて、700～800 の温度域での雰囲気についての $\text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2$ を PA としたとき、

PA : 0.10～1.0

(B) 仕上げ焼鈍の加熱過程にて、950～1000 の温度域での雰囲気についての $\text{PH}_2\text{O} / \text{PH}_2$ を PB としたとき、

PB : 0.010～0.070

(D) 仕上げ焼鈍の加熱過程にて、850～950 の温度域での保持時間を TD としたとき、

TD : 120～600分

【0254】

なお、Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%の場合は、条件(A)、(B)のうちの少なくとも一つ、かつ条件(D)を満足すればよい。

【0255】

Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%でない場合は、条件(A)、(B)、(D)の3つを満足すればよい。

【0256】

条件(A)および(B)に関して、Nb群元素を上記範囲で含有する場合、Nb群元素が持つ回復再結晶抑制効果のため、「低温域での二次再結晶の開始」と「高温域までの二次再結晶の継続」の二つ要因が強く作用する。その結果、本実施形態の効果を得るための制御条件が緩和する。

【0257】

PAは、0.30以上であることが好ましく、0.60以下であることが好ましい。

PBは、0.020以上であることが好ましく、0.050以下であることが好ましい。

TDは、180分以上であることが好ましく、240分以上であることがより好ましく、480分以下であることが好ましく、360分以下であることがより好ましい。

【0258】

切り替えが発生するメカニズムの詳細は、現時点では明確ではない。ただし、二次再結晶過程の観察結果および切り替えを好ましく制御できる製造条件を考慮し、「低温域での二次再結晶の開始」と「高温域までの二次再結晶の継続」との二つの要因が重要であると推察している。

【0259】

この二つの要因を念頭に、上記(A)、(B)、(D)の限定理由について説明する。なお、以下の説明で、メカニズムについての記述は推測を含む。

【0260】

条件(A)は、二次再結晶が起きる温度よりも十分に低い温度域での条件であり、この条件は二次再結晶と認識される現象に直接的には影響しない。ただし、この温度域は、鋼板表面に塗布された焼鈍分離剤が持ち込む水分等で鋼板表層が酸化する温度域であり、すなわち、一次被膜(中間層)の形成に影響を及ぼす温度域である。条件(A)は、この一次被膜の形成を制御することを介して、その後の「高温域までの二次再結晶の継続」を可能とするために重要となる。この温度域を上記雰囲気とすることで、一次被膜は緻密な構造となり、二次再結晶が生じる段階にてインヒビターの構成元素(例えば、Al、Nなど)が系外に排出されるのを阻害するバリアとして作用する。これにより二次再結晶が高温まで継続し、切り替えを十分に起こすことが可能になる。

【0261】

条件(B)は、二次再結晶の粒成長の中期段階に相当する温度域での条件であり、この条件は二次再結晶粒が成長する過程でのインヒビター強度の調整に影響する。この温度領域を上記雰囲気とすることで、粒成長の中期段階にて、二次再結晶粒の成長がインヒビター分解に律速されて進行するようになる。詳細は後述するが、条件(B)によって、二次再結晶粒の成長方向前面の粒界に転位が効率的に蓄積するので、切り替えの発生頻度が高まり且つ切り替えが継続的に発生する。

10

20

30

40

50

【0262】

条件(D)は、二次再結晶の核形成から粒成長の初期段階に相当する温度域での条件である。この温度域での保持は良好な二次再結晶を起こすために重要であるが、保持時間が長くなると、一次再結晶粒の成長も起きやすくなる。例えば、一次再結晶粒の粒径が大きくなると、切り替え発生の駆動力となる転位の蓄積(二次再結晶粒の成長方向前面の粒界への転位蓄積)が起きにくくなってしまう。この温度域での保持時間を600分以下とすれば、一次再結晶粒の粗大化を抑制した状態で二次再結晶粒の初期段階の成長を進行させることができるので、特定のずれ角の選択性を高めることとなる。本実施形態では、一次再結晶粒の微細化やNb群元素の活用などにより二次再結晶開始温度を低温にシフトさせることを背景とし、ずれ角の切り替えを多く発生させ且つ継続させる。

10

【0263】

本実施形態の製造方法では、Nb群元素を活用する場合、条件(A)および(B)の両方を満足しなくても一方を選択的に満足すれば、本実施形態の切り替え条件を満たす方向性電磁鋼板を得ることが可能である。すなわち、二次再結晶初期に特定のずれ角(本実施形態の場合はずれ角)での切り替え頻度を高めるように制御すれば、切り替えによる方位差を保ったままで二次再結晶粒が成長し、その影響は後期まで継続して最終的な切り替え頻度も高くなる。さらにその影響は後期まで継続して新たな切り替えが発生するとしても、ずれ角の変化が大きい切り替えが発生し、最終的なずれ角の切り替え頻度も高くなる。もちろん、Nb群元素を活用したとしても、条件(A)および(B)の両方を満たすことが最適である。

20

【0264】

上記した本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法を基本として、二次再結晶粒をずれ角がわずかに異なる小さな領域に分割された状態に制御すればよい。具体的には、上記方法を基本として、第1実施形態として記述したように、方向性電磁鋼板中に、境界条件BBを満足する粒界に加えて、境界条件BAを満足し且つ上記境界条件BBを満足しない粒界を作り込めばよい。

【0265】

次に、本実施形態に係る製造方法に関する好ましい製造条件を説明する。

【0266】

本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍工程で、スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030~0.030%でないとき、加熱過程にて、1000~1050での保持時間を300~1500分とすることが好ましい。

30

【0267】

同様に、本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍工程で、スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030~0.030%であるとき、加熱過程にて、1000~1050での保持時間を150~900分とすることが好ましい。

【0268】

以下では、上記の製造条件を、条件(E-1)とする。

(E-1)仕上げ焼鈍の加熱過程にて、1000~1050の温度域での保持時間(総滞留時間)をTE1としたとき、

40

Nb群元素の合計含有量が0.0030~0.030%の場合、

TE1: 150分以上

Nb群元素の合計含有量が上記範囲外の場合、

TE1: 300分以上

【0269】

Nb群元素の合計含有量が0.0030~0.030%の場合、TE1は、200分以上であることが好ましく、300分以上であることがさらに好ましく、900分以下であることが好ましく、600分以下であることがさらに好ましい。

Nb群元素の合計含有量が上記範囲外の場合、TE1は、360分以上であることが好

50

ましく、600分以上であることがより好ましく、1500分以下であることが好ましく、900分以下であることがより好ましい。

【0270】

条件(E-1)は、切り替えが起きている 粒界の鋼板面内の延伸方向を制御する因子となる。1000～1050 で、十分な保持を行うことで、圧延方向での切り替え頻度を高めることが可能となる。上記温度域での保持中に、インヒビターを含む鋼中析出物の形態(例えば、配列及び形状)が変化することに起因して、圧延方向での切り替え頻度が高まると考えられる。

【0271】

仕上げ焼鈍に供される鋼板は、熱間圧延および冷間圧延を経ているので、鋼中の析出物(特にMnS)の配列及び形状は、鋼板面内で異方性を有し、圧延方向に偏向する傾向を有すると考えられる。詳細は不明であるが、上記の温度域での保持は、このような析出物の形態の圧延方向への偏向程度を変化させ、二次再結晶粒の成長時に 粒界が鋼板面内のどの方向に延伸しやすいかに影響を及ぼしていると考えられる。具体的には、1000～1050 という比較的高温で鋼板を保持すると、鋼中で析出物の形態の圧延方向への偏向が消失し、このため 粒界が圧延方向に延伸する割合が低下して圧延直角方向に延伸する傾向が強くなる。その結果として、圧延方向で計測する 粒界の頻度が高くなると考えられる。

10

【0272】

なお、Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%の場合は、 粒界の存在頻度自体が高いため、条件(E-1)の保持時間が短くても本実施形態の効果を得ることが可能である。

20

【0273】

上記した条件(E-1)を含む製造方法によって、 結晶粒の圧延方向の粒径を、二次再結晶粒の圧延方向の粒径よりも小さく制御できる。具体的には、上記した条件(E-1)を合わせて制御することによって、第2実施形態として記述したように、方向性電磁鋼板にて、粒径 R_{AL} と粒径 R_{BL} とが、 $1.10 \cdot R_{BL} \div R_{AL}$ を満たすように制御できる。

【0274】

また、本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍工程で、スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030～0.030%でないとき、加熱過程にて、950～1000 での保持時間を300～1500分とすることが好ましい。

30

【0275】

同様に、本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍工程で、スラブの化学組成のNb、V、Mo、Ta、およびWの合計含有量が0.0030～0.030%であるとき、加熱過程にて、950～1000 での保持時間を150～900分とすることが好ましい。

【0276】

以下では、上記の製造条件を、条件(E-2)とする。

(E-2)仕上げ焼鈍の加熱過程にて、950～1000 の温度域での保持時間(総滞留時間)をTE2としたとき、

40

Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%の場合、

TE2：150分以上

Nb群元素の合計含有量が上記範囲外の場合、

TE2：300分以上

【0277】

Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%の場合、TE2は、200分以上であることが好ましく、300分以上であることがより好ましく、900分以下であることが好ましく、600分以下であることがより好ましい。

Nb群元素の合計含有量が上記範囲外の場合、TE2は、360分以上であることが好ましく、600分以上であることがより好ましく、1500分以下であることが好ましく

50

、 900分以下であることがより好ましい。

【0278】

条件(E-2)は、切り替えが起きている 粒界の鋼板面内の延伸方向を制御する因子となる。950～1000 で、十分な保持を行うことで、圧延直角方向での切り替え頻度を高めることが可能となる。上記温度域での保持中に、インヒビターを含む鋼中析出物の形態(例えば、配列及び形状)が変化することに起因して、圧延直角方向での切り替え頻度が高まると考えられる。

【0279】

仕上げ焼鈍に供される鋼板は、熱間圧延および冷間圧延を経ているので、鋼中の析出物(特にMnS)の配列及び形状は、鋼板面内で異方性を有し、圧延方向に偏向する傾向を有すると考えられる。詳細は不明であるが、上記の温度域での保持は、このような析出物の形態の圧延方向への偏向程度を変化させ、二次再結晶粒の成長時に 粒界が鋼板面内のどの方向に延伸しやすいかに影響を及ぼしていると考えられる。具体的には、950～1000 という比較的低温で鋼板を保持すると、鋼中で析出物の形態の圧延方向への偏向が増長し、このため 粒界が圧延直角方向に延伸する割合が低下して圧延方向に延伸する傾向が強くなる。その結果として、圧延直角方向で計測する 粒界の頻度が高くなるものと考えられる。

10

【0280】

なお、Nb群元素の合計含有量が0.0030～0.030%の場合は、 粒界の存在頻度自体が高いため、条件(E-2)の保持時間が短くても本実施形態の効果を得ることが可能である。

20

【0281】

上記した条件(E-2)を含む製造方法によって、 結晶粒の圧延直角方向の粒径を、二次再結晶粒の圧延直角方向の粒径よりも小さく制御できる。具体的には、上記した条件(E-2)を合わせて制御することによって、第3実施形態として記述したように、方向性電磁鋼板にて、粒径 R_{Ac} と粒径 R_{Bc} とが、 $1.10 R_{Bc} \div R_{Ac}$ を満たすように制御できる。

【0282】

また、本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍の加熱過程にて、鋼板中の一次再結晶領域と二次再結晶領域との境界部位に0.5 / cm超の温度勾配を与えながら二次再結晶を生じさせることが好ましい。例えば、仕上げ焼鈍の加熱過程の800 から1150 の温度範囲内で二次再結晶粒が成長中に上記の温度勾配を鋼板に与えることが好ましい。

30

【0283】

また、上記温度勾配を与える方向が圧延直角方向Cであることが好ましい。

【0284】

仕上げ焼鈍工程は、 結晶粒の形状に面内異方性を付与する工程として有効に活用できる。例えば、箱型の焼鈍炉を用い、コイル状の鋼板を炉内に設置して加熱する際に、コイルの外部と内部とに十分な温度差が生じるように、加熱装置の位置や配置、焼鈍炉内の温度分布を制御すればよい。または、誘導加熱、高周波加熱、通電加熱装置などを配置してコイルの一部のみを積極的に加熱することで、焼鈍されるコイル内に温度分布を形成してもよい。

40

【0285】

温度勾配を付与する方法は、特に限定されず、公知の方法を適用すればよい。鋼板に温度勾配を付与すれば、早期に二次再結晶開始状態に到達したコイル内の部位から尖鋭な方位を持つ二次再結晶粒が生成し、この二次再結晶粒が温度勾配に起因して異方性を示して成長する。例えば、二次再結晶粒をコイルの全体にわたり成長させることもできる。そのため、 結晶粒の形状の面内異方性を好ましく制御することが可能となる。

【0286】

コイル状の鋼板を加熱する場合、コイルエッジ部が加熱されやすいことから、幅方向(

50

鋼板の板幅方向)の一端側から他端側に向けて温度勾配を付与して二次再結晶粒を成長させることが好ましい。

【0287】

なお、G o s s 方位へ制御して目的の磁気特性を得ることを考慮すれば、さらには工業的な生産性も考慮すれば、0.5 / cm 超(好ましくは0.7 / cm 以上)の温度勾配を与えながら仕上げ焼鈍を施して二次再結晶粒を成長させればよい。温度勾配を与える方向は、圧延直角方向Cであることが好ましい。温度勾配の上限は特に限定されないが、温度勾配を維持した状態で二次再結晶粒を継続的に成長させることが好ましい。鋼板の熱伝導と二次再結晶粒の成長速度とを考慮すると、一般的な製造プロセスであれば、例えば温度勾配の上限は10 / cm であればよい。

10

【0288】

上記した条件の温度勾配を含む製造方法によって、結晶粒の圧延方向の粒径を、結晶粒の圧延直角方向の粒径よりも小さく制御できる。具体的には、上記した条件の温度勾配を合わせて制御することによって、第4実施形態として記述したように、方向性電磁鋼板にて、粒径 R_{AL} と粒径 R_{AC} とが、 $1.15 R_{AC} \div R_{AL}$ を満たすように制御できる。

【0289】

また、本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍の加熱過程にて、1050 ~ 1100 の保持時間を300 ~ 1200分としてもよい。

【0290】

以下では、上記の製造条件を、条件(F)とする。

(F)仕上げ焼鈍の加熱過程にて、1050 ~ 1100 の温度域での保持時間をTFとしたとき、

TF : 300 ~ 1200分

【0291】

仕上げ焼鈍の加熱過程で1050 までに二次再結晶が完了していない場合には、1050 ~ 1100 の加熱速度を低く(徐加熱)することで、具体的には、TFを300 ~ 1200分とすることで、二次再結晶が高温まで継続して磁束密度が好ましく高まる。例えば、TFは、400分以上であることが好ましく、700分以下であることが好ましい。なお、仕上げ焼鈍の加熱過程で1050 までに二次再結晶が完了している場合には、条件(F)を制御しなくてもよい。例えば、1050 までに二次再結晶が完了している場合には、1050 以上の温度域にて従来よりも昇温速度を速くして仕上げ焼鈍時間を短縮すれば、低コスト化が図れる。

20

30

【0292】

本実施形態に係る製造方法では、仕上げ焼鈍工程にて、上記のように条件(A)、条件(B)、および条件(D)の3つを基本として制御し、必要に応じて、条件(E-1)、条件(E-2)、および温度勾配の条件を組み合わせればよい。例えば、条件(E-1)、条件(E-2)、または/または温度勾配の条件のうちの複数の条件を組み合わせてもよい。また、必要に応じて条件(F)を組み合わせてもよい。

【0293】

本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法は、上記した各工程を有する。本実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法は、方位変化の制御を行った上で、化学組成の制御も行うので、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。

40

【0294】

本実施形態に係る製造方法は、必要に応じて、仕上げ焼鈍工程後に絶縁被膜形成工程をさらに有してもよい。

【0295】

(絶縁被膜形成工程)

絶縁被膜形成工程は、仕上げ焼鈍工程後の方向性電磁鋼板(仕上げ焼鈍鋼板)に絶縁被

50

膜を形成する工程である。仕上げ焼鈍後の鋼板に、りん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜や、アルミナゾルと硼酸とを主体とする絶縁被膜を形成すればよい。

【0296】

例えば、仕上げ焼鈍後の鋼板に、りん酸あるいはりん酸塩、無水クロム酸あるいはクロム酸塩およびコロイド状シリカを含むコーティング溶液を塗布して焼き付けて（例えば、350 ~ 1150 で5 ~ 300秒間）、絶縁被膜を形成すればよい。被膜形成時には、必要に応じて、雰囲気酸化度や露点などを制御すればよい。

【0297】

または、仕上げ焼鈍後の鋼板に、アルミナゾルおよびホウ酸を含むコーティング溶液を塗布して焼き付けて（例えば、750 ~ 1350 で10 ~ 100秒間）、絶縁被膜を形成すればよい。被膜形成時には、必要に応じて、雰囲気酸化度や露点などを制御すればよい。

10

【0298】

また、本実施形態に係る製造方法は、必要に応じて、磁区制御工程をさらに有してもよい。

【0299】

（磁区制御工程）

磁区制御工程は、方向性電磁鋼板の磁区を細分化する処理を行う工程である。例えば、レーザー、プラズマ、機械的方法、エッチングなどの公知の手法により、方向性電磁鋼板に局所的な微小歪または局所的な溝を形成すればよい。このような磁区細分化処理は、本実施形態の効果を損ねない。

20

【0300】

なお、上記の局所的な微小歪及び局所的な溝は、本実施形態で規定する結晶方位及び粒径の測定の際に異常点となる。このため、結晶方位の測定では、測定点が局所的な微小歪及び局所的な溝に重ならないようにする。また、粒径の測定では、局所的な微小歪及び局所的な溝を粒界とは認識しない。

【0301】

（切り替え発生のメカニズムについて）

本実施形態で規定する切り替えは、二次再結晶粒が成長する過程で起きる。この現象は、素材（スラブ）の化学組成、二次再結晶粒の成長に至るまでのインヒビターの造り込み、一次再結晶粒の粒径の制御など、多岐の制御条件に影響される。このため、切り替えは、単に一つの条件を制御すればよいわけではなく、複数の制御条件を複合的に且つ不可分に制御する必要がある。

