

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7560795号
(P7560795)

(45)発行日 令和6年10月3日(2024.10.3)

(24)登録日 令和6年9月25日(2024.9.25)

(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 38/14 (2006.01)	C 2 2 C 38/14
C 2 2 C 38/60 (2006.01)	C 2 2 C 38/60
C 2 3 C 22/00 (2006.01)	C 2 3 C 22/00 B
H 0 1 F 1/147(2006.01)	H 0 1 F 1/147 1 8 3
請求項の数 11 (全18頁) 最終頁に続く	

(21)出願番号 特願2023-554591(P2023-554591)	(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
(86)(22)出願日 令和4年10月12日(2022.10.12)	(74)代理人 110002044 弁理士法人プライタス
(86)国際出願番号 PCT/JP2022/038106	(72)発明者 名取 義顕 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
(87)国際公開番号 WO2023/063369	(72)発明者 竹田 和年 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
(87)国際公開日 令和5年4月20日(2023.4.20)	(72)発明者 屋鋪 裕義 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
審査請求日 令和5年9月14日(2023.9.14)	(72)発明者 福地 美菜子
(31)優先権主張番号 特願2021-168280(P2021-168280)	
(32)優先日 令和3年10月13日(2021.10.13)	
(33)優先権主張国・地域又は機関 日本国(JP)	
早期審査対象出願 前置審査	最終頁に続く

(54)【発明の名称】 無方向性電磁鋼板、鉄心およびモータコア、ならびに鉄心およびモータコアの製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

母材鋼板と、前記母材鋼板の表面に形成された絶縁被膜と、を備え、
前記絶縁被膜は無機化合物と有機樹脂との複合皮膜であり、
前記母材鋼板の化学組成が、質量%で、
C : 0 . 0 0 3 0 % 以下、
S i : 3 . 2 ~ 6 . 5 %、
M n : 0 . 0 5 ~ 3 . 5 %、
P : 0 . 0 0 5 ~ 0 . 1 0 %、
S : 0 . 0 0 3 0 % 以下、
A l : 1 . 0 % 以下、
T i : 0 . 0 0 3 0 % 以下、
B : 0 . 0 0 1 0 % 以下、
M o : 0 . 0 3 0 % 以下、
V : 0 . 0 0 1 0 % 以下、
C a : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、
M g : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、
R E M : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、
残部 : F e および不純物であり、
下記 (i) 式を満足し、

前記絶縁被膜の化学組成が、下記 (ii) 式を満足し、
 所定の形状に打ち抜いて積層した後に、750～900 の温度範囲で歪取焼鈍が施される用途に用いられる、
 無方向性電磁鋼板。

$$S - 5 / 3 \times Mg - 4 / 5 \times Ca - 1 / 4 \times REM < 0.0005 \quad \dots (i)$$

$$[M] - [C] + 1 / 2 \times [O] > 0 \quad \dots (ii)$$

但し、上記 (i) 式中の元素記号は、前記母材鋼板中の各元素の含有量 (質量%) を表し、前記絶縁被膜中には、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V および Mo から選択される 1 種類以上の元素を含み、上記 (ii) 式中の [M] は、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V および Mo の合計原子濃度 (at%) を意味し、[C] および [O] は、それぞれ、前記絶縁被膜中に含有される C および O の原子濃度 (at%) を意味する。

10

【請求項 2】

前記母材鋼板の化学組成が、Fe の一部に代えて、質量% で、
 Sn : 0.10% 以下、
 Sb : 0.10% 以下、
 Ni : 0.10% 以下、
 Cr : 0.10% 以下、および
 Cu : 0.10% 以下、から選択される 1 種以上を含有する、
 請求項 1 に記載の無方向性電磁鋼板。

【請求項 3】

前記母材鋼板の板厚が 0.30 mm 未満であり、前記絶縁被膜の膜厚が 1.0 μm 以下である、

請求項 1 に記載の無方向性電磁鋼板。

20

【請求項 4】

前記母材鋼板の板厚が 0.30 mm 未満であり、前記絶縁被膜の膜厚が 1.0 μm 以下である、

請求項 2 に記載の無方向性電磁鋼板。

【請求項 5】

前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 100%、露点 - 30 の雰囲気において、800 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板の母材鋼板中の C 濃度を測定した際に、焼鈍前の前記無方向性電磁鋼板の母材鋼板中の C 濃度からの増加量である C 濃度増加量が 1 ppm 以下である、