30

【0302】

切り替えは、隣接する結晶粒の間の粒界エネルギーおよび表面エネルギーに起因して生じると考えられる。

【0303】

上記の粒界エネルギーについては、角度差を有する2つの結晶粒が隣接していると、その粒界エネルギーが大きくなるため、二次再結晶粒が成長する過程で粒界エネルギーを低減するように、つまり特定の同一方位に近づくように切り替えが起きることが考えられる。

40

【0304】

また、上記の表面エネルギーについては、対称性がそれなりに高い{110}面から方位がわずかにでもずれると、表面エネルギーを増大させることになるため、二次再結晶粒が成長する過程で表面エネルギーを低減するように、つまり{110}面方位に近づきずれ角が小さくなるように切り替えが起きることが考えられる。

【0305】

ただし、これらのエネルギー差は、一般的な状況では二次再結晶粒が成長する過程で切り替えを起こしてまで方位変化を生じさせるようなエネルギー差ではない。このため、一般的な状況では角度差またはずれ角を有したままで二次再結晶粒が成長する。例えば、ずれ角は、二次再結晶の初期では、二次再結晶粒の発生時点での方位ばらつきに起因した

50

角度に対応する。このずれ角を有する二次再結晶粒が成長すると、特に圧延方向に曲率を有する状態で二次再結晶粒が成長すると、ずれ角の鋼板面に対する角度は変化していく。すなわち、二次再結晶粒は、発生時点でずれ角が小さくなるように制御されているが、ある程度の大きさまで成長した二次再結晶粒の先端では、ずれ角が不可避免的に大きくなっていく。

【0306】

一方、本実施形態に係る方向性電磁鋼板のように、二次再結晶をより低温から開始させ、かつ二次再結晶粒の成長を高温まで長時間に亘って継続させる場合、切り替えが顕著に起きるようになる。この理由は明確ではないが、二次再結晶粒が成長する過程で、その成長方向の前面部つまり一次再結晶粒に隣接する領域に、比較的高密度で幾何学的な方位のずれを解消するための転位が残存することが考えられる。この残存する転位が、本実施形態の切り替えおよび粒界に対応すると考えられる。

10

【0307】

本実施形態では、二次再結晶が従来よりも低温で開始するため、転位の消滅が遅れ、成長する二次再結晶粒の成長方向前面の粒界に転位が掃き溜められるような形で蓄積して転位密度が増す。このため成長する二次再結晶粒の前面で原子の再配列が起き易くなり、その結果、隣接する二次再結晶粒との角度差を小さくするように、すなわち粒界エネルギーを小さくするように、または表面エネルギーを小さくするように切り替えを起こすものと考えられる。

【0308】

この切り替えは、特別な方位関係を有する粒界（粒界）を二次再結晶粒内に残すこととなる。なお、切り替えが起きる前に、別の二次再結晶粒が発生して、成長中の二次再結晶粒がこの生成した二次再結晶粒に到達すれば、粒成長が止まるため、切り替え自体が起きなくなる。このため、本実施形態では、二次再結晶粒の成長段階で、新たな二次再結晶粒の発生頻度を低くし、インヒビター律速で既存の二次再結晶のみが成長を継続する状態に制御することが有利となる。このため、本実施形態では、二次再結晶開始温度を好ましく低温シフトさせるインヒビターと、比較的高温まで安定なインヒビターとを併用することが好ましい。

20

【0309】

なお、本実施形態にて、ずれ角を主要な方位変化とする切り替えが起きる理由は明確ではないが、以下のように考えている。切り替えがどのような方位変化で起きるかは、切り替えの基本単位とも言える転位の種類（つまり、成長の過程で二次再結晶粒の前面に掃き溜められる転位におけるパーガスベクトルなど）に影響すると考えられる。本実施形態では、ずれ角の制御に関して、二次再結晶過程の初期から中期段階でのインヒビター制御（上記条件（B））の影響が大きい。例えば、950以下または1000以上の温度域の雰囲気によりインヒビター強度が変化すると、切り替えにおけるずれ角の寄与は小さくなる。すなわち、インヒビターの弱化時期が、一次再結晶組織の変化（方位および粒径変化）、掃き溜められる転位の消失、および二次再結晶粒の成長速度に影響し、その結果として、成長する二次再結晶粒内に形成される切り替えの方位（つまり、二次再結晶粒内に取り込まれる転位の種類と量）を変化させると考えている。

30

40

【0310】

なお、本実施形態に係る方向性電磁鋼板は、方位変化の制御を行った上で、化学組成の制御も行うので、低磁場領域での磁歪が改善し、且つ磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下が回避される。

【実施例】

【0311】

次に、実施例により本発明の一態様の効果を更に具体的に詳細に説明するが、実施例での条件は、本発明の実施可能性及び効果を確認するために採用した一条件例であり、本発明は、この一条件例に限定されるものではない。本発明は、本発明の要旨を逸脱せず、本発明の目的を達成する限りにおいて、種々の条件を採用し得るものである。

50

【 0 3 1 2 】

(実施例 1)

表 2 および表 3 に示す化学組成を有するスラブを素材として、表 4 および表 5 に示す化学組成を有する方向性電磁鋼板（珪素鋼板）を製造した。なお、これらの化学組成は、上記の方法に基づいて測定した。表 2～表 5 で、「 - 」は含有量を意識した制御および製造をしておらず、含有量の測定を実施していないことを示す。また、表 2～表 5 で、「 < 」を付記する数値は、含有量を意識した制御および製造を実施して含有量の測定を実施したが、含有量として十分な信頼性を有する測定値が得られなかったこと（測定結果が検出限界以下であること）を示す。

【 0 3 1 3 】

【表 2】

鋼種	スラブ（鋼片）の化学組成（単位：質量％、残部：Feおよび不純物）													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
AA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	-	-	-	-	-	-	
BA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	-	-	-	-	-	
CA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	-	-	-	-	-	
DA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	-	-	-	-	-	
EA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	-	-	-	-	-	
FA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	-	-	-	-	-	
GA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	-	-	-	-	-	
HA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	-	-	-	-	-	
IA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	-	0.005	-	-	-	-	
JA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	0.005	-	-	-	-	
KA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	0.005	-	-	-	-	
LA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	0.005	-	-	-	-	
MA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	0.005	-	-	-	-	
NA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	0.005	-	-	-	-	
OA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	0.005	-	-	-	-	
PA	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	0.005	-	-	-	-	
BB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	-	-	-	-	-	
CB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	-	-	-	-	-	
DB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	-	-	-	-	-	
EB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	-	-	-	-	-	
FB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	-	-	-	-	-	
GB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	-	-	-	-	-	

【 0 3 1 4 】

【表 3】

スラブ(鋼片)の化学組成(単位:質量%, 残部:Feおよび不純物)

鋼種	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W
HB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	—	—	—	—	—
JB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	0.005	—	—	—	—
KB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	0.005	—	—	—	—
LB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	0.005	—	—	—	—
MB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	0.005	—	—	—	—
NB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	0.005	—	—	—	—
OB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	0.005	—	—	—	—
PB	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	0.005	—	—	—	—
BC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	—	—	—	—	—
CC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	—	—	—	—	—
DC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	—	—	—	—	—
EC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	—	—	—	—	—
FC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	—	—	—	—	—
GC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	—	—	—	—	—
HC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	—	—	—	—	—
JC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0010	0.005	—	—	—	—
KC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0020	0.005	—	—	—	—
LC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0050	0.005	—	—	—	—
MC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0100	0.005	—	—	—	—
NC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0150	0.005	—	—	—	—
OC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0190	0.005	—	—	—	—
PC	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.0230	0.005	—	—	—	—

【 0 3 1 5 】

10

20

30

40

50

【表 4】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
AA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	—	—	—	—	—	—	
BA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0003	—	—	—	—	—	
CA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0004	—	—	—	—	—	
DA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	—	—	—	
EA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0025	—	—	—	—	—	
FA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0060	—	—	—	—	—	
GA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0100	—	—	—	—	—	
HA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0140	—	—	—	—	—	
IA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	—	0.003	—	—	—	—	
JA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0003	0.003	—	—	—	—	
KA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0004	0.003	—	—	—	—	
LA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.003	—	—	—	—	
MA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0025	0.003	—	—	—	—	
NA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0060	0.003	—	—	—	—	
OA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0100	0.003	—	—	—	—	
PA	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0140	0.003	—	—	—	—	
BB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0006	—	—	—	—	—	
CB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0009	—	—	—	—	—	
DB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0023	—	—	—	—	—	
EB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0051	—	—	—	—	—	
FB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0090	—	—	—	—	—	
GB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0130	—	—	—	—	—	

【 0 3 1 6 】

10

20

30

40

50

【表 5】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
HB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0180	—	—	—	—	—	
JB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0006	0.003	—	—	—	—	
KB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0009	0.003	—	—	—	—	
LB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0023	0.003	—	—	—	—	
MB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0051	0.003	—	—	—	—	
NB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0090	0.003	—	—	—	—	
OB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0130	0.003	—	—	—	—	
PB	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0180	0.003	—	—	—	—	
BC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0001	—	—	—	—	—	
CC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0002	—	—	—	—	—	
DC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0004	—	—	—	—	—	
EC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0015	—	—	—	—	—	
FC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0030	—	—	—	—	—	
GC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0050	—	—	—	—	—	
HC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0080	—	—	—	—	—	
JC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0001	0.003	—	—	—	—	
KC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0002	0.003	—	—	—	—	
LC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0004	0.003	—	—	—	—	
MC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0015	0.003	—	—	—	—	
NC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0030	0.003	—	—	—	—	
OC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0050	0.003	—	—	—	—	
PC	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.003	0.0080	0.003	—	—	—	—	

【0317】

方向性電磁鋼板は、表6～表17に示す製造条件に基づいて製造した。具体的には、スラブを鑄造し、熱間圧延、熱延板焼鈍、冷間圧延、脱炭焼鈍を実施し、必要に応じて脱炭焼鈍後の鋼板に、水素 - 窒素 - アンモニアの混合雰囲気中で窒化处理（窒化焼鈍）を施した。

【0318】

さらに、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を鋼板に塗布した。なお、表中の「焼鈍分離剤改善の有無」欄に、「あり」と示す試験条件では、MgOパウダー中の塩素量をMnCl₂を添加して0.03～0.04重量部になるように調整し、またSb₂(SO₄)₃を0.3重量部とTiO₂を5重量部添加した焼鈍分離剤を用いた。なお、表中の「焼鈍分離剤改善の有無」欄に、「無」と示す試験条件では、上記添加物を添加しないMgOを主成分とする焼鈍分離剤を用いた。

10

20

30

40

50

【 0 3 1 9 】

焼鈍分離剤を塗布した鋼板に仕上げ焼鈍を施した。仕上げ焼鈍の最終過程では、鋼板を水素雰囲気にて1200 で、表6～表17に示す純化時間で保持（純化焼鈍）して、冷却した。

【 0 3 2 0 】

【表6】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍分離剤改善の有無		仕上げ焼鈍				
		加熱		圧延		焼鈍		板厚	温度	時間	板厚	冷延率	一次再結晶粒径	窒化後N量	PA	PB	TD	TE1	TF	純化時間	
		温度	温度	温度	温度	温度	秒														mm
1	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200			
2	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200			
3	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200			
4	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200			
5	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200			
6	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200			
7	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200			
8	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200			
9	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200			
10	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200			
11	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200			
12	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200			
13	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200			
14	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200			
15	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200			
16	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200			
17	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200			
18	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200			
19	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200			
20	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200			

【 0 3 2 1 】

10

20

30

40

50

【表 7】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍				
		熱間圧延		仕上げ 温度 °C	巻取り 温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB		TD	TEI	TF	純化 時間 分	
		加熱 温度 °C	加熱 温度 °C																	
21	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
22	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200		
23	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200		
24	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200		
25	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
26	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	1200		
27	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200		
28	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200		
29	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
30	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	150	300	1200		
31	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	1200		
32	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	1200		
33	IA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
34	JA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
35	KA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
36	LA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
37	MA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
38	NA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
39	OA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		
40	PA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	1200		

【 0 3 2 2 】

10

20

30

40

50

【表 8】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍		仕上げ焼鈍				
		熱間圧延		仕上げ		板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	分離剤 改善の 有無	PA	PB	TD	TEI	TF	純化 時間 分		
		加熱 温度 °C	巻取り 温度 °C	温度 °C	温度 °C															PA	PB
41	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200			
42	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200			
43	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200			
44	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200			
45	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200			
46	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200			
47	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200			
48	BA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200			
49	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200			
50	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200			
51	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200			
52	CA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200			
53	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200			
54	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200			
55	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200			
56	DA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200			
57	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200			
58	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200			
59	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200			
60	EA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200			

【 0 3 2 3 】

10

20

30

40

50

【表 9】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍				純化 時間	
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C	巻取り 温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm		PA	PB	TD	TE1		TF
61	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
62	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200
63	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200
64	FA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200
65	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
66	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	1200
67	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200
68	GA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200
69	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
70	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	150	300	1200
71	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	1200
72	HA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	1200
73	JA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
74	JA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
75	KA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
76	LA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
77	MA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
78	NA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
79	OA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200
80	PA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	1200

【 0 3 2 4 】

10

20

30

40

50

【表 1 0】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍				純化 時間
		熱間圧延		板厚 mm	温度 ℃	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB		TD	TE1	TF		
		加熱 温度 ℃	仕上げ 温度 ℃														巻取り 温度 ℃	
81	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	300
82	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	300
83	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	300
84	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	300
85	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	300
86	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	300
87	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	300
88	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	300
89	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	300
90	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	300
91	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	300
92	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	300
93	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	300
94	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	300
95	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	300
96	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	300
97	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	300
98	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	300
99	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	300
100	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	300

【 0 3 2 5】

10

20

30

40

50

【表 1 1】

No.	鋼種	製造条件										熱延板焼鈍				冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍		仕上げ焼鈍		焼鈍															
		熱間圧延		仕上げ		巻取り		板厚		温度		時間		板厚		冷延率		一次		窒化後		分		改善の		有無		PA		PB		TD		TEI		TF		純化	
		温度	°C	温度	°C	温度	°C	mm	mm	°C	°C	秒	秒	mm	%	μm	μm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
101	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
102	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	600	300	300	300																				
103	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	360	300	300	300																				
104	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	0.05	420	300	300	300																				
105	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
106	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	600	300	300	300																				
107	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	360	300	300	300																				
108	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	0.05	420	300	300	300																				
109	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
110	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	600	150	300	300																				
111	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	0.01	360	300	300	300																				
112	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	0.05	420	300	300	300																				
113	IA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
114	JB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
115	KB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
116	LB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
117	MB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
118	NB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
119	OB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				
120	PB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	0.05	360	150	300	300																				

【 0 3 2 6】

10

20

30

40

50

【表 1 2】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍		純化 時間	
		加熱 温度	仕上げ 温度	巻取り 温度	板厚	温度	時間	板厚	冷延率	一次 再結晶 粒径	窒化後 N量	PA	PB		TD	TEI		TF
121	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300
122	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300
123	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300
124	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300
125	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300
126	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300
127	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300
128	BB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300
129	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300
130	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300
131	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300
132	CB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300
133	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300
134	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300
135	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300
136	DB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300
137	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300
138	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300
139	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300
140	EB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300

10

20

30

40

【 0 3 2 7】

50

【表 1 3】

No.	鋼種	製造条件										熱延板焼鈍 温度 °C	時間 秒	冷間圧延 板厚 mm	冷延率 %	脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍				
		熱間圧延		一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD	TEI	TF	純化 時間 分												
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C													巻取り 温度 °C	板厚 mm						
141	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
142	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300					
143	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300					
144	FB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300					
145	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
146	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	300					
147	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300					
148	GB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300					
149	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
150	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	150	300	300					
151	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	300					
152	HB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	300					
153	IA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
154	JB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
155	KB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
156	LB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
157	MB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
158	NB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
159	OB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					
160	PB	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	300					

【 0 3 2 8】

10

20

30

40

50

【表 1 4】

No.	鋼種	製造条件										熱延板焼鈍				冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍		純化 時間
		熱間圧延		仕上げ		巻取り		板厚		温度	時間	板厚	冷延率	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD	TEI		TF		
		加熱 温度	圧延 温度	圧延 温度	圧延 温度	温度	温度	°C	°C													°C	
161	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000					
162	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000					
163	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000					
164	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000					
165	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000					
166	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000					
167	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000					
168	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000					
169	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000					
170	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000					
171	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000					
172	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000					
173	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000					
174	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000					
175	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000					
176	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000					
177	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000					
178	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000					
179	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000					
180	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000					

10

20

30

40

【 0 3 2 9】

50

【表 1 5】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍		純化 時間	
		加熱 温度	仕上げ 温度	巻取り 温度	板厚	温度	時間	板厚	冷延率	一次 再結晶 粒径	窒化後 N量	PA	PB		TD	TEI		TF
		°C	°C	°C	mm	°C	秒	mm	%	μm	ppm			分	分	分		
181	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
182	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000
183	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000
184	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000
185	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
186	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	300	300	6000
187	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000
188	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000
189	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
190	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	600	150	300	6000
191	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.01	360	300	300	6000
192	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	無	0.1	0.05	420	300	300	6000
193	IA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
194	JC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
195	KC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
196	LC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
197	MC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
198	NC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
199	OC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000
200	PC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	無	0.2	0.05	360	150	300	6000

【 0 3 3 0】

10

20

30

40

50

【表 1 6】

No.	鋼種	製造条件										熱延板焼鈍 温度 °C	時間 秒	冷間圧延 板厚 mm	冷延率 %	脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍		TD 分	TEI 分	TF 分	純化 時間 分
		熱間圧延		一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB																	
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C					巻取り 温度 °C	板厚 mm															
201	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	6000						
202	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	6000						
203	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	6000						
204	AA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	6000						
205	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	6000						
206	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	6000						
207	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	6000						
208	BC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	6000						
209	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	6000						
210	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	6000						
211	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	6000						
212	CC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	6000						
213	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	6000						
214	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	6000						
215	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	6000						
216	DC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	6000						
217	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	あり	0.2	0.05	360	150	300	6000						
218	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	600	300	300	6000						
219	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.01	360	300	300	6000						
220	EC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	あり	0.1	0.05	420	300	300	6000						

10

20

30

40

【 0 3 3 1】

50

【表 17】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		焼鈍 分離剤 改善の 有無	仕上げ焼鈍		純化 時間
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C	巻取り 温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD		TEI	TF	
221	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
222	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300	6000	
223	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	360	300	300	6000	
224	FC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.05	420	300	300	6000	
225	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
226	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300	6000	
227	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	360	300	300	6000	
228	GC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.05	420	300	300	6000	
229	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
230	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	150	300	6000	
231	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	360	300	300	6000	
232	HC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.05	420	300	300	6000	
233	IA	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
234	JC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
235	KC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
236	LC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
237	MC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
238	NC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
239	OC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	
240	PC	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	6000	

10

20

30

40

【0332】

製造した方向性電磁鋼板（仕上げ焼鈍鋼板）の表面に形成された一次被膜（中間層）の上に、りん酸塩とコロイド状シリカを主体としクロムを含有する絶縁被膜形成用のコーティング溶液を塗布し、水素：窒素が75体積%：25体積%の雰囲気中で加熱して保持し、冷却して、絶縁被膜を形成した。

【0333】

製造した方向性電磁鋼板は、切断方向が板厚方向と平行な切断面を見たとき、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、この中間層上に接して配された絶縁被膜とを有していた。なお、中間層は平均厚さ2μmのフォルステライト被膜であり、絶縁

50

被膜は平均厚さ $1 \mu\text{m}$ のりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。

【0334】

得られた方向性電磁鋼板について、各種特性を評価した。評価結果を表18～表29に示す。

【0335】

(1) 方向性電磁鋼板の結晶方位

方向性電磁鋼板の結晶方位を上記の方法で測定した。この測定した各測定点の結晶方位からずれ角を特定し、このずれ角に基づいて隣接する2つの測定点間に存在する粒界を特定した。なお、表中で示す「BA/BB」とは、「境界条件BAを満足する境界数」を「境界条件BBを満足する境界数」で割った値を意味する。「境界条件BAを満足する境界数」とは、上記した表1のケース1および/またはケース3の粒界に対応し、「境界条件BBを満足する境界数」とは、ケース1および/またはケース2の粒界に対応する。BA/BB値が1.1以上である場合、方向性電磁鋼板に「境界条件BAを満足し且つ境界条件BBを満足しない粒界」が存在すると判断した。また、必要に応じて、特定した粒界に基づいて平均結晶粒径を算出した。加えて、ずれ角の絶対値の標準偏差 ($| \quad |$) を上記の方法で測定した。

10

【0336】

(2) 方向性電磁鋼板の磁気特性

方向性電磁鋼板の磁気特性は、JIS C 2556:2015に規定された単板磁気特性試験法 (SST: Single Sheet Tester) に基づいて測定した。

20

【0337】

磁気特性として、交流周波数: 50 Hz、励磁磁束密度: 1.7 Tの条件で、鋼板の単位重量 (1 kg) あたりの電力損失として定義される鉄損 $W_{17/50}$ (W/kg) を測定した。また、800 A/mで励磁したときの鋼板の圧延方向の磁束密度 B_8 (T) を測定した。なお、 B_8 が 1.920 T以上であるとき、合格と判断した。

【0338】

さらに、磁気特性として、交流周波数: 50 Hz、励磁磁束密度: 1.5 Tの条件下で鋼板に生じる磁歪 $p - p @ 1.5 \text{ T}$ を測定した。具体的には、上記の励磁条件下での試験片 (鋼板) の最大長さ L_{max} および最小長さ L_{min} 、並びに磁束密度 0 Tでの試験片の長さ L_0 を用いて、 $p - p @ 1.5 \text{ T} = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) \div L_0$ により算出した。

30

(3) 方向性電磁鋼板の被膜密着性

方向性電磁鋼板の被膜密着性 (被膜残存面積率) を上記の方法で測定した。なお、被膜残存面積率が 90% 以上であるとき、合格と判断した。

【0339】

40

50

【表 1 8】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg			
				mm	mm		T					
1	AA	1.0	1.01	11.5	11.4	1.97	1.919	0.346	0.872	100	比較例	
2	AA	1.1	1.13	23.9	21.2	1.75	1.918	0.289	0.872	100	比較例	
3	AA	1.2	1.22	22.8	18.7	1.91	1.919	0.267	0.868	100	比較例	
4	AA	1.3	1.26	23.6	18.7	1.69	1.924	0.252	0.864	100	比較例	
5	BA	1.0	1.01	11.5	11.4	1.92	1.924	0.339	0.862	80	比較例	
6	BA	1.1	1.13	23.9	21.2	1.70	1.923	0.282	0.862	95	比較例	
7	BA	1.2	1.22	22.8	18.7	1.86	1.924	0.260	0.858	96	比較例	
8	BA	1.3	1.26	23.6	18.7	1.64	1.929	0.245	0.854	97	比較例	
9	CA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.87	1.929	0.332	0.852	75	比較例	
10	CA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.65	1.928	0.275	0.852	94	比較例	
11	CA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.81	1.929	0.253	0.848	95	比較例	
12	CA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.59	1.934	0.238	0.844	96	比較例	
13	DA	1.0	1.01	14.0	13.9	1.84	1.932	0.329	0.846	70	比較例	
14	DA	1.1	1.13	26.4	23.4	1.62	1.931	0.272	0.846	93	本発明例	
15	DA	1.2	1.22	25.3	20.8	1.78	1.932	0.250	0.842	94	本発明例	
16	DA	1.3	1.26	26.1	20.7	1.56	1.937	0.235	0.838	95	本発明例	
17	EA	1.0	1.01	14.0	13.9	1.84	1.932	0.329	0.846	65	比較例	
18	EA	1.1	1.13	26.4	23.4	1.62	1.931	0.272	0.846	92	本発明例	
19	EA	1.2	1.22	25.3	20.8	1.78	1.932	0.250	0.842	93	本発明例	
20	EA	1.3	1.26	26.1	20.7	1.56	1.937	0.235	0.838	95	本発明例	

【 0 3 4 0】

10

20

30

40

50

【表 19】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界		平均粒径		磁気特性		被膜			
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L	ずれ角 σ ($ \beta $)	B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg		残存 面積率 %
				mm	mm		T				
21	FA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.87	1.929	0.332	0.852	60	比較例
22	FA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.65	1.928	0.275	0.852	91	本発明例
23	FA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.81	1.929	0.253	0.848	92	本発明例
24	FA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.59	1.934	0.238	0.844	93	本発明例
25	GA	1.0	1.01	12.5	12.4	1.92	1.924	0.339	0.862	55	比較例
26	GA	1.1	1.13	24.9	22.1	1.70	1.923	0.282	0.862	90	本発明例
27	GA	1.2	1.22	23.8	19.5	1.86	1.924	0.260	0.858	91	本発明例
28	GA	1.3	1.26	24.6	19.5	1.64	1.929	0.245	0.854	92	本発明例
29	HA	1.0	0.97	10.5	10.9	2.07	1.909	0.360	0.892	50	比較例
30	HA	1.0	1.09	22.9	21.0	1.85	1.908	0.303	0.892	60	比較例
31	HA	1.2	1.18	21.8	18.5	2.01	1.909	0.281	0.888	63	比較例
32	HA	1.2	1.22	22.6	18.5	1.79	1.914	0.266	0.884	70	比較例
33	IA	1.5	1.47	24.4	16.6	1.31	1.944	0.200	0.811	100	比較例
34	JA	1.5	1.47	24.4	16.6	1.26	1.949	0.193	0.801	98	比較例
35	KA	1.5	1.47	26.4	18.0	1.21	1.954	0.186	0.791	97	比較例
36	LA	1.5	1.47	26.9	18.3	1.18	1.957	0.183	0.785	96	本発明例
37	MA	1.5	1.47	26.9	18.3	1.18	1.957	0.183	0.785	96	本発明例
38	NA	1.5	1.47	26.4	18.0	1.21	1.954	0.186	0.791	95	本発明例
39	OA	1.5	1.47	25.4	17.3	1.26	1.949	0.193	0.801	93	本発明例
40	PA	1.4	1.43	23.4	16.4	1.41	1.917	0.225	0.841	75	比較例

【0341】

10

20

30

40

50

【表 2 0】

No.	鋼種	製造結果					評価結果				評価
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T		W17/50 W/kg	
				mm	mm		T				
41	AA	1.0	1.01	11.5	11.4	1.97	1.919	0.346	0.872	100	比較例
42	AA	1.1	1.13	23.9	21.2	1.75	1.918	0.289	0.872	100	比較例
43	AA	1.2	1.22	22.8	18.7	1.91	1.919	0.267	0.868	100	比較例
44	AA	1.3	1.26	23.6	18.7	1.69	1.924	0.252	0.864	100	比較例
45	BA	1.0	1.01	11.5	11.4	1.92	1.924	0.339	0.862	97	比較例
46	BA	1.1	1.13	23.9	21.2	1.70	1.923	0.282	0.862	98	比較例
47	BA	1.2	1.22	22.8	18.7	1.86	1.924	0.260	0.858	98	比較例
48	BA	1.3	1.26	23.6	18.7	1.64	1.929	0.245	0.854	98	比較例
49	CA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.87	1.929	0.332	0.852	95	比較例
50	CA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.65	1.928	0.275	0.852	96	比較例
51	CA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.81	1.929	0.253	0.848	97	比較例
52	CA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.59	1.934	0.238	0.844	98	比較例
53	DA	1.0	1.01	14.0	13.9	1.84	1.932	0.329	0.846	85	比較例
54	DA	1.1	1.13	26.4	23.4	1.62	1.931	0.272	0.846	95	本発明例
55	DA	1.2	1.22	25.3	20.8	1.78	1.932	0.250	0.842	96	本発明例
56	DA	1.3	1.26	26.1	20.7	1.56	1.937	0.235	0.838	97	本発明例
57	EA	1.0	1.01	14.0	13.9	1.84	1.932	0.329	0.846	80	比較例
58	EA	1.1	1.13	26.4	23.4	1.62	1.931	0.272	0.846	94	本発明例
59	EA	1.2	1.22	25.3	20.8	1.78	1.932	0.250	0.842	95	本発明例
60	EA	1.3	1.26	26.1	20.7	1.56	1.937	0.235	0.838	96	本発明例

【 0 3 4 2】

10

20

30

40

50

【表 2 1】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価		
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %			
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm		B8	λ p-p @1.5T			W17/50 W/kg	
61	FA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.87	T	1.929	0.332	0.852	75	比較例
62	FA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.65		1.928	0.275	0.852	92	本発明例
63	FA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.81		1.929	0.253	0.848	94	本発明例
64	FA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.59		1.934	0.238	0.844	95	本発明例
65	GA	1.0	1.01	12.5	12.4	1.92		1.924	0.339	0.862	70	比較例
66	GA	1.1	1.13	24.9	22.1	1.70		1.923	0.282	0.862	91	本発明例
67	GA	1.2	1.22	23.8	19.5	1.86		1.924	0.260	0.858	93	本発明例
68	GA	1.3	1.26	24.6	19.5	1.64		1.929	0.245	0.854	94	本発明例
69	HA	1.0	0.97	10.5	10.9	2.07		1.909	0.360	0.892	60	比較例
70	HA	1.0	1.09	22.9	21.0	1.85		1.908	0.303	0.892	73	比較例
71	HA	1.2	1.18	21.8	18.5	2.01		1.909	0.281	0.888	78	比較例
72	HA	1.2	1.22	22.6	18.5	1.79		1.914	0.266	0.884	80	比較例
73	IA	1.5	1.47	24.4	16.6	1.31		1.944	0.200	0.811	100	比較例
74	JA	1.5	1.47	24.4	16.6	1.26		1.949	0.193	0.801	99	比較例
75	KA	1.5	1.47	26.4	18.0	1.21		1.954	0.186	0.791	98	比較例
76	LA	1.5	1.47	26.9	18.3	1.18		1.957	0.183	0.785	98	本発明例
77	MA	1.5	1.47	26.9	18.3	1.18		1.957	0.183	0.785	97	本発明例
78	NA	1.5	1.47	26.4	18.0	1.21		1.954	0.186	0.791	96	本発明例
79	OA	1.5	1.47	25.4	17.3	1.26		1.949	0.193	0.801	95	本発明例
80	PA	1.4	1.43	23.4	16.4	1.41		1.917	0.225	0.841	85	比較例

【 0 3 4 3】

10

20

30

40

50

【表 2 2】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg	被膜 残存 面積率 %	
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	T				
81	AA	1.0	1.01	10.6	10.6	10.6	1.97	1.919	0.346	0.880	100	比較例
82	AA	1.1	1.13	23.0	23.0	20.4	1.75	1.918	0.289	0.880	100	比較例
83	AA	1.2	1.22	21.9	21.9	18.0	1.91	1.919	0.267	0.876	100	比較例
84	AA	1.3	1.26	22.7	22.7	18.0	1.69	1.924	0.252	0.872	100	比較例
85	BB	1.0	1.01	11.6	11.6	11.5	1.92	1.924	0.339	0.870	88	比較例
86	BB	1.1	1.13	24.0	24.0	21.3	1.70	1.923	0.282	0.870	96	本発明例
87	BB	1.2	1.22	22.9	22.9	18.8	1.86	1.924	0.260	0.866	97	本発明例
88	BB	1.3	1.26	23.7	23.7	18.8	1.64	1.929	0.245	0.862	98	本発明例
89	CB	1.0	1.01	12.6	12.6	12.5	1.87	1.929	0.332	0.860	83	比較例
90	CB	1.1	1.13	25.0	25.0	22.1	1.65	1.928	0.275	0.860	95	本発明例
91	CB	1.2	1.22	23.9	23.9	19.6	1.81	1.929	0.253	0.856	96	本発明例
92	CB	1.3	1.26	24.7	24.7	19.6	1.59	1.934	0.238	0.852	97	本発明例
93	DB	1.0	1.01	13.1	13.1	13.0	1.84	1.932	0.329	0.854	75	比較例
94	DB	1.1	1.13	25.5	25.5	22.6	1.62	1.931	0.272	0.854	94	本発明例
95	DB	1.2	1.22	24.4	24.4	20.0	1.78	1.932	0.250	0.850	95	本発明例
96	DB	1.3	1.26	25.2	25.2	20.0	1.56	1.937	0.235	0.846	96	本発明例
97	EB	1.0	1.01	13.1	13.1	13.0	1.84	1.932	0.329	0.854	70	比較例
98	EB	1.1	1.13	25.5	25.5	22.6	1.62	1.931	0.272	0.854	93	本発明例
99	EB	1.2	1.22	24.4	24.4	20.0	1.78	1.932	0.250	0.850	94	本発明例
100	EB	1.3	1.26	25.2	25.2	20.0	1.56	1.937	0.235	0.846	96	本発明例

【 0 3 4 4】

10

20

30

40

50

【表 2 3】

No.	鋼種	製造結果					評価結果				評価
		粒界 BA/BB	平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %			
			RB _L /RA _L	RB _L mm		RA _L mm	B8		T	λ p-p @1.5T	
101	FB	1.0	1.01	12.6	12.5	1.87	1.929	0.332	0.860	65	比較例
102	FB	1.1	1.13	25.0	22.1	1.65	1.928	0.275	0.860	92	本発明例
103	FB	1.2	1.22	23.9	19.6	1.81	1.929	0.253	0.856	93	本発明例
104	FB	1.3	1.26	24.7	19.6	1.59	1.934	0.238	0.852	94	本発明例
105	GB	1.0	1.01	11.6	11.5	1.92	1.924	0.339	0.870	57	比較例
106	GB	1.1	1.13	24.0	21.3	1.70	1.923	0.282	0.870	70	比較例
107	GB	1.2	1.22	22.9	18.8	1.86	1.924	0.260	0.866	73	比較例
108	GB	1.3	1.26	23.7	18.8	1.64	1.929	0.245	0.862	80	比較例
109	HB	1.0	0.97	9.6	10.0	2.07	1.909	0.360	0.900	52	比較例
110	HB	1.0	1.09	22.0	20.2	1.85	1.908	0.303	0.900	65	比較例
111	HB	1.2	1.18	20.9	17.7	2.01	1.909	0.281	0.896	68	比較例
112	HB	1.2	1.22	21.7	17.8	1.79	1.914	0.266	0.892	75	比較例
113	IA	1.5	1.47	23.5	16.0	1.31	1.944	0.200	0.819	100	比較例
114	JB	1.5	1.47	24.5	16.7	1.26	1.949	0.193	0.809	99	本発明例
115	KB	1.5	1.47	25.5	17.4	1.21	1.954	0.186	0.799	98	本発明例
116	LB	1.5	1.47	26.0	17.7	1.18	1.957	0.183	0.793	97	本発明例
117	MB	1.5	1.47	26.0	17.7	1.18	1.957	0.183	0.793	97	本発明例
118	NB	1.5	1.47	25.5	17.4	1.21	1.954	0.186	0.799	96	本発明例
119	OB	1.5	1.47	24.5	16.7	1.26	1.949	0.193	0.809	83	比較例
120	PB	1.4	1.43	22.5	15.7	1.41	1.917	1.917	1.917	77	比較例

【 0 3 4 5】

10

20

30

40

50

【表 2 4】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価		
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %			
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm		B8	λ p-p @1.5T			W17/50 W/kg	
							T					
121	AA	1.0	1.01	10.6	10.6	10.6	1.97	1.919	0.346	0.880	100	比較例
122	AA	1.1	1.13	23.0	23.0	20.4	1.75	1.918	0.289	0.880	100	比較例
123	AA	1.2	1.22	21.9	21.9	18.0	1.91	1.919	0.267	0.876	100	比較例
124	AA	1.3	1.26	22.7	22.7	18.0	1.69	1.924	0.252	0.872	100	比較例
125	BB	1.0	1.01	11.6	11.6	11.5	1.92	1.924	0.339	0.870	98	比較例
126	BB	1.1	1.13	24.0	24.0	21.3	1.70	1.923	0.282	0.870	99	本発明例
127	BB	1.2	1.22	22.9	22.9	18.8	1.86	1.924	0.260	0.866	99	本発明例
128	BB	1.3	1.26	23.7	23.7	18.8	1.64	1.929	0.245	0.862	99	本発明例
129	CB	1.0	1.01	12.6	12.6	12.5	1.87	1.929	0.332	0.860	96	比較例
130	CB	1.1	1.13	25.0	25.0	22.1	1.65	1.928	0.275	0.860	97	本発明例
131	CB	1.2	1.22	23.9	23.9	19.6	1.81	1.929	0.253	0.856	98	本発明例
132	CB	1.3	1.26	24.7	24.7	19.6	1.59	1.934	0.238	0.852	99	本発明例
133	DB	1.0	1.01	13.1	13.1	13.0	1.84	1.932	0.329	0.854	92	比較例
134	DB	1.1	1.13	25.5	25.5	22.6	1.62	1.931	0.272	0.854	96	本発明例
135	DB	1.2	1.22	24.4	24.4	20.0	1.78	1.932	0.250	0.850	97	本発明例
136	DB	1.3	1.26	25.2	25.2	20.0	1.56	1.937	0.235	0.846	98	本発明例
137	EB	1.0	1.01	13.1	13.1	13.0	1.84	1.932	0.329	0.854	90	比較例
138	EB	1.1	1.13	25.5	25.5	22.6	1.62	1.931	0.272	0.854	95	本発明例
139	EB	1.2	1.22	24.4	24.4	20.0	1.78	1.932	0.250	0.850	96	本発明例
140	EB	1.3	1.26	25.2	25.2	20.0	1.56	1.937	0.235	0.846	97	本発明例