30

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【請求項 6】

前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 100%、露点 - 30 の雰囲気において、800 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板を用いて測定される鉄損 W_{10/400} が、11.5 W/kg 未満である、

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

40

【請求項 7】

前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 100%、露点 - 30 の雰囲気において、800 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜中に含まれる炭化物の量が、炭素含有量換算で、10 mg/m² 以上である、

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【請求項 8】

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を含む、
 鉄心。

【請求項 9】

50

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を積層する工程を有する、

鉄心の製造方法。

【請求項 10】

複数の無方向性電磁鋼板が積層された、ロータコアおよびステータコアを含むモータコアであって、

前記無方向性電磁鋼板は、母材鋼板と、前記母材鋼板の表面に形成された絶縁被膜と、を備え、

前記絶縁被膜は無機化合物と有機樹脂との複合皮膜であり、

前記母材鋼板の化学組成が、質量%で、

C : 0 . 0 0 3 0 % 以下、

S i : 3 . 2 ~ 6 . 5 %、

M n : 0 . 0 5 ~ 3 . 5 %、

P : 0 . 0 0 5 ~ 0 . 1 0 %、

S : 0 . 0 0 3 0 % 以下、

A l : 1 . 0 % 以下、

T i : 0 . 0 0 3 0 % 以下、

B : 0 . 0 0 1 0 % 以下、

M o : 0 . 0 3 0 % 以下、

V : 0 . 0 0 1 0 % 以下、

C a : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、

M g : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、

R E M : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %、

残部 : F e および不純物であり、

下記 (i) 式を満足し、

前記ロータコアを構成する前記無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜の化学組成が、下記 (ii) 式を満足し、かつ、

前記ロータコアを構成する前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、 $N_2 : 100\%$ 、露点 - 30 の雰囲気において、800 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜中に含まれる炭化物の量が、炭素含有量換算で、 $10\text{ mg} / \text{m}^2$ 以上であり、

前記ステータコアを構成する前記無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜中に含まれる炭化物の量が、炭素含有量換算で、 $10\text{ mg} / \text{m}^2$ 以上である、

モータコア。

$S - 5 / 3 \times M g - 4 / 5 \times C a - 1 / 4 \times R E M < 0 . 0 0 0 5 \quad \dots (i)$

$[M] - [C] + 1 / 2 \times [O] > 0 \quad \dots (ii)$

子濃度 (a t %) を意味する。

但し、上記 (i) 式中の元素記号は、前記母材鋼板中の各元素の含有量 (質量 %) を表し、前記絶縁被膜中には、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V および Mo から選択される 1 種類以上の元素を含み、上記 (ii) 式中の [M] は、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V および Mo の合計原子濃度 (a t %) を意味し、[C] および [O] は、それぞれ、前記絶縁被膜中に含有される C および O の原子濃度 (a t %) を意味する。

【請求項 11】

請求項 1 から請求項 4 までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板に対して、所定の形状に打ち抜いて積層した後に、750 ~ 900 の温度範囲で歪取焼鈍を施す、

モータコアの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、無方向性電磁鋼板、鉄心およびモータコア、ならびに鉄心およびモータコア

10

20

30

40

50

の製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、地球環境問題が注目されており、省エネルギーへの取り組みに対する要求は、一段と高まってきている。なかでも電気機器の高効率化が強く要望されている。このため、モータまたは発電機等の鉄心材料として広く使用されている無方向性電磁鋼板においても、磁気特性の向上に対する要請がさらに強まっている。

【0003】

電気自動車およびハイブリッド自動車用の駆動モータならびにエアコンのコンプレッサ用モータにおいては、その傾向が顕著である。そのため、これらの各種モータのモータコア用の無方向性電磁鋼板には、さらなる磁気特性の向上、特に低鉄損化が求められている。

10

【0004】

従来、低鉄損化を目的として、Siの含有量の増加、および硫化物の低減が行われてきた（例えば、特許文献1等を参照。）。Siの含有量の増加は、固有抵抗を増加させ渦電流損失を低下させる効果を有する。また、硫化物を低減することで、粒界の移動を阻害する析出物を減らすことで粗粒化を促してヒステリシス損失を低下できる。加えて、打ち抜き歪を除去するための歪取焼鈍による磁気特性の改善も試みられてきた。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】特開2000-54085号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、本発明者らが、高Si化、硫化物の低減、および歪取焼鈍の実施の3つの磁気特性改善策を同時に行ったところ、鉄損の改善量が想定を下回る結果となった。