【 0 3 4 6】

10

20

30

40

50

【表 2 5】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg			
141	FB	1.0	1.01	12.6	12.5	1.87	T	0.332	0.860	85	比較例	
142	FB	1.1	1.13	25.0	22.1	1.65		0.275	0.860	93	本発明例	
143	FB	1.2	1.22	23.9	19.6	1.81		0.253	0.856	95	本発明例	
144	FB	1.3	1.26	24.7	19.6	1.59		0.238	0.852	96	本発明例	
145	GB	1.0	1.01	11.6	11.5	1.92		0.339	0.870	75	比較例	
146	GB	1.1	1.13	24.0	21.3	1.70		0.282	0.870	77	比較例	
147	GB	1.2	1.22	22.9	18.8	1.86		0.260	0.866	83	比較例	
148	GB	1.3	1.26	23.7	18.8	1.64		0.245	0.862	85	比較例	
149	HB	1.0	0.97	9.6	10.0	2.07		0.360	0.900	65	比較例	
150	HB	1.0	1.09	22.0	20.2	1.85		0.303	0.900	75	比較例	
151	HB	1.2	1.18	20.9	17.7	2.01		0.281	0.896	80	比較例	
152	HB	1.2	1.22	21.7	17.8	1.79		0.266	0.892	82	比較例	
153	IA	1.5	1.47	23.5	16.0	1.31		0.200	0.819	100	比較例	
154	JB	1.5	1.47	24.5	16.7	1.26		0.193	0.809	99	本発明例	
155	KB	1.5	1.47	25.5	17.4	1.21		0.186	0.799	99	本発明例	
156	LB	1.5	1.47	26.0	17.7	1.18		0.183	0.793	99	本発明例	
157	MB	1.5	1.47	26.0	17.7	1.18		0.183	0.793	98	本発明例	
158	NB	1.5	1.47	25.5	17.4	1.21		0.186	0.799	97	本発明例	
159	OB	1.5	1.47	24.5	16.7	1.26		0.193	0.809	88	比較例	
160	PB	1.4	1.43	22.5	15.7	1.41		1.917	1.917	87	比較例	

【 0 3 4 7】

10

20

30

40

50

【表 2 6】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率			
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T	W/750	%		
				mm	mm		T					
161	AA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.97	1.919	0.346	0.862	100	比較例	
162	AA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.75	1.918	0.289	0.862	100	比較例	
163	AA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.91	1.919	0.267	0.858	100	比較例	
164	AA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.69	1.924	0.252	0.854	100	比較例	
165	BC	1.0	1.01	14.5	14.4	1.92	1.924	0.339	0.852	75	比較例	
166	BC	1.1	1.13	26.9	23.8	1.70	1.923	0.282	0.852	94	比較例	
167	BC	1.2	1.22	25.8	21.2	1.86	1.924	0.260	0.848	95	比較例	
168	BC	1.3	1.26	26.6	21.1	1.64	1.929	0.245	0.844	96	比較例	
169	CC	1.0	1.01	15.5	15.4	1.87	1.929	0.332	0.842	65	比較例	
170	CC	1.1	1.13	27.9	24.7	1.65	1.928	0.275	0.842	93	比較例	
171	CC	1.2	1.22	26.8	22.0	1.81	1.929	0.253	0.838	94	比較例	
172	CC	1.3	1.26	27.6	21.9	1.59	1.934	0.238	0.834	95	比較例	
173	DC	1.0	1.01	16.0	15.9	1.84	1.932	0.329	0.836	60	比較例	
174	DC	1.1	1.13	28.4	25.1	1.62	1.931	0.272	0.836	92	比較例	
175	DC	1.2	1.22	27.3	22.4	1.78	1.932	0.250	0.832	93	比較例	
176	DC	1.3	1.26	28.1	22.3	1.56	1.937	0.235	0.828	94	比較例	
177	EC	1.0	1.01	16.0	15.9	1.84	1.932	0.329	0.836	55	比較例	
178	EC	1.1	1.13	28.4	25.1	1.62	1.931	0.272	0.836	91	本発明例	
179	EC	1.2	1.22	27.3	22.4	1.78	1.932	0.250	0.832	92	本発明例	
180	EC	1.3	1.26	28.1	22.3	1.56	1.937	0.235	0.828	94	本発明例	

【 0 3 4 8】

10

20

30

40

50

【表 2 7】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg	被膜 残存 面積率 %	
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm		B8	T				
181	FC	1.0	1.01	15.4	15.5	18.7	1.87	1.929	0.332	0.842	50	比較例
182	FC	1.1	1.13	24.7	27.9	1.65	1.65	1.928	0.275	0.842	90	本発明例
183	FC	1.2	1.22	22.0	26.8	1.81	1.81	1.929	0.253	0.838	91	本発明例
184	FC	1.3	1.26	21.9	27.6	1.59	1.59	1.934	0.238	0.834	92	本発明例
185	GC	1.0	1.01	14.4	14.5	1.92	1.92	1.924	0.339	0.852	45	比較例
186	GC	1.1	1.13	23.8	26.9	1.70	1.70	1.923	0.282	0.852	90	本発明例
187	GC	1.2	1.22	21.2	25.8	1.86	1.86	1.924	0.260	0.848	91	本発明例
188	GC	1.3	1.26	21.1	26.6	1.64	1.64	1.929	0.245	0.844	92	本発明例
189	HC	1.0	0.97	13.0	12.5	2.07	2.07	1.909	0.360	0.882	40	比較例
190	HC	1.0	1.09	22.9	24.9	1.85	1.85	1.908	0.303	0.882	90	比較例
191	HC	1.2	1.18	20.2	23.8	2.01	2.01	1.909	0.281	0.878	90	比較例
192	HC	1.2	1.22	20.1	24.6	1.79	1.79	1.914	0.266	0.874	90	比較例
193	IA	1.5	1.47	18.0	26.4	1.31	1.31	1.944	0.200	0.801	100	比較例
194	JC	1.5	1.47	18.7	27.4	1.26	1.26	1.949	0.193	0.791	97	比較例
195	KC	1.5	1.47	19.3	28.4	1.21	1.21	1.954	0.186	0.781	96	比較例
196	LC	1.5	1.47	19.7	28.9	1.18	1.18	1.957	0.183	0.775	95	比較例
197	MC	1.5	1.47	19.7	28.9	1.18	1.18	1.957	0.183	0.775	94	本発明例
198	NC	1.5	1.47	19.3	28.4	1.21	1.21	1.954	0.186	0.781	92	本発明例
199	OC	1.5	1.47	18.7	27.4	1.26	1.26	1.949	0.193	0.791	92	本発明例
200	PC	1.4	1.43	17.8	25.4	1.41	1.41	1.917	0.225	0.831	91	比較例

【 0 3 4 9】

10

20

30

40

50

【表 2 8】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg			
				mm	mm	T						
201	AA	1.0	1.01	13.5	13.4	1.97	1.919	0.346	0.862	100	比較例	
202	AA	1.1	1.13	25.9	22.9	1.75	1.918	0.289	0.862	100	比較例	
203	AA	1.2	1.22	24.8	20.4	1.91	1.919	0.267	0.858	100	比較例	
204	AA	1.3	1.26	25.6	20.3	1.69	1.924	0.252	0.854	100	比較例	
205	BC	1.0	1.01	14.5	14.4	1.92	1.924	0.339	0.852	96	比較例	
206	BC	1.1	1.13	26.9	23.8	1.70	1.923	0.282	0.852	97	比較例	
207	BC	1.2	1.22	25.8	21.2	1.86	1.924	0.260	0.848	97	比較例	
208	BC	1.3	1.26	26.6	21.1	1.64	1.929	0.245	0.844	97	比較例	
209	CC	1.0	1.01	15.5	15.4	1.87	1.929	0.332	0.842	94	比較例	
210	CC	1.1	1.13	27.9	24.7	1.65	1.928	0.275	0.842	95	比較例	
211	CC	1.2	1.22	26.8	22.0	1.81	1.929	0.253	0.838	96	比較例	
212	CC	1.3	1.26	27.6	21.9	1.59	1.934	0.238	0.834	97	比較例	
213	DC	1.0	1.01	16.0	15.9	1.84	1.932	0.329	0.836	80	比較例	
214	DC	1.1	1.13	28.4	25.1	1.62	1.931	0.272	0.836	94	比較例	
215	DC	1.2	1.22	27.3	22.4	1.78	1.932	0.250	0.832	95	比較例	
216	DC	1.3	1.26	28.1	22.3	1.56	1.937	0.235	0.828	96	比較例	
217	EC	1.0	1.01	16.0	15.9	1.84	1.932	0.329	0.836	65	比較例	
218	EC	1.1	1.13	28.4	25.1	1.62	1.931	0.272	0.836	93	本発明例	
219	EC	1.2	1.22	27.3	22.4	1.78	1.932	0.250	0.832	94	本発明例	
220	EC	1.3	1.26	28.1	22.3	1.56	1.937	0.235	0.828	95	本発明例	

【 0 3 5 0】

10

20

30

40

50

【表 29】

No.	鋼種	製造結果				平均粒径 RB _L /RA _L	粒界 BA/BB	評価結果			評価
		BA/BB	平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)			磁気特性		被膜 残存 面積率 %	
			RB _L	RA _L				B8	T		
221	FC	1.0	1.01	15.4	15.4	1.87	1.929	0.332	0.842	60	比較例
222	FC	1.1	1.13	27.9	24.7	1.65	1.928	0.275	0.842	91	本発明例
223	FC	1.2	1.22	26.8	22.0	1.81	1.929	0.253	0.838	93	本発明例
224	FC	1.3	1.26	27.6	21.9	1.59	1.934	0.238	0.834	94	本発明例
225	GC	1.0	1.01	14.5	14.4	1.92	1.924	0.339	0.852	55	比較例
226	GC	1.1	1.13	26.9	23.8	1.70	1.923	0.282	0.852	90	本発明例
227	GC	1.2	1.22	25.8	21.2	1.86	1.924	0.260	0.848	92	本発明例
228	GC	1.3	1.26	26.6	21.1	1.64	1.929	0.245	0.844	93	本発明例
229	HC	1.0	0.97	12.5	13.0	2.07	1.909	0.360	0.882	50	比較例
230	HC	1.0	1.09	24.9	22.9	1.85	1.908	0.303	0.882	90	比較例
231	HC	1.2	1.18	23.8	20.2	2.01	1.909	0.281	0.878	91	比較例
232	HC	1.2	1.22	24.6	20.1	1.79	1.914	0.266	0.874	91	比較例
233	IA	1.5	1.47	26.4	18.0	1.31	1.944	0.200	0.801	100	比較例
234	JC	1.5	1.47	27.4	18.7	1.26	1.949	0.193	0.791	98	比較例
235	KC	1.5	1.47	28.4	19.3	1.21	1.954	0.186	0.781	97	比較例
236	LC	1.5	1.47	28.9	19.7	1.18	1.957	0.183	0.775	97	比較例
237	MC	1.5	1.47	28.9	19.7	1.18	1.957	0.183	0.775	96	本発明例
238	NC	1.5	1.47	28.4	19.3	1.21	1.954	0.186	0.781	95	本発明例
239	OC	1.5	1.47	27.4	18.7	1.26	1.949	0.193	0.791	94	本発明例
240	PC	1.4	1.43	25.4	17.8	1.41	1.917	0.225	0.831	92	比較例

【0351】

No. 1 ~ 240では、 $p-p@1.5T$ が0.3以下であるとき、合格と判断した。

【0352】

No. 1 ~ 240のうち、本発明例はいずれも、化学組成を満たし、並びに低磁場磁歪、磁束密度、および被膜密着性に優れた。一方、比較例は、化学組成を満たさないか、または低磁場磁歪、磁束密度、もしくは被膜密着性が十分でなかった。

【0353】

例えば、

No. 1 ~ 12の比較例は、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）のBi含有量が0.0005%未満であり、被膜密着性が低下しやすいという課題がそもそも存在しなかった。

No. 13、17、21、25の比較例は、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）のBi含有量

10

20

30

40

50

を満たしたが、BA / BBが小さいために被膜密着性を満たさなかった。

No. 29 ~ 32の比較例は、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）のBi含有量が0.0100%超であり、Bgを満たさなかった。

なお、すべての比較例について考察しないが、上記と同様の考察ができる。

【0354】

(実施例A)

表1Aに示す化学組成を有するスラブを素材として、表2Aに示す化学組成を有する方向性電磁鋼板（珪素鋼板）を製造した。なお、化学組成の測定方法や、表中での記述方法は上記の実施例1と同じである。

【0355】

【表1A】

鋼種	スラブ(鋼片)の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
A1	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—	
A2	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	0.007	—	—	—	—	
B1	0.070	3.26	0.07	0.025	0.025	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—	
B2	0.070	3.26	0.07	0.025	0.025	0.008	0.07	0.005	0.007	—	—	—	—	
C1	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	
C2	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.001	—	—	—	—	
C3	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.003	—	—	—	—	
C4	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.005	—	—	—	—	
C5	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.010	—	—	—	—	
C6	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.020	—	—	—	—	
C7	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.030	—	—	—	—	
C8	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.050	—	—	—	—	
D1	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.002	—	—	—	—	
D2	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.007	—	—	—	—	
D3	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.007	—	—	—	—	
E	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	0.007	—	—	—	
F	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	0.020	—	—	
G	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.005	—	—	0.003	—	
H	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	—	0.010	—	
I	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	—	—	0.010	
J	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.004	—	0.010	—	—	
K	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.005	0.003	—	0.003	—	
L	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	0.005	—	0.005	—	

【0356】

10

20

30

40

50

【表 2 A】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
A1	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	—	—	—	—	—	
A2	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	0.005	—	—	—	—	
B1	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	—	—	—	—	—	
B2	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	0.005	—	—	—	—	
C1	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	—	—	—	
C2	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	<0.001	—	—	—	—	
C3	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.002	—	—	—	—	
C4	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.003	—	—	—	—	
C5	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.007	—	—	—	—	
C6	0.002	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.018	—	—	—	—	
C7	0.004	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.028	—	—	—	—	
C8	0.006	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.048	—	—	—	—	
D1	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.002	—	—	—	—	
D2	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.006	—	—	—	—	
D3	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	<0.001	—	—	—	—	
E	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	0.006	—	—	—	
F	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	0.020	—	—	
G	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.004	—	—	0.001	—	
H	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	—	0.010	—	
I	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	—	—	0.010	
J	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	0.001	0.003	—	—	
K	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	0.001	—	0.002	—	
L	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	0.003	—	0.004	—	

【0357】

方向性電磁鋼板は、表3A～表7Aに示す製造条件に基づいて製造した。焼鈍分離材は、添加物を添加しないMgOを主成分とする焼鈍分離剤を使用した。仕上げ焼鈍の最終過程では、鋼板を水素雰囲気にて1200で20時間保持(純化焼鈍)して、冷却した。その他の製造条件は上記の実施例1と同じである。

【0358】

10

20

30

40

50

【表 3 A】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		熱間圧延		仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TEI	TF
		加熱温度 °C	圧延														
1001	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.02	0.005	720	180	300	
1002	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	250	0.02	0.005	720	180	300	
1003	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.02	0.005	720	180	300	
1004	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	160	0.02	0.01	720	300	300	
1005	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	720	300	300	
1006	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300	
1007	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	480	300	300	
1008	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	360	300	300	
1009	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	240	300	300	
1010	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	180	300	300	
1011	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	120	300	300	
1012	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	60	300	300	
1013	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.02	420	300	300	
1014	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.05	420	300	300	
1015	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.07	420	300	300	
1016	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.2	0.1	420	300	300	
1017	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.2	0.01	420	300	600	
1018	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.3	0.01	420	300	600	
1019	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.6	0.01	420	300	600	
1020	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	1	0.01	360	300	600	

10

20

30

40

【 0 3 5 9 】

50

【表 4 A】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍				
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TEI	TF
1021	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	2	0.005	360	300	600
1022	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.05	0.005	360	150	600
1023	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.1	0.01	360	300	600
1024	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.05	0.005	300	150	300
1025	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.05	0.005	300	300	300
1026	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.005	300	300	300
1027	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	300	300
1028	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	150	300
1029	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.005	300	150	300
1030	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	150	300
1031	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	300	300
1032	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	600	300
1033	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	900	300
1034	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	1500	300
1035	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.02	0.005	720	150	300
1036	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.02	0.01	720	90	300
1037	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.2	0.005	720	90	300
1038	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.02	0.005	600	90	300
1039	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	190	0.2	0.01	420	300	300
1040	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	160	0.3	0.01	420	300	300

10

20

30

40

【 0 3 6 0 】

50

【表 5 A】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍					
		熱間圧延		仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TEI	TF
		加熱温度 °C	板厚 mm														
1041	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.4	0.01	420	300	300	
1042	D3	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.5	0.03	300	600	300	
1043	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.6	0.01	420	300	300	
1044	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	180	1	0.01	420	600	300	
1045	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	180	2	0.01	420	600	300	
1046	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	2	0.01	420	600	300	
1047	C1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	0.2	0.05	360	150	300	
1048	C2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	210	0.2	0.05	360	150	300	
1049	C3	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	20	210	0.2	0.05	360	150	300	
1050	C4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.2	0.05	360	150	300	
1051	C5	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	210	0.2	0.05	360	150	300	
1052	C6	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	210	0.2	0.05	360	150	300	
1053	C7	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	13	210	0.2	0.05	360	150	300	
1054	C8	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	12	210	0.2	0.05	360	150	300	
1055	D1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.4	0.01	240	150	300	
1056	D2	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.4	0.01	240	150	300	
1057	E	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.4	0.01	240	150	300	
1058	F	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	19	220	0.4	0.01	240	150	300	
1059	G	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.4	0.01	240	150	300	
1060	H	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.4	0.01	240	150	300	

【 0 3 6 1 】

10

20

30

40

50

【表 6 A】

No.	鋼種	製造条件				熱間圧延		熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍																	
		加熱		仕上げ		巻取り		板厚		時間		温度		板厚		冷延率		一次再結晶粒徑		窒化後N量		PA		PB		TD		TEI		TF	
		温度	°C	温度	°C	温度	°C	温度	°C	mm	mm	秒	°C	°C	mm	mm	%	%	μm	ppm	分	分	分	分	分	分	分	分	分	分	
1061	I	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.4	0.01	240	150	300															
1062	J	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.4	0.01	240	150	300															
1063	K	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.4	0.01	240	150	300															
1064	L	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.4	0.01	240	150	300															
1065	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.008	300	150	300															
1066	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.015	300	150	300															
1067	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.015	300	300	300															
1068	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.008	300	300	300															
1069	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.5	0.04	300	300	300															
1070	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.5	0.015	300	900	300															
1071	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.04	300	300	300															
1072	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.015	300	900	300															
1073	A1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.05	0.015	300	900	300															
1074	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.008	300	150	300															
1075	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.015	300	150	300															
1076	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.015	300	150	300															
1077	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.008	300	300	300															
1078	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.5	0.04	300	300	300															
1079	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.5	0.015	300	600	300															
1080	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.04	300	300	300															

【 0 3 6 2 】

10

20

30

40

50

【表 7 A】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒径 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TE1	TF
1081	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.2	0.04	300	600	300
1082	A2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.05	0.015	300	900	300
1083	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.1	0.015	600	300	300
1084	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.1	0.05	600	600	300
1085	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	1	0.05	600	300	300
1086	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	1	0.015	600	300	300
1087	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.4	0.04	600	900	300
1088	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.01	0.015	600	900	300
1089	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	2	0.015	600	90	300
1090	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	2	0.25	600	900	300
1091	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.03	0.015	600	150	300
1092	B1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	2	0.015	600	150	300
1093	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.1	0.015	600	300	300
1094	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.1	0.05	600	600	300
1095	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	2	0.05	600	300	300
1096	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	2	0.015	600	300	300
1097	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.4	0.04	600	900	300
1098	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.01	0.015	600	900	300
1099	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	2	0.015	600	90	300
1100	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.02	0.015	600	150	300
1101	B2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	2	0.015	600	150	300

10

20

30

40

【0363】

製造した方向性電磁鋼板（仕上げ焼鈍鋼板）の表面に、上記の実施例1と同じ絶縁被膜を形成した。

【0364】

製造した方向性電磁鋼板は、切断方向が板厚方向と平行な切断面で見たと、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、この中間層上に接して配された絶縁被膜とを有していた。なお、中間層は平均厚さ2 μmのフォルステライト被膜であり、絶縁被膜は平均厚さ1 μmのりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。

【0365】

50

得られた方向性電磁鋼板について、各種特性を評価した。なお、評価方法は上記の実施例 1 と同じである。評価結果を表 8 A ~ 表 1 2 A に示す。

【 0 3 6 6 】

【 表 8 A 】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界 BA/BB	平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
			RB _L /RA _L	RB _L		RA _L	B8	λ p-p @1.5T			W17/50 W/kg
			mm	mm	T						
1001	C1	0.9	0.87	29.0	33.3	1.87	1.922	0.563	0.865	68	比較例
1002	C1	0.9	0.87	33.0	38.1	1.86	1.931	0.563	0.850	68	比較例
1003	C1	0.9	0.87	38.7	44.5	1.60	1.938	0.555	0.833	68	比較例
1004	C1	0.9	0.93	23.9	25.7	1.91	1.918	0.423	0.873	68	比較例
1005	C1	0.9	0.94	30.6	32.6	1.82	1.929	0.406	0.849	68	比較例
1006	C1	1.1	1.13	26.4	23.4	1.62	1.931	0.272	0.846	93	本発明例
1007	C1	1.2	1.17	26.4	22.5	1.89	1.931	0.258	0.845	94	本発明例
1008	C1	1.2	1.22	25.3	20.8	1.78	1.932	0.250	0.842	94	本発明例
1009	C1	1.2	1.20	26.3	21.8	1.61	1.932	0.250	0.845	94	本発明例
1010	C1	1.2	1.16	25.4	21.9	1.64	1.933	0.257	0.846	94	本発明例
1011	C1	1.1	1.12	27.8	24.8	1.62	1.933	0.272	0.845	93	本発明例
1012	C1	0.9	0.92	31.5	34.1	1.86	1.931	0.405	0.851	68	比較例
1013	C1	1.2	1.25	26.9	21.5	1.56	1.937	0.236	0.837	94	本発明例
1014	C1	1.3	1.26	26.1	20.7	1.56	1.937	0.235	0.838	95	本発明例
1015	C1	1.2	1.17	26.4	22.6	1.75	1.934	0.257	0.844	94	本発明例
1016	C1	1.0	0.98	28.8	29.5	1.86	1.929	0.337	0.853	70	比較例
1017	C1	1.2	1.18	26.0	22.0	1.65	1.937	0.216	0.845	94	本発明例
1018	C1	1.2	1.23	25.9	21.1	1.58	1.940	0.200	0.838	94	本発明例
1019	C1	1.2	1.24	27.4	22.1	1.58	1.941	0.197	0.837	94	本発明例
1020	C1	1.2	1.21	25.3	20.9	1.65	1.938	0.209	0.845	94	本発明例

【 0 3 6 7 】

10

20

30

40

50

【表 9 A】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm		B8	λ p-p @1.5T			W17/50 W/kg
							T				
1021	C1	1.0	0.96	36.1	37.4	1.41	1.947	0.305	0.828	70	比較例
1022	C1	1.0	0.97	34.5	35.4	1.49	1.943	0.308	0.831	70	比較例
1023	C1	1.2	1.19	35.5	29.7	1.37	1.952	0.191	0.814	94	本発明例
1024	D1	1.0	0.97	25.9	26.9	1.88	1.920	0.394	0.841	70	比較例
1025	D1	1.0	0.98	26.6	27.2	1.88	1.920	0.390	0.837	70	比較例
1026	D1	1.0	0.99	28.2	28.4	1.83	1.923	0.374	0.832	70	比較例
1027	D1	1.2	1.21	25.2	20.8	1.89	1.928	0.295	0.823	94	本発明例
1028	D1	1.0	0.98	28.2	28.8	1.83	1.922	0.376	0.834	70	比較例
1029	D1	1.0	0.98	26.3	26.9	1.85	1.922	0.389	0.838	70	比較例
1030	D1	1.0	1.00	27.6	27.6	1.86	1.925	0.376	0.832	70	比較例
1031	D1	1.2	1.22	26.4	21.7	1.83	1.928	0.292	0.822	94	本発明例
1032	D1	1.3	1.31	25.8	19.7	1.56	1.931	0.272	0.817	95	本発明例
1033	D1	1.3	1.31	26.9	20.5	1.57	1.933	0.274	0.817	95	本発明例
1034	D1	1.2	1.22	26.2	21.5	1.84	1.927	0.296	0.824	94	本発明例
1035	D2	0.9	0.90	29.3	32.4	1.76	1.942	0.451	0.824	68	比較例
1036	D2	1.0	0.97	27.0	27.9	1.74	1.946	0.317	0.822	70	比較例
1037	D2	1.0	0.98	27.1	27.6	1.72	1.946	0.318	0.822	70	比較例
1038	D2	1.0	1.01	27.1	26.8	1.81	1.948	0.294	0.820	70	比較例
1039	D2	1.4	1.43	27.6	19.3	1.29	1.955	0.171	0.805	96	本発明例
1040	D2	1.5	1.51	27.7	18.4	1.77	1.954	0.168	0.808	97	本発明例

【 0 3 6 8 】

10

20

30

40

50

【表 10 A】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _L /RA _L	RB _L	RA _L		B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg			
				mm	mm	T						
1041	D2	1.5	1.49	27.3	18.3	1.14	1.964	0.153	0.788	97	本発明例	
1042	D3	1.9	1.89	27.4	14.5	1.04	1.973	0.120	0.773	97	本発明例	
1043	D2	1.5	1.49	26.2	17.6	1.13	1.964	0.156	0.788	97	本発明例	
1044	D2	1.5	1.48	27.7	18.6	1.27	1.958	0.163	0.800	97	本発明例	
1045	D2	1.4	1.35	26.9	19.9	1.78	1.955	0.180	0.805	96	本発明例	
1046	D2	1.4	1.36	26.8	19.8	1.57	1.960	0.179	0.796	96	本発明例	
1047	C1	1.0	1.01	14.0	13.9	1.84	1.932	0.329	0.846	70	比較例	
1048	C2	1.0	0.99	14.7	14.8	1.85	1.932	0.331	0.846	70	比較例	
1049	C3	1.4	1.38	26.2	19.0	1.74	1.943	0.248	0.804	96	本発明例	
1050	C4	1.5	1.48	26.9	18.2	1.18	1.957	0.183	0.785	97	本発明例	
1051	C5	1.5	1.47	26.5	18.0	1.18	1.957	0.186	0.784	97	本発明例	
1052	C6	1.5	1.46	26.6	18.2	1.19	1.959	0.186	0.782	97	本発明例	
1053	C7	1.4	1.39	26.1	18.8	1.73	1.945	0.248	0.815	96	本発明例	
1054	C8	1.0	1.00	14.2	14.2	1.83	1.938	0.283	0.856	70	比較例	
1055	D1	1.0	1.01	15.2	15.1	1.85	1.930	0.332	0.857	70	比較例	
1056	D2	1.5	1.45	27.7	19.0	1.20	1.962	0.162	0.803	97	本発明例	
1057	E	1.4	1.39	26.9	19.4	1.89	1.940	0.291	0.822	96	本発明例	
1058	F	1.4	1.44	27.8	19.2	1.78	1.956	0.218	0.802	96	本発明例	
1059	G	1.4	1.44	26.0	18.1	1.20	1.962	0.161	0.804	96	本発明例	
1060	H	1.4	1.43	27.3	19.0	1.21	1.961	0.164	0.804	96	本発明例	

【0369】

10

20

30

40

50

【表 1 1 A】

No.	鋼種	製造結果				平均粒徑 RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm	ずれ角 σ (β)	評価結果			被膜 残存 面積率 %	評価
		粒界 BA/BB	平均粒徑		磁気特性 B8					λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg			
			RB _L /RA _L	RB _L								T		
1061	I	1.4	1.37	27.6	20.1	1.87	1.936	0.229	0.820	96	本発明例			
1062	J	1.5	1.46	27.6	18.9	1.20	1.961	0.163	0.805	96	本発明例			
1063	K	1.4	1.44	27.1	18.8	1.22	1.961	0.165	0.804	96	本発明例			
1064	L	1.4	1.44	27.3	18.9	1.20	1.961	0.163	0.803	96	本発明例			
1065	A1	1.0	0.99	12.9	13.0	1.84	1.937	0.321	0.854	70	比較例			
1066	A1	1.0	0.99	15.5	15.7	1.79	1.938	0.310	0.847	70	比較例			
1067	A1	1.2	1.20	29.8	24.8	1.77	1.944	0.220	0.841	94	本発明例			
1068	A1	1.0	1.00	13.8	13.9	1.81	1.938	0.309	0.848	70	比較例			
1069	A1	1.4	1.41	44.9	31.9	1.40	1.950	0.180	0.826	96	本発明例			
1070	A1	1.4	1.42	44.9	31.6	1.38	1.951	0.178	0.823	96	本発明例			
1071	A1	1.3	1.32	37.9	28.8	1.43	1.946	0.195	0.832	95	本発明例			
1072	A1	1.3	1.30	37.7	29.0	1.44	1.947	0.198	0.832	95	本発明例			
1073	A1	1.0	1.04	19.6	18.7	1.63	1.941	0.271	0.843	70	比較例			
1074	A2	1.3	1.28	26.2	20.5	1.71	1.962	0.187	0.804	95	本発明例			
1075	A2	1.4	1.37	27.5	20.1	1.14	1.966	0.166	0.795	96	本発明例			
1076	A2	1.4	1.37	27.8	20.2	1.14	1.965	0.165	0.796	96	本発明例			
1077	A2	1.3	1.28	26.6	20.7	1.56	1.964	0.186	0.796	95	本発明例			
1078	A2	1.8	1.75	27.4	15.6	0.97	1.974	0.127	0.776	99	本発明例			
1079	A2	1.7	1.66	26.7	16.1	1.00	1.974	0.133	0.776	98	本発明例			
1080	A2	1.6	1.59	26.3	16.6	1.00	1.972	0.140	0.783	97	本発明例			

【 0 3 7 0】

10

20

30

40

50

【表 1 2 A】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界 BA/BB	平均粒径 RB _L /RA _L	RB _L mm	RA _L mm	ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性 B8	λ p-p @1.5T	W17/50 W/kg		被膜 残存 面積率 %
1081	A2	1.7	1.68	26.9	16.0	0.95	1.974	0.130	0.776	98	本発明例
1082	A2	1.3	1.33	27.8	20.9	1.47	1.966	0.168	0.791	95	本発明例
1083	B1	1.1	1.14	24.7	21.7	1.79	1.941	0.240	0.841	93	本発明例
1084	B1	1.3	1.28	36.3	28.4	1.61	1.949	0.195	0.827	95	本発明例
1085	B1	1.2	1.18	28.9	24.4	1.66	1.944	0.219	0.835	94	本発明例
1086	B1	1.1	1.13	24.3	21.5	1.80	1.942	0.238	0.841	93	本発明例
1087	B1	1.4	1.36	42.0	30.9	1.35	1.954	0.179	0.819	96	本発明例
1088	B1	1.0	1.06	19.5	18.5	1.47	1.941	0.276	0.843	70	比較例
1089	B1	1.0	0.99	12.9	13.1	1.81	1.936	0.322	0.852	70	比較例
1090	B1	1.0	0.97	13.1	13.6	1.79	1.938	0.322	0.847	70	比較例
1091	B1	1.0	0.98	13.5	13.8	1.81	1.936	0.325	0.852	70	比較例
1092	B1	1.0	0.97	14.2	14.6	1.82	1.935	0.326	0.853	70	比較例
1093	B2	1.4	1.37	26.1	19.1	1.07	1.968	0.166	0.792	96	本発明例
1094	B2	1.5	1.52	27.7	18.2	0.98	1.974	0.145	0.779	97	本発明例
1095	B2	1.3	1.34	26.1	19.4	1.58	1.967	0.168	0.790	95	本発明例
1096	B2	1.3	1.33	26.7	20.1	1.75	1.964	0.175	0.797	95	本発明例
1097	B2	1.6	1.62	28.0	17.3	0.91	1.976	0.134	0.772	97	本発明例
1098	B2	1.3	1.33	27.8	20.9	1.07	1.967	0.168	0.792	95	本発明例
1099	B2	1.0	1.08	26.9	24.9	1.67	1.955	0.250	0.813	70	比較例
1100	B2	1.3	1.30	27.5	21.2	1.17	1.962	0.181	0.803	95	本発明例
1101	B2	1.3	1.33	26.0	19.6	1.14	1.965	0.175	0.796	95	本発明例

10

20

30

【0371】

方向性電磁鋼板の特性は、化学組成及び製造法により大きく変化する。そのため、いくつかの特徴のある化学組成および製造法による方向性電磁鋼板ごとに、p-p@1.5Tを評価する。

No. 1001 ~ 1023では、p-p@1.5Tが0.303以下であるとき、合格と判断した。

No. 1024 ~ 1034では、p-p@1.5Tが0.373以下であるとき、合格と判断した。

No. 1035 ~ 1046では、p-p@1.5Tが0.293以下であるとき、合格と判断した。

No. 1047 ~ 1054では、p-p@1.5Tが0.278以下であるとき、合

40

50

格と判断した。

No. 1055 ~ 1064では、 $p - p@1.5 T$ が0.323以下であるとき、合格と判断した。

No. 1065 ~ 1101では、 $p - p@1.5 T$ が0.243以下であるとき、合格と判断した。

【0372】

No. 1001 ~ 1101のうち、本発明例はいずれも、低磁場磁歪、磁束密度、および被膜密着性に優れた。一方、比較例は、低磁場磁歪、磁束密度、または被膜密着性が十分でなかった。

【0373】

(実施例B)

表1Bに示す化学組成を有するスラブを素材として、表2Bに示す化学組成を有する方向性電磁鋼板を製造した。なお、化学組成の測定方法や、表中での記述方法は上記の実施例1と同じである。

【0374】

10

20

30

40

50

【表 1 B】

鋼種	スラブ(鋼片)の化学組成(単位:質量%, 残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
A1	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	0.001	—	—	—	—	
A2	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	0.005	—	—	—	—	
B1	0.070	3.26	0.07	0.025	0.025	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—	
B2	0.070	3.26	0.07	0.025	0.025	0.008	0.07	0.005	0.008	—	—	—	—	
C1	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	—	—	—	—	—	
C2	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.002	—	—	—	—	
C3	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.003	—	—	—	—	
C4	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.005	—	—	—	—	
C5	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.010	—	—	—	—	
C6	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.020	—	—	—	—	
C7	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.030	—	—	—	—	
C8	0.060	3.45	0.10	0.006	0.026	0.008	0.20	0.005	0.050	—	—	—	—	
D1	0.060	3.35	0.10	0.006	0.028	0.008	<0.03	0.005	0.001	—	—	—	—	
D2	0.060	3.35	0.10	0.006	0.028	0.008	<0.03	0.005	0.009	—	—	—	—	
D3	0.060	3.35	0.10	0.006	0.028	0.008	<0.03	0.005	0.009	—	—	—	—	
E	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	—	0.005	—	—	—	
F	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	—	—	0.015	—	—	
G	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	0.005	—	—	0.005	—	
H	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	0.007	—	
I	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	0.015	
J	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	0.010	—	0.010	—	—	
K	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	0.002	0.004	—	0.004	—	
L	0.060	3.35	0.10	0.006	0.027	0.008	<0.03	0.005	—	0.006	—	0.004	—	