【0007】

本発明は、このような問題を解決するためになされたものであり、低鉄損の無方向性電磁鋼板を安定的に得ることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

30

【0008】

本発明は、下記の無方向性電磁鋼板、鉄心およびモータコア、ならびに鉄心およびモータコアの製造方法を要旨とする。

【0009】

(1) 母材鋼板と、前記母材鋼板の表面に形成された絶縁被膜と、を備え、前記母材鋼板の化学組成が、質量%で、

C : 0.0030%以下、

Si : 3.2 ~ 6.5%、

Mn : 0.05 ~ 3.5%、

P : 0.005 ~ 0.10%、

40

S : 0.0030%以下、

Al : 1.0%以下、

Ti : 0.0030%以下、

B : 0.0010%以下、

Mo : 0.030%以下、

V : 0.0010%以下、

Ca : 0 ~ 0.0050%、

Mg : 0 ~ 0.0050%、

REM : 0 ~ 0.0050%、

残部 : Feおよび不純物であり、

50

下記 (i) 式を満足し、
前記絶縁被膜の化学組成が、下記 (ii) 式を満足する、
無方向性電磁鋼板。

$$S - 5 / 3 \times M g - 4 / 5 \times C a - 1 / 4 \times R E M < 0 . 0 0 0 5 \quad \cdot \cdot \cdot (i)$$

$$[M] - [C] + 1 / 2 \times [O] > 0 \quad \cdot \cdot \cdot (i i)$$

但し、上記 (i) 式中の元素記号は、前記母材鋼板中の各元素の含有量 (質量 %) を表し、上記 (ii) 式中の [M] は、前記絶縁被膜中に含有される M n、T i、Z r、H f、T a、N b、V、M o および Z n から選択される 1 種類以上の元素の合計原子濃度 (a t %) を意味し、[C] および [O] は、それぞれ、前記絶縁被膜中に含有される C および O の原子濃度 (a t %) を意味する。

10

【 0 0 1 0 】

(2) 前記母材鋼板の化学組成が、F e の一部に代えて、質量 % で、

S n : 0 . 1 0 % 以下、

S b : 0 . 1 0 % 以下、

N i : 0 . 1 0 % 以下、

C r : 0 . 1 0 % 以下、および

C u : 0 . 1 0 % 以下、から選択される 1 種以上を含有する、

上記 (1) に記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 1 】

(3) 前記母材鋼板の板厚が 0 . 3 0 m m 未満であり、前記絶縁被膜の膜厚が 1 . 0 μ m 以下である、

20

上記 (1) または (2) に記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 2 】

(4) 所定の形状に打ち抜いて積層した後に、7 5 0 ~ 9 0 0 の温度範囲で歪取焼鈍が施される用途に用いられる、

上記 (1) から (3) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 3 】

(5) 前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 1 0 0 %、露点 - 3 0 の雰囲気において、8 0 0 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板の母材鋼板中の C 濃度を測定した際に、焼鈍前の前記無方向性電磁鋼板の母材鋼板中の C 濃度からの増加量である C 濃度増加量が 1 p p m 以下である、

30

上記 (1) から (4) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 4 】

(6) 前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 1 0 0 %、露点 - 3 0 の雰囲気において、8 0 0 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板を用いて測定される鉄損 W_{1 0 / 4 0 0} が、1 1 . 5 W / k g 未満である、

上記 (1) から (5) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 5 】

(7) 前記無方向性電磁鋼板を 5 枚積層してから、N₂ : 1 0 0 %、露点 - 3 0 の雰囲気において、8 0 0 で 2 時間保持する焼鈍を施した後、積層した前記 5 枚の無方向性電磁鋼板のうちの積層方向中央の 1 枚の無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜中に含まれる炭化物の量が、炭素含有量換算で、1 0 m g / m² 以上である、

40

上記 (1) から (6) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 6 】

(8) 上記 (1) から (7) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を含む、
鉄心。

【 0 0 1 7 】

(9) 上記 (1) から (7) までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を積層する工程

50

を有する、

鉄心の製造方法。

【0018】

(10) 複数の無方向性電磁鋼板が積層された、ロータコアおよびステータコアを含むモータコアであって、

前記無方向性電磁鋼板は、母材鋼板と、前記母材鋼板の表面に形成された絶縁被膜と、を備え、

前記母材鋼板の化学組成が、質量%で、

C : 0.0030%以下、

Si : 3.2 ~ 6.5%、

Mn : 0.05 ~ 3.5%、

P : 0.005 ~ 0.10%、

S : 0.0030%以下、

Al : 1.0%以下、

Ti : 0.0030%以下、

B : 0.0010%以下、

Mo : 0.030%以下、

V : 0.0010%以下、

Ca : 0 ~ 0.0050%、

Mg : 0 ~ 0.0050%、

REM : 0 ~ 0.0050%、

残部 : Feおよび不純物であり、

下記(i)式を満足し、

前記ロータコアを構成する前記無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜の化学組成が、下記(ii)式を満足し、