【 0 3 7 5 】

10

20

30

40

50

【表 2 B】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	
A1	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	—	—	—	—	—	
A2	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	0.004	—	—	—	—	
B1	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	—	—	—	—	—	
B2	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	0.006	—	—	—	—	
C1	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	—	—	—	
C2	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.001	—	—	—	—	
C3	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	—	—	—	—	
C4	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	—	—	—	—	
C5	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.007	—	—	—	—	
C6	0.002	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.018	—	—	—	—	
C7	0.004	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.028	—	—	—	—	
C8	0.006	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.048	—	—	—	—	
D1	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.001	—	—	—	—	
D2	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.007	—	—	—	—	
D3	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	<0.001	—	—	—	—	
E	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	0.006	—	—	—	
F	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	0.015	—	—	
G	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.004	—	—	0.005	—	
H	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	—	0.010	—	
I	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	—	—	0.015	
J	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.008	—	0.008	—	—	
K	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.001	0.003	—	0.003	—	
L	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	0.004	—	0.003	—	

【0376】

方向性電磁鋼板は、表3B～表7Bに示す製造条件に基づいて製造した。焼鈍分離材は、添加物を添加しないMgOを主成分とする焼鈍分離剤を使用した。仕上げ焼鈍の最終過程では、鋼板を水素雰囲気にて1200で20時間保持(純化焼鈍)して、冷却した。その他の製造条件は上記の実施例1と同じである。

【0377】

10

20

30

40

50

【表 3 B】

No.	鋼種	製造条件				熱間圧延		熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍															
		熱間圧延		仕上げ		巻取り		板厚		時間		温度		冷延率		一次再結晶粒徑		窒化後N量		PA		PB		TD		TE2		TF	
		加熱温度	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	mm	mm	秒	秒	°C	°C	°C	°C	mm	μm	ppm	分	分	分	分	分	分	分	分	分
2001	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.020	0.005	720	180	300													
2002	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	250	0.020	0.005	720	180	300													
2003	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.020	0.005	720	180	300													
2004	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	160	0.200	0.005	720	300	300													
2005	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	720	300	300													
2006	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	600	300	300													
2007	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	480	300	300													
2008	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	360	300	300													
2009	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	240	300	300													
2010	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	180	300	300													
2011	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	120	300	300													
2012	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	60	300	300													
2013	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.300	0.010	420	300	300													
2014	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.600	0.010	420	300	300													
2015	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	420	300	300													
2016	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	2.000	0.010	420	300	300													
2017	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.010	420	300	600													
2018	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.020	420	300	600													
2019	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.050	420	300	600													
2020	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.200	0.070	300	300	600													

10

20

30

40

【 0 3 7 8 】

50

【表 4 B】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		熱間圧延		仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TE2	TF
		加熱温度 °C	圧延														
2021	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.020	0.100	300	300	600	
2022	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.020	0.005	300	180	600	
2023	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	300	0.200	0.070	300	180	600	
2024	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.050	0.005	480	240	300	
2025	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.050	0.005	480	360	300	
2026	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.050	0.015	480	360	300	
2027	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	360	300	
2028	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	240	300	
2029	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.050	0.015	480	240	300	
2030	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	240	300	
2031	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	360	300	
2032	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	600	300	
2033	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	900	300	
2034	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.100	0.015	480	1500	300	
2035	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.020	0.005	720	150	300	
2036	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.020	0.010	720	90	300	
2037	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.200	0.005	720	90	300	
2038	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.020	0.005	600	90	300	
2039	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	180	0.100	0.010	420	300	300	
2040	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	150	0.100	0.020	420	300	300	

10

20

30

40

【表 5 B】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍					
		熱間圧延		仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TE2	TF
		加熱温度 °C	加圧温度 °C														
2041	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.100	0.030	420	300	300	
2042	D3	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.300	0.040	300	600	300	
2043	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.100	0.050	420	300	300	
2044	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	180	0.100	0.070	420	600	300	
2045	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	2.000	0.010	420	600	300	
2046	C1	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	210	0.200	0.030	360	150	300	
2047	C2	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	210	0.200	0.030	360	150	300	
2048	C3	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	20	210	0.200	0.030	360	150	300	
2049	C4	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.200	0.030	360	150	300	
2050	C5	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	210	0.200	0.030	360	150	300	
2051	C6	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	210	0.200	0.030	360	150	300	
2052	C7	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	13	210	0.200	0.030	360	150	300	
2053	C8	1170	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	12	210	0.200	0.030	360	150	300	
2054	D1	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	230	0.300	0.010	240	150	300	
2055	D2	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	230	0.300	0.010	240	150	300	
2056	E	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	230	0.300	0.010	240	150	300	
2057	F	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	19	230	0.300	0.010	240	150	300	
2058	G	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	230	0.300	0.010	240	150	300	
2059	H	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	230	0.300	0.010	240	150	300	
2060	I	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	230	0.300	0.010	240	150	300	

【 0 3 8 0 】

10

20

30

40

50

【表 6 B】

No.	鋼種	製造条件						熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		熱間圧延		仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TE2	TF
		加熱温度 °C	仕上り温度 °C														
2061	J	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	230	0.300	0.010	240	150	300	
2062	K	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	230	0.300	0.010	240	150	300	
2063	L	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	230	0.300	0.010	240	150	300	
2064	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.008	300	150	300	
2065	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.015	300	150	300	
2066	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.015	300	300	300	
2067	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.008	300	300	300	
2068	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.500	0.040	300	300	300	
2069	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.500	0.015	300	900	300	
2070	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.040	300	300	300	
2071	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.200	0.015	300	900	300	
2072	A1	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.050	0.015	300	900	300	
2073	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.008	300	150	300	
2074	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.015	300	150	300	
2075	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.015	300	150	300	
2076	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.008	300	300	300	
2077	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.500	0.040	300	300	300	
2078	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.500	0.015	300	600	300	
2079	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.040	300	300	300	
2080	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.200	0.040	300	600	300	

10

20

30

40

【 0 3 8 1 】

50

【表 7 B】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍			冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒径 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	TE2	TF
2081	A2	1350	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	7	—	0.050	0.015	300	900	300
2082	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.010	600	300	300
2083	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.300	0.010	600	600	300
2084	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.600	0.070	600	300	300
2085	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.070	600	300	300
2086	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.500	0.050	600	900	300
2087	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.008	600	900	300
2088	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.090	600	90	300
2089	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	1.000	0.090	600	900	300
2090	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.005	600	150	300
2091	B1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	10	—	0.200	0.005	600	150	300
2092	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.010	600	300	300
2093	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.300	0.010	600	600	300
2094	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.600	0.070	600	300	300
2095	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.070	600	300	300
2096	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.500	0.050	600	900	300
2097	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.008	600	900	300
2098	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.090	600	90	300
2099	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	1.000	0.090	600	900	300
2100	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.005	600	150	300
2101	B2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	8	—	0.200	0.005	600	150	300

【0382】

製造した方向性電磁鋼板（仕上げ焼鈍鋼板）の表面に、上記の実施例1と同じ絶縁被膜を形成した。

【0383】

製造した方向性電磁鋼板は、切断方向が板厚方向と平行な切断面で見たととき、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、この中間層上に接して配された絶縁被膜とを有していた。なお、中間層は平均厚さ1.5 μmのフォルステライト被膜であり、絶縁被膜は平均厚さ2 μmのりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。

10

20

30

40

50

【 0 3 8 4 】

得られた方向性電磁鋼板について、各種特性を評価した。なお、評価方法は上記の実施例 1 と同じである。評価結果を表 8 B ~ 表 1 2 B に示す。

【 0 3 8 5 】

【表 8 B】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %			
		BA/BB	RB _c /RA _c	RB _c	RA _c		B8	T				
				mm	mm	$\lambda p-p$ @1.5T	W/kg					
2001	C1	0.9	0.89	27.7	31.3	1.91	1.923	0.565	0.865	68	比較例	
2002	C1	0.9	0.87	33.0	37.9	1.84	1.930	0.566	0.850	68	比較例	
2003	C1	0.9	0.86	38.5	44.5	1.78	1.938	0.553	0.833	68	比較例	
2004	C1	0.9	0.89	24.2	27.2	1.93	1.916	0.521	0.876	68	比較例	
2005	C1	0.9	0.92	29.9	32.4	1.86	1.930	0.407	0.850	68	比較例	
2006	C1	1.1	1.12	26.3	23.4	1.65	1.933	0.270	0.845	93	本発明例	
2007	C1	1.2	1.18	25.7	21.8	1.62	1.933	0.258	0.845	94	本発明例	
2008	C1	1.2	1.20	24.9	20.8	1.65	1.932	0.251	0.843	94	本発明例	
2009	C1	1.2	1.20	26.6	22.2	1.65	1.932	0.248	0.844	94	本発明例	
2010	C1	1.2	1.18	26.0	22.1	1.66	1.932	0.259	0.844	94	本発明例	
2011	C1	1.1	1.12	27.2	24.3	1.66	1.932	0.269	0.846	93	本発明例	
2012	C1	0.9	0.94	30.3	32.4	1.83	1.930	0.407	0.850	68	比較例	
2013	C1	1.2	1.22	26.1	21.3	1.57	1.936	0.241	0.836	94	本発明例	
2014	C1	1.2	1.24	27.8	22.4	1.46	1.936	0.240	0.836	94	本発明例	
2015	C1	1.2	1.17	25.9	22.2	1.62	1.934	0.257	0.843	94	本発明例	
2016	C1	1.0	1.04	27.4	26.3	1.86	1.928	0.313	0.851	70	比較例	
2017	C1	1.2	1.17	26.6	22.8	1.64	1.936	0.216	0.843	94	本発明例	
2018	C1	1.3	1.27	27.3	21.5	1.58	1.941	0.194	0.838	95	本発明例	
2019	C1	1.2	1.24	25.8	20.8	1.58	1.942	0.198	0.836	94	本発明例	
2020	C1	1.2	1.22	25.0	20.4	1.63	1.938	0.206	0.845	94	本発明例	

【 0 3 8 6 】

10

20

30

40

50

【表 9 B】

No.	鋼種	製造結果				平均粒徑 RB _c /RA _c	RB _c mm	RA _c mm	ずれ角 σ (β)	評価結果				被膜 残存 面積率 %	評価
		粒界		磁気特性						λp-p @1.5T	W17/50 W/kg	B8	T		
		BA/BB													
2021	C1	1.0	0.98	37.6	37.6	1.75	1.947	0.306	0.826	70	比較例				
2022	C1	1.0	0.97	35.4	36.5	1.78	1.943	0.308	0.832	70	比較例				
2023	C1	1.0	0.99	37.5	37.9	1.76	1.948	0.288	0.822	70	比較例				
2024	D1	1.0	0.97	26.5	27.4	1.88	1.919	0.392	0.840	70	比較例				
2025	D1	1.0	0.97	28.3	29.2	1.86	1.922	0.393	0.836	70	比較例				
2026	D1	1.0	1.04	27.1	26.1	1.76	1.924	0.354	0.831	70	比較例				
2027	D1	1.2	1.18	26.0	22.0	1.66	1.927	0.304	0.825	94	本発明例				
2028	D1	1.0	1.00	29.0	29.1	1.86	1.924	0.378	0.834	70	比較例				
2029	D1	1.0	0.98	26.3	26.8	1.86	1.920	0.389	0.838	70	比較例				
2030	D1	1.0	1.00	28.5	28.5	1.84	1.924	0.375	0.834	70	比較例				
2031	D1	1.2	1.19	26.6	22.4	1.64	1.928	0.300	0.825	94	本発明例				
2032	D1	1.3	1.26	26.4	20.9	1.57	1.931	0.279	0.817	95	本発明例				
2033	D1	1.2	1.24	26.6	21.4	1.59	1.932	0.281	0.818	94	本発明例				
2034	D1	1.2	1.18	24.4	20.6	1.64	1.927	0.302	0.824	94	本発明例				
2035	D2	0.9	0.91	28.7	31.7	1.36	1.944	0.449	0.824	68	比較例				
2036	D2	1.0	0.98	26.6	27.3	1.75	1.947	0.317	0.821	70	比較例				
2037	D2	1.0	0.97	25.3	25.9	1.36	1.948	0.316	0.823	70	比較例				
2038	D2	1.0	1.00	25.5	25.4	1.75	1.947	0.296	0.822	70	比較例				
2039	D2	1.4	1.43	27.5	19.3	1.31	1.955	0.169	0.803	96	本発明例				
2040	D2	1.5	1.52	27.9	18.3	1.33	1.953	0.160	0.807	97	本発明例				

【 0 3 8 7 】

10

20

30

40

50

【表 10 B】

No.	鋼種	製造結果					評価結果				評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RB _C /RA _C	RB _C mm	RA _C mm		B8	T		$\lambda p-p$ @1.5T	
2041	D2	1.5	1.53	26.6	17.3	1.14	1.964	0.150	0.788	97	本発明例
2042	D3	1.9	1.91	27.7	14.5	1.00	1.972	0.121	0.771	100	本発明例
2043	D2	1.5	1.54	27.5	17.9	1.14	1.963	0.154	0.787	97	本発明例
2044	D2	1.5	1.47	26.3	17.8	1.60	1.959	0.164	0.800	97	本発明例
2045	D2	1.3	1.33	27.0	20.2	1.62	1.960	0.177	0.795	95	本発明例
2046	C1	1.0	0.99	14.5	14.7	1.72	1.930	0.329	0.847	70	比較例
2047	C2	1.0	0.99	14.1	14.2	1.73	1.932	0.331	0.847	70	比較例
2048	C3	1.4	1.41	27.8	19.7	1.24	1.944	0.247	0.806	96	本発明例
2049	C4	1.5	1.47	27.0	18.4	1.18	1.959	0.187	0.784	97	本発明例
2050	C5	1.5	1.48	27.9	18.8	1.19	1.959	0.187	0.784	97	本発明例
2051	C6	1.5	1.48	27.6	18.6	1.22	1.959	0.186	0.783	97	本発明例
2052	C7	1.4	1.40	27.7	19.7	1.17	1.945	0.247	0.816	96	本発明例
2053	C8	1.0	1.01	14.0	13.9	1.63	1.937	0.284	0.857	70	比較例
2054	D1	1.0	1.01	15.1	14.9	1.82	1.932	0.330	0.857	70	比較例
2055	D2	1.5	1.46	27.0	18.5	1.18	1.962	0.164	0.802	97	本発明例
2056	E	1.4	1.37	26.3	19.2	1.27	1.939	0.290	0.820	96	本発明例
2057	F	1.5	1.45	27.4	18.8	1.20	1.956	0.214	0.803	97	本発明例
2058	G	1.4	1.44	26.4	18.3	1.20	1.962	0.164	0.804	96	本発明例
2059	H	1.4	1.45	27.8	19.2	1.21	1.960	0.164	0.804	96	本発明例
2060	I	1.4	1.38	26.0	18.9	1.25	1.935	0.231	0.817	96	本発明例

【 0 3 8 8 】

10

20

30

40

50

【表 1 1 B】

No.	鋼種	製造結果					評価結果					評価
		粒界		平均粒徑		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性		$\lambda p-p$ @1.5T	W17/50 W/kg	被膜 残存 面積率 %	
		BA/BB	RB _C /RA _C	RB _C mm	RA _C mm		B8	T				
2061	J	1.5	1.46	26.6	18.3	1.22	1.961	0.165	0.805	97	本発明例	
2062	K	1.4	1.43	27.0	18.8	1.20	1.960	0.162	0.804	96	本発明例	
2063	L	1.5	1.45	26.7	18.4	1.21	1.960	0.165	0.805	97	本発明例	
2064	A1	1.0	0.98	13.2	13.5	1.82	1.937	0.323	0.852	70	比較例	
2065	A1	1.0	0.99	13.8	14.0	1.78	1.939	0.310	0.849	70	比較例	
2066	A1	1.2	1.20	29.7	24.6	1.52	1.944	0.216	0.839	94	本発明例	
2067	A1	1.0	1.00	14.2	14.2	1.59	1.938	0.312	0.848	70	比較例	
2068	A1	1.4	1.40	44.3	31.7	1.40	1.950	0.177	0.823	96	本発明例	
2069	A1	1.4	1.40	46.0	32.9	1.22	1.950	0.176	0.825	96	本発明例	
2070	A1	1.3	1.30	37.6	28.9	1.43	1.946	0.194	0.831	95	本発明例	
2071	A1	1.3	1.31	37.0	28.3	1.31	1.947	0.195	0.831	95	本発明例	
2072	A1	1.0	1.04	20.0	19.2	1.49	1.943	0.274	0.841	70	比較例	
2073	A2	1.3	1.28	26.1	20.3	1.20	1.961	0.190	0.803	95	本発明例	
2074	A2	1.4	1.39	26.6	19.1	1.14	1.965	0.165	0.796	96	本発明例	
2075	A2	1.4	1.38	26.1	18.8	1.15	1.965	0.166	0.795	96	本発明例	
2076	A2	1.3	1.29	26.6	20.6	1.14	1.963	0.186	0.796	95	本発明例	
2077	A2	1.7	1.74	27.3	15.7	0.96	1.975	0.125	0.776	99	本発明例	
2078	A2	1.7	1.66	27.8	16.7	0.99	1.974	0.133	0.777	99	本発明例	
2079	A2	1.6	1.61	28.2	17.6	1.04	1.971	0.137	0.782	98	本発明例	
2080	A2	1.7	1.72	26.7	15.6	0.97	1.974	0.129	0.777	99	本発明例	