前記ステータコアを構成する前記無方向性電磁鋼板における前記絶縁被膜中に含まれる炭化物の量が、炭素含有量換算で、 $10 \text{ mg} / \text{m}^2$ 以上である、

モータコア。

$S - 5 / 3 \times \text{Mg} - 4 / 5 \times \text{Ca} - 1 / 4 \times \text{REM} < 0.0005 \quad \dots (i)$

$[M] - [C] + 1 / 2 \times [O] > 0 \quad \dots (ii)$

但し、上記(i)式中の元素記号は、前記母材鋼板中の各元素の含有量(質量%)を表し、上記(ii)式中の[M]は、前記絶縁被膜中に含有されるMn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素の合計原子濃度(at%)を意味し、[C]および[O]は、それぞれ、前記絶縁被膜中に含有されるCおよびOの原子濃度(at%)を意味する。

【0019】

(11) 上記(1)から(7)までのいずれかに記載の無方向性電磁鋼板に対して、所定の形状に打ち抜いて積層した後に、 $750 \sim 900$ の温度範囲で歪取焼鈍を施す、

モータコアの製造方法。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、低鉄損の無方向性電磁鋼板を安定的に得ることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】 C濃度増加量と鉄損(ヒステリシス損)との関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

本発明者らが上記課題を解決するために検討を行った結果、以下の知見を得るに至った。

【0023】

高Si化、硫化物の低減、および歪取焼鈍の実施の3つの磁気特性改善策を同時に行っ

10

20

30

40

50

た場合に、鉄損が想定されるほど改善しない原因について、まず調査を行った。

【0024】

その結果、複数の無方向性電磁鋼板を積層した後に、高温で歪取焼鈍を施すと、絶縁被膜中の有機樹脂が熱分解し、一部はガスとして放出されるものの、残りの炭素が遊離・残存することが分かった。そして、この残存した炭素が鋼板に侵入して鋼中のSi、Mn、Cr等と反応し、結晶粒界にSiC、MnC、CrC（化学結合比は多種あるため省略）等の炭化物として析出することを発見した。このような反応は、複数の電磁鋼板が積層された状態で加熱されることによって生じやすくなる。これらの炭化物は、磁壁移動を妨げるため、ヒステリシス損を増加させ鉄損が劣化する要因となる。

【0025】

SiC等の炭化物の析出は、鋼中のSi含有量が低い場合には生じない。また、析出物として消費されずに残った、いわゆるフリーSの量が多い場合、絶縁被膜中の炭素が鋼板中へ侵入するのが抑制される。さらに、歪取焼鈍温度が低い場合も、有機樹脂の分解、および炭素の鋼板への侵入が抑制される。すなわち、高Si化、硫化物の低減、および高温での歪取焼鈍の実施の3つ条件が揃った場合に、炭化物の析出による鉄損の劣化が顕在化する。

【0026】

そこで、本発明者らが炭化物の析出による鉄損の劣化を抑制する方法についてさらなる検討を重ねた結果、絶縁被膜中に、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素を含有させることで、絶縁被膜中で遊離・残存した炭素とこれらの元素とが反応して炭化物を形成し、無害化されることを見出した。

【0027】

本発明は上記の知見に基づいてなされたものである。以下、本発明の各要件について詳しく説明する。

【0028】

1. 全体構成

本発明の一実施形態に係る無方向性電磁鋼板は、母材鋼板と、母材鋼板の表面に形成された絶縁被膜と、を備える。以下に、母材鋼板および絶縁被膜の化学組成について説明する。

【0029】

2. 母材鋼板の化学組成

各元素の限定理由は下記のとおりである。なお、以下の説明において含有量についての「%」は、「質量%」を意味する。

【0030】

C：0.0030%以下

Cは、鋼板の高強度化に寄与するが、鉄損劣化を引き起こす元素である。C含有量が0.0030%を超えると、無方向性電磁鋼板において鉄損劣化が生じ、良好な磁気特性を得ることができない。したがって、C含有量は0.0030%以下とする。C含有量は0.0027%以下であるのが好ましく、0.0025%以下であるのがより好ましい。なお、C含有量の過度の低減は、製造コストの上昇を招くため、0.0001%以上とするのが好ましく、0.0005%以上とするのがより好ましい。

【0031】

Si：3.2～6.5%

Siは、鋼の電気抵抗を上昇させて鉄損を改善する元素である。また、Siは、固溶強化能が大きいため、鋼板の高強度化にも有効な元素である。一方、Si含有量が過剰であると、加工性が著しく劣化し、冷間圧延を実施することが困難となるおそれがある。したがって、Si含有量は3.2～6.5%とする。Si含有量は3.3%以上であるのが好ましく、6.0%以下、5.5%以下、5.0%以下、または4.5%以下であるのが好ましい。

【0032】

10

20

30

40

50

Mn : 0.05 ~ 3.5 %

Mnは、鋼の電気抵抗を上昇させて鉄損を改善する元素である。また、Mn含有量が低すぎる場合には、電気抵抗の上昇効果が小さいうえに、微細な硫化物(MnS)が析出することで、仕上焼鈍時の粒成長性が劣化するおそれがある。一方、Mn含有量が過剰であると、磁束密度が低下するおそれがある。したがって、Mn含有量は0.05 ~ 3.5 %とする。Mn含有量は0.10 %以上、または0.20 %以上であるのが好ましく、3.0 %以下、3.0 %未満、2.8 %以下、または2.5 %以下であるのが好ましい。

【0033】

P : 0.005 ~ 0.10 %

Pは、不純物として鋼中に含まれ、その含有量が過剰であると、鋼板の延性が著しく低下するおそれがある。一方、Pは、固溶強化能が高い元素であるので、鋼板の高強度化においては有効な元素である。また、PはCと競合して粒界偏析することで歪取焼鈍後の炭化物形成を抑制する効果もある。したがって、P含有量は0.005 ~ 0.10 %とする。P含有量は0.050 %以下であるのが好ましい。

10

【0034】

S : 0.0030 %以下

Sは、MnSの微細析出物を形成することで鉄損を増加させ、鋼板の磁気特性を劣化させる元素である。したがって、S含有量は0.0030 %以下とする。S含有量は0.0015 %以下であるのが好ましい。S含有量に下限を設ける必要はないが、Sを過度に低減させようとするすると製鋼コストの大幅な増加を招く。そのため、S含有量は0.0005 %以上であるのが好ましい。

20

【0035】

Al : 1.0 %以下

Alは、鋼の電気抵抗を上昇させて鉄損を改善する元素である。しかしながら、Al含有量が過剰であると、磁束密度が低下するおそれがある。したがって、Al含有量は1.0 %以下とする。Al含有量は0.80 %以下であるのが好ましい。上記の効果を得たい場合は、Al含有量は0.0005 %以上であるのが好ましく、0.0010 %超、0.010 %超、または0.10 %以上であるのがより好ましい。なお、本明細書において、Al含有量は、sol. Al (酸可溶Al)の含有量を意味する。

【0036】

Ti : 0.0030 %以下

B : 0.0010 %以下

Mo : 0.030 %以下

V : 0.0010 %以下

Ti、B、MoおよびVは、不可避免的に混入する元素であり、炭素または窒素と結合して析出物(炭化物、窒化物)を形成しうる。炭化物または窒化物が形成された場合には、これらの析出物そのものが磁気特性を劣化させるおそれがある。さらには、仕上焼鈍中の結晶粒の成長を阻害して、磁気特性を劣化させるおそれがある。したがって、Ti含有量は0.0030 %以下、B含有量は0.0010 %以下、Mo含有量は0.030 %以下、V含有量は0.0010 %以下とする。

30

40

【0037】

Ti含有量は0.0020 %以下であるのが好ましく、B含有量は0.0008 %以下であるのが好ましく、Mo含有量は0.020 %以下であるのが好ましく、V含有量は0.0008 %以下であるのが好ましい。なお、これらの元素の含有量に下限は設ける必要はなく、0 %でもよいが、極度の低減は製造コストの増加を招くおそれがある。ため、Ti含有量は0.0005 %以上であるのが好ましく、B含有量は0.0001 %以上であるのが好ましく、Mo含有量は0.005 %以上であるのが好ましく、V含有量は0.0001 %以上であるのが好ましい。