【 0 3 8 9 】

10

20

30

40

50

【表 1 2 B】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界		平均粒径		磁気特性		被膜 残存 面積率 %			
		BA/BB	RB _c /RA _c	RB _c	RA _c	σ (β)	λ p - p @1.5T		W17/50 W/kg		
2081	A2	1.3	1.35	27.6	20.4	1.11	1.966	0.169	0.791	95	本発明例
2082	B1	1.1	1.12	25.6	22.9	1.53	1.943	0.237	0.842	93	本発明例
2083	B1	1.3	1.25	33.8	27.0	1.40	1.950	0.202	0.829	95	本発明例
2084	B1	1.2	1.18	28.7	24.4	1.46	1.944	0.224	0.836	94	本発明例
2085	B1	1.1	1.14	25.5	22.4	1.54	1.942	0.237	0.840	93	本発明例
2086	B1	1.4	1.35	42.2	31.2	1.17	1.952	0.182	0.820	96	本発明例
2087	B1	1.0	0.98	14.7	14.9	1.60	1.940	0.310	0.842	70	比較例
2088	B1	1.0	0.97	13.7	14.1	1.81	1.937	0.327	0.853	70	比較例
2089	B1	1.0	1.00	15.2	15.2	1.49	1.942	0.306	0.844	70	比較例
2090	B1	1.0	0.98	14.0	14.3	1.80	1.936	0.324	0.853	70	比較例
2091	B1	1.0	0.97	13.6	14.1	1.81	1.935	0.326	0.853	70	比較例
2092	B2	1.4	1.38	26.0	18.8	1.09	1.967	0.167	0.791	96	本発明例
2093	B2	1.5	1.47	27.0	18.3	0.98	1.973	0.147	0.780	97	本発明例
2094	B2	1.4	1.43	27.7	19.4	1.03	1.971	0.155	0.784	96	本発明例
2095	B2	1.4	1.38	26.6	19.3	1.08	1.968	0.167	0.790	96	本発明例
2096	B2	1.6	1.62	27.8	17.2	0.92	1.976	0.132	0.772	98	本発明例
2097	B2	1.3	1.26	27.6	21.8	1.12	1.966	0.182	0.794	95	本発明例
2098	B2	1.0	1.08	26.8	24.9	1.37	1.955	0.247	0.816	70	比較例
2099	B2	1.3	1.27	26.1	20.5	1.10	1.966	0.183	0.793	95	本発明例
2100	B2	1.3	1.26	26.0	20.7	1.41	1.962	0.188	0.803	95	本発明例
2101	B2	1.3	1.27	26.0	20.5	1.34	1.963	0.183	0.796	95	本発明例

10

20

30

【0 3 9 0】

方向性電磁鋼板の特性は、化学組成及び製造法により大きく変化する。そのため、いくつかの特徴のある化学組成および製造法による方向性電磁鋼板ごとに、 p - p @ 1 . 5 T を評価する。

No . 2 0 0 1 ~ 2 0 2 3 では、 p - p @ 1 . 5 T が 0 . 2 8 3 以下であるとき、合格と判断した。

No . 2 0 2 4 ~ 2 0 3 4 では、 p - p @ 1 . 5 T が 0 . 3 5 3 以下であるとき、合格と判断した。

No . 2 0 3 5 ~ 2 0 4 5 では、 p - p @ 1 . 5 T が 0 . 2 9 3 以下であるとき、合格と判断した。

No . 2 0 4 6 ~ 2 0 5 3 では、 p - p @ 1 . 5 T が 0 . 2 7 8 以下であるとき、合

40

50

格と判断した。

No. 2054 ~ 2063では、 $p - p@1.5 T$ が0.323以下であるとき、合格と判断した。

No. 2064 ~ 2101では、 $p - p@1.5 T$ が0.243以下であるとき、合格と判断した。

【0391】

No. 2001 ~ 2101のうち、本発明例はいずれも、低磁場磁歪、磁束密度、および被膜密着性に優れた。一方、比較例は、低磁場磁歪、磁束密度、または被膜密着性が十分でなかった。

【0392】

(実施例C)

表1Cに示す化学組成を有するスラブを素材として、表2Cに示す化学組成を有する方向性電磁鋼板を製造した。なお、化学組成の測定方法や、表中での記述方法は上記の実施例1と同じである。

【0393】

10

20

30

40

50

【表 1 C】

鋼種	スラブ(鋼片)の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)												
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W
A	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—
B1	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—
B2	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.001	—	—	—	—
B3	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.003	—	—	—	—
B4	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.007	—	—	—	—
B5	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.010	—	—	—	—
B6	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.020	—	—	—	—
B7	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.030	—	—	—	—
C	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.002	—	—	—	—
D	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.005	—	—	—	—
E	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	0.007	—	—	—
F	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	0.020	—	—
G	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.005	—	—	0.003	—
H	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	—	0.010	—
I	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	—	—	—	0.010
J	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.004	—	0.010	—	—
K	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	0.005	0.003	—	0.003	—
L	0.060	3.45	0.10	0.006	0.027	0.008	0.20	0.005	—	0.005	—	0.005	—

【 0 3 9 4 】

10

20

30

40

50

【表 2 C】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)												
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W
A	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.0010	—	—	—	—	—
B1	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	—	—	—	—	—
B2	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	<0.001	—	—	—	—
B3	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.002	—	—	—	—
B4	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.006	—	—	—	—
B5	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.007	—	—	—	—
B6	0.002	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.018	—	—	—	—
B7	0.004	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.0010	0.028	—	—	—	—
C	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.002	—	—	—	—
D	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.004	—	—	—	—
E	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	0.006	—	—	—
F	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	0.020	—	—
G	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.004	—	—	0.001	—
H	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	—	0.010	—
I	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	—	—	—	0.010
J	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	0.001	0.003	—	—
K	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	0.003	0.001	—	0.002	—
L	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.0010	—	0.003	—	0.004	—

【0395】

方向性電磁鋼板は、表 3 C ~ 表 6 C に示す製造条件に基づいて製造した。焼鈍分離材は、添加物を添加しない MgO を主成分とする焼鈍分離剤を使用した。なお、仕上げ焼鈍では、切り替えの発生方向の異方性を制御するため、鋼板の圧延直角方向に温度勾配をつけて熱処理を行った。仕上げ焼鈍の最終過程では、鋼板を水素雰囲気にて 1200 で 20 時間保持(純化焼鈍)して、冷却した。その他の製造条件は上記の実施例 1 と同じである。

【0396】

10

20

30

40

50

【表 3 C】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒徑 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	温度 °C/cm
3001	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.02	0.005	720	0.5
3002	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.005	600	0.5
3003	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.02	0.01	600	0.5
3004	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	720	0.5
3005	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.07	60	0.5
3006	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.1	120	0.5
3007	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	60	0.5
3008	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	0.5
3009	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.02	480	0.5
3010	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.05	300	0.5
3011	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.07	120	0.5
3012	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	2	0.07	120	0.5
3013	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	250	0.1	0.005	600	3.0
3014	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	300	0.02	0.01	600	3.0
3015	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	720	3.0
3016	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.07	60	3.0
3017	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.1	120	3.0
3018	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	60	3.0
3019	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.02	480	3.0
3020	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.05	300	3.0

10

20

30

40

【 0 3 9 7 】

50

【表 4 C】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			温度 勾配 °C/cm
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C	巻取り 温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒徑 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD	
3021	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	1	0.07	120	3.0
3022	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	2	0.07	120	3.0
3023	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	0.3
3024	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	0.5
3025	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	0.7
3026	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	1.0
3027	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.1	0.01	600	3.0
3028	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	0.3
3029	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	0.5
3030	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	0.7
3031	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	1.0
3032	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	2.0
3033	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	3.0
3034	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	5.0
3035	B1	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.5	0.03	300	7.0
3036	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	250	0.1	0.007	600	0.5
3037	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	720	3.0
3038	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	1	0.07	60	3.0
3039	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	250	0.1	0.007	600	3.0
3040	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	300	0.02	0.01	600	3.0

【 0 3 9 8 】

10

20

30

40

50

【表 5 C】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			温度 勾配 °C/cm
		加熱 温度 °C	仕上げ 温度 °C	巻取り 温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次 再結晶 粒徑 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD	
3041	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	1	0.1	180	3.0
3042	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	600	3.0
3043	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	480	3.0
3044	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	360	3.0
3045	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	1	0.07	180	3.0
3046	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	2	0.07	180	3.0
3047	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	600	0.3
3048	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	600	0.5
3049	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	600	0.7
3050	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.1	0.01	600	1.0
3051	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	360	2.0
3052	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	360	3.0
3053	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	360	5.0
3054	B4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	220	0.5	0.04	360	7.0
3055	B2	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	210	0.3	0.03	300	3.0
3056	B3	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	20	210	0.3	0.03	300	3.0
3057	B4	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	210	0.3	0.03	300	3.0
3058	B5	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	210	0.3	0.03	300	3.0
3059	B6	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	210	0.3	0.03	300	3.0
3060	B7	1200	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	13	210	0.3	0.03	300	3.0

【 0 3 9 9 】

10

20

30

40

50

【表 6 C】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍			
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶粒径 μm	窒化後N量 ppm	PA	PB	TD	温度勾配 °C/cm
3061	C	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	24	220	0.3	0.03	300	3.0
3062	D	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.3	0.03	300	3.0
3063	E	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.3	0.03	300	3.0
3064	F	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	19	220	0.3	0.03	300	3.0
3065	G	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.3	0.03	300	3.0
3066	H	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.3	0.03	300	3.0
3067	I	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.3	0.03	300	3.0
3068	J	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	17	220	0.3	0.03	300	3.0
3069	K	1100	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	15	220	0.3	0.03	300	3.0
3070	L	1100	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	15	220	0.3	0.03	300	3.0
3071	A	1400	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	9	—	0.3	0.03	300	3.0

10

20

30

40

【 0 4 0 0 】

製造した方向性電磁鋼板（仕上げ焼鈍鋼板）の表面に、上記の実施例 1 と同じ絶縁被膜を形成した。

【 0 4 0 1 】

製造した方向性電磁鋼板は、切断方向が板厚方向と平行な切断面で見たととき、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、この中間層上に接して配された絶縁被膜とを有していた。なお、中間層は平均厚さ 3 μm のフォルステライト被膜であり、絶縁被膜は平均厚さ 3 μm のりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。

【 0 4 0 2 】

50

得られた方向性電磁鋼板について、各種特性を評価した。なお、評価方法は上記の実施例 1 と同じである。評価結果を表 7 C ~ 表 1 0 C に示す。

【 0 4 0 3 】

ほとんどの方向性電磁鋼板は、温度勾配の方向に結晶粒が延伸し、結晶粒の結晶粒径もこの方向が大きくなった。すなわち、圧延直角方向に結晶粒が延伸していた。ただし、温度勾配が小さかった一部の方向性電磁鋼板では、結晶粒について圧延直角方向の粒径が圧延方向の粒径より小さくなっていった。圧延直角方向の粒径が圧延方向の粒径より小さい場合、表中の「温度勾配方向が不一致」の欄に「*」で示した。

【 0 4 0 4 】

【表 7 C】

No.	鋼種	製造結果										評価結果	評価				
		粒界					平均粒径							ずれ角 σ (β)	磁気特性		被膜 残存 面積率 %
		BA/BB	RA _C	RB _C	RA _L	RB _L	RA _C /RA _L	RB _L /RA _L	RB _C /RA _C	RB _L /RB _L	温度勾配 方向が 不一致				(RB _C ×RA _L) / (RB _L ×RA _C)	B8 $\lambda p-p$ @1.5T	
3001	B1	0.9	31.1	28.5	30.4	27.0	1.02	0.89	0.92	1.05	1.03	1.89	1.925	0.564	0.865	68	比較例
3002	B1	1.0	30.2	28.7	30.3	30.2	1.00	1.00	0.95	0.96	0.96	1.81	1.930	0.338	0.852	70	比較例
3003	B1	1.0	29.1	27.8	29.6	30.4	0.98	1.03	0.96	0.92	0.93	1.85	1.931	0.312	0.851	70	比較例
3004	B1	0.9	33.5	31.1	31.8	29.5	1.05	0.93	0.93	1.05	1.00	1.82	1.932	0.401	0.851	68	比較例
3005	B1	0.9	33.6	30.7	33.4	30.7	1.00	0.92	0.92	1.00	1.00	1.84	1.933	0.402	0.849	68	比較例
3006	B1	1.0	30.2	28.4	29.9	29.4	1.01	0.98	0.94	0.97	0.95	1.84	1.931	0.337	0.851	70	比較例
3007	B1	0.9	33.6	30.7	33.5	30.6	1.00	0.92	0.91	1.00	1.00	1.82	1.932	0.406	0.850	68	比較例
3008	B1	1.1	27.8	27.2	29.9	33.4	0.93	1.12	0.98	0.81	0.88	1.60	1.936	0.268	0.844	93	本発明例
3009	B1	1.3	26.3	27.8	31.2	41.5	0.85	1.33	1.06	0.67	0.79	1.47	1.942	0.244	0.829	95	本発明例
3010	B1	1.4	25.1	27.2	29.5	41.3	0.85	1.40	1.08	0.66	0.77	1.45	1.944	0.234	0.829	96	本発明例
3011	B1	1.1	27.7	27.6	29.9	33.9	0.93	1.13	1.00	0.81	0.88	1.60	1.935	0.267	0.844	93	本発明例
3012	B1	1.0	29.1	27.8	29.7	30.5	0.98	1.02	0.95	0.91	0.93	1.81	1.932	0.312	0.852	70	比較例
3013	B1	1.0	69.3	66.3	34.6	34.4	2.00	0.99	0.96	1.93	0.96	1.79	1.937	0.332	0.838	70	比較例
3014	B1	1.0	118.4	115.7	40.4	41.7	2.93	1.03	0.98	2.78	0.95	1.31	1.947	0.299	0.821	70	比較例
3015	B1	0.9	47.1	43.0	32.0	29.3	1.47	0.92	0.91	1.47	1.00	1.84	1.933	0.404	0.851	68	比較例
3016	B1	0.9	47.0	44.0	32.1	30.1	1.47	0.94	0.94	1.46	1.00	1.83	1.933	0.403	0.849	68	比較例
3017	B1	1.0	48.0	45.0	31.6	31.0	1.52	0.98	0.94	1.45	0.95	1.85	1.931	0.340	0.852	70	比較例
3018	B1	0.9	47.1	42.9	32.0	29.2	1.47	0.91	0.91	1.47	1.00	1.81	1.932	0.405	0.851	68	比較例
3019	B1	3.0	29.2	73.1	15.4	46.4	1.90	3.02	2.50	1.58	0.83	1.29	1.952	0.124	0.810	100	本発明例
3020	B1	3.1	29.6	75.5	15.5	47.4	1.92	3.06	2.55	1.59	0.83	1.27	1.952	0.126	0.811	100	本発明例

10

20

30

40

50

【 0 4 0 5 】

【 表 8 C 】

No.	鋼種	製造結果										評価結果					評価	
		粒界		平均粒徑								磁気特性			被膜 残存 面積率 %			
		BA/BB	RA _c	RB _c	RA _L	RB _L	RA _c /RA _L	RB _L /RA _L	RB _c /RA _c	RB _L /RB _L	温度勾配 方向が 不一致	(RB _c ×RA _L) / (RB _L ×RA _c)	ざれ角 σ (β ₁)	B8 λp-p @1.5T		T		W/kg
3021	B1	2.9	28.1	66.5	15.1	43.6	1.86	2.89	2.37	1.53		0.82	1.62	1.946	0.135	0.822	100	本発明例
3022	B1	1.0	49.1	46.6	29.3	29.9	1.67	1.02	0.95	1.56		0.93	1.81	1.931	0.314	0.853	70	比較例
3023	B1	1.2	20.4	23.8	19.8	24.3	1.03	1.22	1.17	0.98		0.95	1.40	1.936	0.268	0.844	94	本発明例
3024	B1	1.2	20.8	25.5	20.4	25.1	1.02	1.23	1.22	1.02		0.99	1.57	1.935	0.266	0.844	94	本発明例
3025	B1	1.4	23.1	32.2	19.4	25.9	1.19	1.33	1.39	1.24		1.04	1.78	1.936	0.215	0.841	96	本発明例
3026	B1	1.5	24.5	36.3	18.2	27.0	1.34	1.49	1.48	1.34		1.00	1.70	1.939	0.196	0.839	97	本発明例
3027	B1	2.9	28.1	67.1	15.4	45.0	1.82	2.91	2.39	1.49		0.82	1.39	1.947	0.132	0.823	100	本発明例
3028	B1	1.2	20.6	24.8	21.1	26.3	0.98	1.25	1.20	0.94	*	0.97	1.45	1.943	0.235	0.830	94	本発明例
3029	B1	1.4	21.0	27.7	20.0	27.3	1.05	1.37	1.32	1.01		0.96	1.45	1.944	0.238	0.830	96	本発明例
3030	B1	1.6	22.0	36.0	18.2	27.8	1.21	1.53	1.64	1.30		1.07	1.64	1.945	0.199	0.828	98	本発明例
3031	B1	1.8	23.6	41.5	18.8	30.0	1.25	1.60	1.76	1.38		1.10	1.44	1.946	0.183	0.825	100	本発明例
3032	B1	2.2	24.6	53.6	16.5	36.5	1.49	2.21	2.18	1.47		0.99	1.38	1.949	0.147	0.817	100	本発明例
3033	B1	3.1	29.6	75.8	15.5	47.7	1.91	3.08	2.56	1.59		0.83	1.31	1.953	0.122	0.809	100	本発明例
3034	B1	6.1	55.3	236.9	12.8	78.3	4.32	6.11	4.28	3.03		0.70	1.14	1.960	0.089	0.795	100	本発明例
3035	B1	12.4	182.1	428.9	11.2	138.1	16.33	12.38	2.36	3.11		0.19	1.01	1.969	0.061	0.776	100	本発明例
3036	B4	1.3	38.6	39.7	41.8	52.9	0.92	1.27	1.03	0.75	*	0.81	1.08	1.964	0.223	0.788	95	本発明例
3037	B4	1.0	116.8	114.1	39.4	41.3	2.96	1.05	0.98	2.76		0.93	1.70	1.947	0.284	0.820	70	比較例
3038	B4	1.0	116.8	115.7	37.4	39.7	3.13	1.06	0.99	2.92		0.93	1.73	1.948	0.285	0.819	70	比較例
3039	B4	2.9	28.6	69.6	15.5	45.6	1.84	2.94	2.44	1.53		0.83	0.90	1.974	0.103	0.768	100	本発明例
3040	B4	3.0	28.6	70.6	15.4	45.5	1.86	2.95	2.47	1.55		0.84	0.79	1.982	0.098	0.750	100	本発明例