【0038】

Ca : 0 ~ 0.0050 %

50

Mg : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %

REM : 0 ~ 0 . 0 0 5 0 %

Ca、MgおよびREMは、硫化物を形成してSを固定し、鉄損低減に寄与する元素であるため、これらから選択される1種以上を、下記(i)式を満足するよう含有させる。ただし、過剰に含有させると経済性が悪化するおそれがあるため、Ca : 0 . 0 0 5 0 %以下、Mg : 0 . 0 0 5 0 %以下、および、REM : 0 . 0 0 5 0 %以下とする。

$$S - 5 / 3 \times Mg - 4 / 5 \times Ca - 1 / 4 \times REM < 0 . 0 0 0 5 \quad \dots (i)$$

但し、上記(i)式中の元素記号は、母材鋼板中の各元素の含有量(質量%)を表す。

【0039】

Sn : 0 . 1 0 %以下

Sb : 0 . 1 0 %以下

Ni : 0 . 1 0 %以下

Cr : 0 . 1 0 %以下

Cu : 0 . 1 0 %以下

Sn、Sb、Ni、Cr、およびCuは、不可避免的に混入する元素である。しかし、これらの元素は、磁気特性を向上させる元素でもあるため、意図的に含有させてもよい。

【0040】

ただし、過剰に含有させると経済性が悪化するおそれがあるため、意図的に含有させる場合は、いずれの元素の含有量も0 . 1 0 %以下とし、0 . 0 5 %以下とするのが好ましい。なお、磁気特性の向上効果を得たい場合には、Sn : 0 . 0 1 %以上、Sb : 0 . 0 1 %以上、Ni : 0 . 0 1 %以上、Cr : 0 . 0 1 %以上、および、Cu : 0 . 0 1 %以上から選択される1種以上を含有させることが好ましい。

【0041】

本発明の母材鋼板の化学組成において、残部はFeおよび不純物である。ここで「不純物」とは、鋼を工業的に製造する際に、鉱石、スクラップ等の原料、製造工程の種々の要因によって混入する成分であって、本発明に悪影響を与えない範囲で許容されるものを意味する。

【0042】

3 . 絶縁被膜の化学組成

本発明における無方向性電磁鋼板において、絶縁被膜の種類については特に制限はないが、リン酸系、シリカ系、Zr系等の無機化合物と有機樹脂との複合皮膜であることが好ましい。従来、重クロム酸塩を主原料とするクロム酸塩系絶縁被膜が主に採用されてきたが、6価クロムは毒性が強いため、製造時の作業環境保全の点から、クロムを含まないことが好ましい。

【0043】

また、有機樹脂の種類についても制限はなく、例えば、アクリル樹脂、スチレン樹脂、アクリル - スチレン樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂、フェノール樹脂、およびウレタン樹脂から選択される1種以上を採用することができる。

【0044】

上述のように、絶縁被膜中で遊離・残存した炭素を炭化物として固定し、無害化するため、本発明においては、絶縁被膜中に、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素を含有させる。より具体的には、絶縁被膜の化学組成が、下記(ii)式を満足する必要がある。

$$[M] - [C] + 1 / 2 \times [O] > 0 \quad \dots (ii)$$

但し、上記(ii)式中の[M]は、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素の合計原子濃度(at%)を意味し、[C]および[O]は、それぞれ、前記絶縁被膜中に含有されるCおよびOの原子濃度(at%)を意味する。

【0045】

なお、上記の元素のうち、Znは比較的、炭化物形成能が低い。また、Mnも、Znよ

10

20

30

40

50

りは優れるものの、他の元素に比べると炭化物形成能が低い。そのため、絶縁被膜は、Znを除く、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、VおよびMoから選択される1種類以上の元素を、上記(ii)式を満足する範囲で含有することが好ましく、ZnおよびMnを除く、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、VおよびMoから選択される1種類以上の元素を、上記(ii)式を満足する範囲で含有することが好ましい。