【 0 4 0 6 】

10

20

30

40

50

【表 9 C】

No.	鋼種	製造結果										評価結果					評価
		粒界		平均粒径								μ丸角	磁気特性		被膜 残存 面積率 %		
		BA/BB	RAc	RBc	RAL	RBc	RAL	RBc/RAL	RAc/RAL	RBc/RAL	RAc/RAL		RBc/RAL	RBc/RAc		RBc/RAL	
3041	B4	3.0	28.6	70.0	15.4	45.5	1.85	2.95	2.45	1.54	0.83	1.06	1.968	0.112	0.780	100	本発明例
3042	B4	3.0	28.9	72.8	15.0	45.0	1.93	3.00	2.52	1.62	0.84	1.01	1.969	0.106	0.775	100	本発明例
3043	B4	3.1	30.3	80.5	15.3	47.8	1.99	3.13	2.65	1.68	0.85	0.87	1.975	0.099	0.764	100	本発明例
3044	B4	3.2	30.9	84.0	15.2	48.6	2.03	3.20	2.72	1.73	0.85	0.88	1.976	0.100	0.763	100	本発明例
3045	B4	3.0	28.9	73.1	14.9	45.1	1.94	3.01	2.53	1.62	0.84	1.02	1.971	0.107	0.776	100	本発明例
3046	B4	3.0	28.6	70.9	15.0	44.5	1.91	2.96	2.48	1.59	0.84	1.03	1.966	0.114	0.781	100	本発明例
3047	B4	1.2	20.0	24.8	22.2	25.5	0.90	1.15	1.24	0.97	*	1.08	1.963	0.205	0.789	94	本発明例
3048	B4	1.4	20.9	27.7	19.8	27.0	1.05	1.36	1.33	1.03	0.97	1.12	1.963	0.208	0.789	96	本発明例
3049	B4	1.9	21.4	40.8	18.5	27.9	1.16	1.51	1.91	1.46	1.26	1.60	1.962	0.188	0.791	100	本発明例
3050	B4	1.9	23.9	44.6	18.2	32.7	1.31	1.79	1.86	1.36	1.04	1.11	1.963	0.169	0.788	100	本発明例
3051	B4	4.0	25.8	103.3	16.3	39.3	1.58	2.40	4.00	2.63	1.67	0.93	1.975	0.119	0.766	100	本発明例
3052	B4	7.8	31.0	243.0	15.4	50.4	2.02	3.28	7.83	4.82	2.39	0.85	1.977	0.095	0.760	100	本発明例
3053	B4	6.3	58.7	362.5	12.9	81.7	4.55	6.32	6.17	4.44	0.98	0.72	1.987	0.065	0.742	100	本発明例
3054	B4	12.6	193.0	456.5	11.2	141.9	17.15	12.61	2.38	3.23	0.19	0.56	1.995	0.037	0.726	100	本発明例
3055	B2	3.2	30.6	81.2	15.0	47.5	2.04	3.16	2.66	1.71	0.84	1.23	1.956	0.119	0.804	100	本発明例
3056	B3	3.3	31.5	87.4	15.2	49.5	2.07	3.26	2.77	1.77	0.85	0.97	1.969	0.105	0.774	100	本発明例
3057	B4	3.3	31.6	88.1	15.0	48.9	2.11	3.26	2.79	1.80	0.86	0.83	1.978	0.094	0.759	100	本発明例
3058	B5	3.3	31.6	88.4	15.3	50.1	2.06	3.27	2.80	1.76	0.86	0.84	1.978	0.096	0.760	100	本発明例
3059	B6	3.3	31.6	88.1	15.4	50.1	2.06	3.26	2.79	1.76	0.86	0.84	1.979	0.096	0.760	100	本発明例
3060	B7	3.3	31.5	87.7	15.4	50.2	2.05	3.27	2.78	1.75	0.85	0.98	1.970	0.105	0.775	100	本発明例

【 0 4 0 7 】

10

20

30

40

50

【表 10C】

No.	鋼種	製造結果										評価結果				評価		
		粒界		平均粒径				ずり角				磁気特性		被膜				
		BA/BB	RA _C	RB _C	RA _L	RB _L	RA _C /RA _L	RB _L /RA _L	RB _C /RA _C	RB _L /RA _L	RB _C /RB _L	温度勾配方向が不一致	(RB _C ×RA _L)/(RB _L ×RA _C)	σ (β)	B8	λ p-p @1.5T	W17/50	残存面積率
			mm	mm	mm	mm								T		W/kg	%	
3061	C	3.2	30.6	81.4	15.0	47.4	2.04	3.17	2.66	1.71		0.84	1.24	1.956	0.121	0.805	100	本発明例
3062	D	3.3	31.6	88.4	15.3	49.8	2.07	3.27	2.80	1.77		0.86	0.85	1.978	0.094	0.758	100	本発明例
3063	E	3.3	31.5	87.3	15.0	48.9	2.10	3.26	2.77	1.78		0.85	0.97	1.971	0.104	0.775	100	本発明例
3064	F	3.3	31.6	89.0	15.0	49.2	2.11	3.29	2.82	1.81		0.86	0.87	1.979	0.095	0.757	100	本発明例
3065	G	3.3	31.6	88.5	15.1	49.3	2.10	3.27	2.80	1.80		0.86	0.84	1.979	0.094	0.758	100	本発明例
3066	H	3.3	31.6	88.6	15.3	50.1	2.06	3.27	2.80	1.77		0.86	0.85	1.979	0.093	0.759	100	本発明例
3067	I	3.3	31.5	87.8	15.2	49.8	2.07	3.27	2.79	1.76		0.85	0.98	1.971	0.101	0.776	100	本発明例
3068	J	3.3	31.6	88.6	15.1	49.5	2.09	3.27	2.80	1.79		0.86	0.83	1.977	0.096	0.759	100	本発明例
3069	K	3.3	31.6	88.7	15.1	49.6	2.09	3.28	2.81	1.79		0.86	0.83	1.979	0.095	0.759	100	本発明例
3070	L	3.3	31.6	88.7	14.9	48.8	2.12	3.28	2.81	1.82		0.86	0.87	1.978	0.096	0.758	100	本発明例
3071	A	3.2	29.7	81.7	14.9	47.4	1.99	3.18	2.75	1.72		0.87	1.17	1.960	0.113	0.794	100	本発明例

10

20

30

40

【0408】

No. 3001 ~ 3071では、 p - p@1.5Tが0.283以下であるとき、合格と判断した。

【0409】

No. 3001 ~ 3071のうち、本発明例はいずれも、低磁場磁歪、磁束密度、および被膜密着性に優れた。一方、比較例は、低磁場磁歪、磁束密度、または被膜密着性が十分でなかった。

【0410】

(実施例D)

50

表 1 D に示す化学組成を有するスラブを素材として、表 2 D に示す化学組成を有する方向性電磁鋼板を製造した。なお、化学組成の測定方法や、表中での記述方法は上記の実施例 1 と同じである。

【 0 4 1 1 】

【表 1 D】

鋼種	スラブ(鋼片)の化学組成(単位:質量%、残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	その他
X1	0.070	3.26	0.07	0.005	0.026	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—	Se:0.017
X2	0.070	3.26	0.07	0.025	0.026	0.008	0.07	0.005	—	—	—	—	—	Se:0.021
X3	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	B:0.002
X4	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	P:0.01
X5	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	Ti:0.005
X6	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	Sn:0.05
X7	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	Sb:0.03
X8	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	Cr:0.1
X9	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.007	—	—	—	—	P:0.021 Ti:0.002 Sn:0.060 Cr:0.1 Ni:0.030
X10	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	Ni:0.05
X11	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	—	—	—	—	—	—
X12	0.060	3.45	0.10	0.006	0.028	0.008	0.20	0.005	0.002	—	—	—	—	—
X13	0.060	3.35	0.10	0.006	0.026	0.008	<0.03	0.005	0.010	—	—	—	—	—

【 0 4 1 2 】

10

20

30

40

50

【表 2 D】

鋼種	方向性電磁鋼板の化学組成(単位:質量%,残部:Feおよび不純物)													
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu	Bi	Nb	V	Mo	Ta	W	その他
X1	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.001	—	—	—	—	—	Se:<0.002
X2	0.001	3.15	0.07	<0.002	<0.004	<0.002	0.07	0.001	—	—	—	—	—	Se:<0.002
X3	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	B:0.002
X4	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	P:0.01
X5	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	Ti:0.005
X6	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	Sn:0.05
X7	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	Sb:0.03
X8	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	Cr:0.1
X9	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.001	0.006	—	—	—	—	P:0.021 Ti:0.002 Sn:0.060 Cr:0.1 Ni:0.030
X10	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	Ni:0.05
X11	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	—	—	—	—	—	—
X12	0.001	3.34	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	0.20	0.001	0.002	—	—	—	—	—
X13	0.001	3.30	0.10	<0.002	<0.004	<0.002	<0.03	0.001	0.007	—	—	—	—	—

【0413】

方向性電磁鋼板は、表 3 D に示す製造条件に基づいて製造した。

【0414】

なお、No. 4011 以外では、焼鈍分離剤として、添加物を添加しない MgO を主成分とする焼鈍分離剤を鋼板に塗布し、仕上げ焼鈍を施した。一方、No. 4011 では、焼鈍分離剤として、アルミナを主成分とする焼鈍分離剤を鋼板に塗布し、仕上げ焼鈍を施した。仕上げ焼鈍の最終過程では、鋼板を水素雰囲気にて 1200 で 20 時間保持(純化焼鈍)して、冷却した。その他の製造条件は上記の実施例 1 と同じである。

【0415】

10

20

30

40

50

【表 3 D】

No.	鋼種	製造条件				熱延板焼鈍		冷間圧延		脱炭焼鈍		仕上げ焼鈍				
		加熱温度 °C	仕上げ温度 °C	巻取り温度 °C	板厚 mm	温度 °C	時間 秒	板厚 mm	冷延率 %	一次再結晶 粒径 μm	窒化後 N量 ppm	PA	PB	TD	TEI	TF
4001	X1	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.015	300	300	300
4002	X2	1400	1100	500	2.6	1100	180	0.26	90.0	9	—	0.2	0.015	300	300	300
4003	X3	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4004	X4	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4005	X5	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4006	X6	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4007	X7	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4008	X8	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4009	X9	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4010	X10	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4011	X11	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	22	220	0.1	0.01	600	300	300
4012	X11	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	25	220	0.1	0.01	600	300	300
4013	X11	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	※1	0.01	400	300	300
4014	X12	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	23	220	0.2	0.01	300	300	300
4015	X13	1150	900	550	2.8	1100	180	0.26	90.7	16	210	0.2	0.05	360	150	300

上記の表中で、※1は「700～750°CでPH₂O/PH₂を0.2に設定し、且つ750～800°CでPH₂O/PH₂を0.03に設定した」ことを意味する。

10

20

30

40

【0416】

製造した方向性電磁鋼板（仕上げ焼鈍鋼板）の表面に、上記の実施例1と同じ絶縁被膜を形成した。

【0417】

製造した方向性電磁鋼板は、切断方向が板厚方向と平行な切断面で見たと、方向性電磁鋼板（珪素鋼板）上に接して配された中間層と、この中間層上に接して配された絶縁被膜とを有していた。

【0418】

なお、No. 4011以外の方向性電磁鋼板では、中間層が平均厚さ1.5 μmのフォ

50

ルステライト被膜であり、絶縁被膜が平均厚さ $2\ \mu\text{m}$ のりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。一方、No. 4011 の方向性電磁鋼板では、中間層が平均厚さ $20\ \text{nm}$ の酸化膜 (SiO_2 を主体とする被膜) であり、絶縁被膜が平均厚さ $2\ \mu\text{m}$ のりん酸塩とコロイド状シリカとを主体とする絶縁被膜であった。

【0419】

また、No. 4014 および No. 4015 の方向性電磁鋼板では、絶縁被膜を形成後に、レーザー照射によって、鋼板の圧延面上で圧延方向と交差する方向に延伸するように線状の微小歪を、圧延方向の間隔が $4\ \text{mm}$ になるように付与した。レーザーを付与したことにより、鉄損が低減する効果が得られていることがわかる。

【0420】

得られた方向性電磁鋼板について、各種特性を評価した。なお、評価方法は上記の実施例 1 と同じである。評価結果を表 4 D に示す。

【0421】

10

20

30

40

50

【表 4 D】

No.	鋼種	製造結果				評価結果				評価	
		粒界 BA/BB	平均粒径		ずれ角 σ ($ \beta $)	磁気特性			被膜 残存 面積率 %		
			RB _L /RA _L	RB _L mm		RA _L mm	B8	λ p-p @1.5T			W17/50 W/kg
4001	X1	1.2	1.22	30.0	24.7	1.75	1.946	0.210	0.821	94	本発明例
4002	X2	1.2	1.20	30.1	25.1	1.77	1.945	0.210	0.802	94	本発明例
4003	X3	1.2	1.17	27.0	23.2	1.58	1.932	0.252	0.844	94	本発明例
4004	X4	1.1	1.14	26.7	23.5	1.61	1.931	0.268	0.849	93	本発明例
4005	X5	1.1	1.15	27.2	23.7	1.59	1.933	0.272	0.835	93	本発明例
4006	X6	1.1	1.14	26.5	23.3	1.57	1.931	0.270	0.847	93	本発明例
4007	X7	1.2	1.20	27.3	22.8	1.56	1.936	0.258	0.829	94	本発明例
4008	X8	1.2	1.21	27.4	22.6	1.55	1.938	0.244	0.826	94	本発明例
4009	X9	1.2	1.16	27.3	23.5	1.62	1.927	0.272	0.850	94	本発明例
4010	X10	1.1	1.14	26.8	23.5	1.62	1.931	0.273	0.848	93	本発明例
4011	X11	1.1	1.15	26.6	23.2	1.61	1.933	0.268	0.843	93	本発明例
4012	X11	1.0	0.95	30.8	32.3	1.82	1.926	0.416	0.851	70	比較例
4013	X11	0.9	0.93	30.5	32.7	1.83	1.924	0.420	0.852	68	比較例
4014	X12	1.2	1.21	25.2	20.8	1.89	1.926	0.256	0.765	94	本発明例
4015	X13	1.5	1.47	26.5	18.0	1.18	1.955	0.196	0.725	97	本発明例

【0422】

No. 4001 ~ 4015では、 $p - p @ 1.5 T$ が0.400以下であるとき、磁歪特性が良好であると判断した。

【0423】

No. 4001 ~ 4015のうち、本発明例はいずれも、低磁場磁歪、磁束密度、および被膜密着性に優れた。一方、比較例は、低磁場磁歪、磁束密度、または被膜密着性が十分でなかった。

【産業上の利用可能性】

【0424】

本発明の上記態様によれば、低磁場領域（特に1.5 T程度の磁場）での磁歪を改善した上で、磁束密度が向上すると同時に被膜密着性の低下を回避できる方向性電磁鋼板の提

10

20

30

40

50

供が可能となるので、産業上の利用可能性が高い。

【符号の説明】

【 0 4 2 5 】

- 1 0 方向性電磁鋼板（珪素鋼板）
- 2 0 中間層
- 3 0 絶縁被膜

10

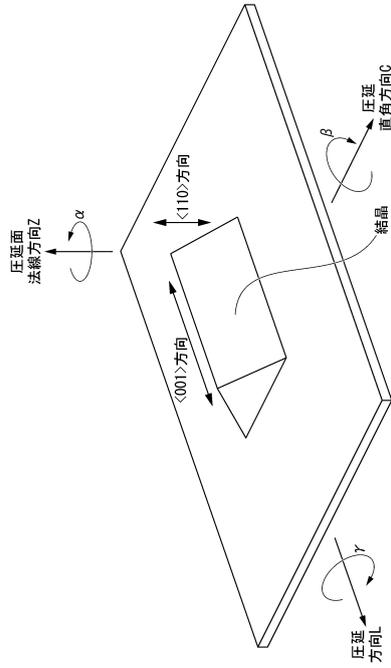
20

30

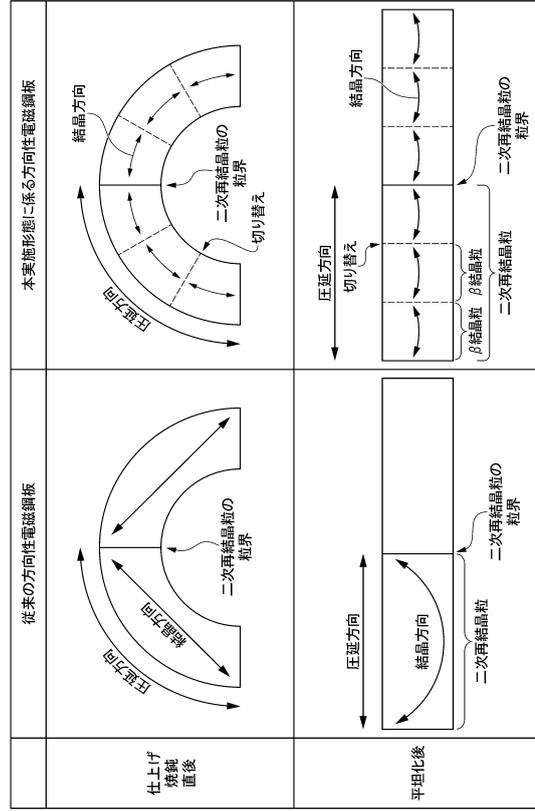
40

50

【図面】
【図 1】



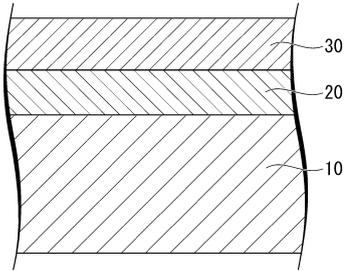
【図 2】



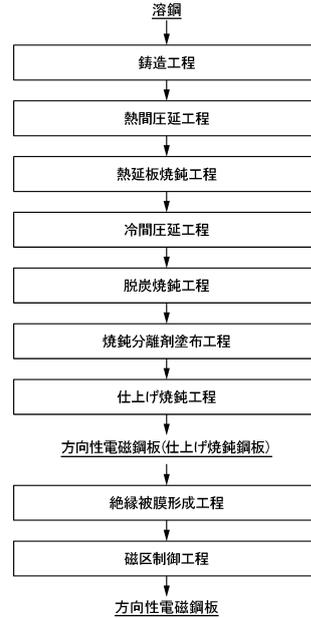
10

20

【図 3】



【図 4】



30

40

50

フロントページの続き

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内

(72)発明者 川村 悠祐

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 日本製鉄株式会社内

審査官 鈴木 葉子

(56)参考文献

特開2001-026847(JP,A)

特開2009-235471(JP,A)

特開2012-087374(JP,A)

特開2018-048377(JP,A)

特開2012-177149(JP,A)

特開2012-077380(JP,A)

特開2007-314826(JP,A)

特開2001-049351(JP,A)

特開平08-288115(JP,A)

中国特許出願公開第105220071(CN,A)

韓国公開特許第10-2013-0014892(KR,A)

(58)調査した分野

(Int.Cl., DB名)

C22C 38/00 - 38/60

C21D 8/12, 9/46

H01F 1/12 - 1/38, 1/44