【0046】

本発明において、絶縁被膜中の[M]、[C]および[O]は、以下の手順により測定することとする。最初に、絶縁被膜がリン酸系、シリカ系等の無機化合物を含むものであって、アルカリ処理によって溶解可能な場合について、説明する。まず、絶縁被膜を含む無方向性電磁鋼板全体で、重量測定および化学組成分析を行う。化学組成は、本実施形態においては、ICP-MSによって[M]の分析をする。[C]については、JIS G 1211-3:2018に準拠し、試料を燃焼させて赤外吸光度測定することによって分析する(以下、「燃焼-赤外線吸収法」ともいう。)。[O]については、試料をHe雰囲気中の黒鉛坩堝内で熔融させて発生する炭酸ガスを赤外線検出器で分析することで定量化する。次に、絶縁被膜をアルカリ処理によって除去した母材について、同様に、重量測定および化学組成分析を行う。そして、絶縁被膜除去前後での差から、絶縁被膜中の[M]、[C]および[O]を算出する。

10

【0047】

次に、絶縁被膜がZr系等の無機化合物を含むものであって、アルカリ処理によって溶解することができない場合について、説明する。まず、絶縁被膜が全て含まれるように、表面部のみを機械研磨によって剥離させる。この際、研磨剤としてはアルミナを用いる。その後、絶縁被膜に付着した母材のみを、塩酸を用いて完全に除去する。そして、分離した絶縁被膜について、上述の方法により、化学組成分析を行い、絶縁被膜中の[M]、[C]および[O]を求める。

20

【0048】

4. 厚さ

本実施形態の無方向性電磁鋼板においては、母材鋼板の板厚および絶縁被膜の膜厚について、特に制限を設ける必要はない。しかしながら、母材鋼板の板厚が0.30mm以上であるか、または絶縁被膜の膜厚が1.0 μ mを超える場合には、有機樹脂の熱分解で生じた炭素は、鋼板同士の積層間から炭酸ガスとして放出されやすくなるため、炭素の遊離・残存が生じにくくなる。

30

【0049】

すなわち、本発明における効果は、母材鋼板および絶縁被膜が薄い場合に、顕著に発現されやすくなる。そのため、母材鋼板の板厚は0.30mm未満であるのが好ましく、絶縁被膜の膜厚は1.0 μ m以下であるのが好ましい。

【0050】

5. 鉄心およびモータコア

本発明の一実施形態に係る鉄心は、上述した無方向性電磁鋼板を含むものである。上記鉄心は、複数枚の無方向性電磁鋼板を積層することで得られる。積層する複数枚の無方向性電磁鋼板のうちの一部または全部が、上記の無方向性電磁鋼板であればよい。

40

【0051】

また、本発明の一実施形態に係るモータコアは、ロータコアおよびステータコアを含む。ここで、ロータコアには強度が求められる。そのため、ロータコアは、上記の無方向性電磁鋼板を所定の形状に打ち抜いて、複数枚を積層することで得られる。すなわち、本実施形態におけるロータコアには、歪取焼鈍が施されていない。そのため、ロータコアを構成する無方向性電磁鋼板における絶縁被膜の化学組成が、上述の(ii)式を満足する。

【0052】

一方、ステータコアには、より優れた磁気特性が求められる。そのため、ステータコアは、上記の無方向性電磁鋼板を所定の形状に打ち抜いて、複数枚を積層した後に、歪取焼鈍を施すことで得られる。上述のように、複数の無方向性電磁鋼板を積層してから歪取焼

50

鈍を施した際に、絶縁被膜中の有機樹脂が熱分解し、一部の炭素が遊離・残存する。本発明においては、絶縁被膜中に、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素を含有させることで、絶縁被膜中で遊離・残存した炭素を炭化物として固定する。

【0053】

したがって、本実施形態のモータコアは、歪取焼鈍後の絶縁被膜中、すなわち、ステータコアを構成する無方向性電磁鋼板における絶縁被膜中に、炭素含有量換算で、 10 mg/m^2 以上の炭化物を含む。言い換えれば、絶縁被膜中の炭化物の量が、炭素含有量換算で、 10 mg/m^2 以上であることは、絶縁被膜中の有機樹脂が熱分解によって遊離した炭素が、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから絶縁被膜の構成元素として選択した1種類以上の元素との炭化物を形成して、母材鋼板中に侵入するのを抑制できていたことを意味する。絶縁被膜中の炭化物の量は、 13 mg/m^2 以上、さらに、 15 mg/m^2 以上としてもよい。なお、上記の炭化物は、Mn、Ti、Zr、Hf、Ta、Nb、V、MoおよびZnから選択される1種類以上の元素を含む炭化物である。

10

【0054】

絶縁被膜中の炭素含有量換算での炭化物の量は、単位面積の母材鋼板表面に形成されている絶縁被膜中に含まれる炭化物中の炭素の量を意味する。本実施形態においては、絶縁被膜中の炭化物の量は以下の手順により測定する。最初に、絶縁被膜がリン酸系、シリカ系等の無機化合物を含むものであって、アルカリ処理によって溶解可能な場合について、説明する。まず、アルカリ処理によって、絶縁被膜のみを溶解する。この際、炭化物は溶解せずに残渣となってアルカリ溶液中に残存する。そのため、当該残渣をろ過し、乾燥させた後に燃焼 - 赤外線吸収法により炭素量を測定する。そして、当該重量を、溶解した母材鋼板の絶縁被膜が形成されていた表面の面積で除することで、絶縁被膜中の炭素含有量換算での炭化物の量を求める。

20

【0055】

次に、絶縁被膜がZr系等の無機化合物を含むものであって、アルカリ処理によって溶解することができない場合について、説明する。まず、絶縁被膜が全て含まれるように、表層部のみを機械研磨によって剥離させる。この際、研磨剤としてはアルミナを用いる。その後、絶縁被膜に付着した母材を、塩酸を用いて完全に除去する。母材を除去した後の残渣をろ過し、乾燥させた後に燃焼 - 赤外線吸収法により炭素量を測定する。そして、当該炭素量を、溶解した母材鋼板の絶縁被膜が形成されていた表面の面積で除することで、絶縁被膜中の炭素の量を求める。なお、歪取焼鈍後の絶縁被膜中には、樹脂としての炭素は残存していないと考えられるため、測定される炭素量は全て炭化物に起因するものである。

30

【0056】

6. C濃度増加量と鉄損との関係

上述のように、高温での歪取焼鈍によって絶縁被膜中の有機樹脂が熱分解し、遊離・残存した炭素が母材鋼板に侵入して、SiC、MnC、CrC等として析出すると、鉄損の劣化を招く。すなわち、歪取焼鈍後における母材鋼板中のC濃度増加量が大きいほど、鉄損の劣化が大きくなる。そのため、本発明においては、鉄損の改善度合いの指標として、C濃度増加量を用いることとする。

40

【0057】

C濃度増加量は、例えば、以下の方法によって求めることができる。まず、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ の無方向性電磁鋼板を5枚積層してから、 $\text{N}_2:100\%$ （露点30 未満）の雰囲気において、800 で2時間保持する焼鈍を施す。その後、積層した5枚の無方向性電磁鋼板のうち、積層方向中央の1枚を取り出し、母材鋼板中のC濃度を測定する。そして、焼鈍前の母材鋼板中のC濃度からの増加量を、C濃度増加量とする。

【0058】

ここで、母材鋼板中のC濃度については、無方向性電磁鋼板の表裏両面のそれぞれにおいて、機械研磨によって絶縁被膜を除去する。ここで、絶縁被膜を完全に除去するため、

50

絶縁被膜を除去し、母材部分が見えてからさらに厚さ方向に10 μm除去することとする。そして、その後、残った母材鋼板に対して、燃焼 - 赤外線吸収法を用いてC濃度の測定を行う。

【0059】

なお、歪取焼鈍後における母材鋼板中のC濃度増加量と鉄損との関係は、本発明者らが行った予備実験によって確認されている。その結果を以下に示す。

【0060】

後述する表1に示す試験No. 1の無方向性電磁鋼板において、絶縁被膜の化学組成を調整し、種々の[M] - [C] + 1/2 × [O]の値を有する無方向性電磁鋼板を用意した。得られた無方向性電磁鋼板について、上記の方法でC濃度増加量を測定した。

10

【0061】

さらに、同じ無方向性電磁鋼板、すなわち、積層して焼鈍した後に取り出された、積層方向中央の1枚の無方向性電磁鋼板について、JIS C 2550 - 1 : 2011に規定されるエプスタイン試験を実施した。そして、±1.0 T間での直流測定によって得られた鉄損を、1 Hzでのヒステリシス損 $Wh_{10/1}$ とみなし、400 Hzでのヒステリシス損 $Wh_{10/400}$ は、その400倍として計算した。

【0062】

図1は、C濃度増加量と鉄損（ヒステリシス損）との関係を示す図である。図1に示されるように、C濃度増加量と鉄損との間には良好な相関関係が認められ、C濃度増加量が低いほど、鉄損が良好である。このことから、鉄損の改善度合いの指標として、C濃度増加量が有用であることが分かる。

20

【0063】

7. 無方向性電磁鋼板の製造方法

本実施形態の無方向性電磁鋼板を製造する方法については特に制限はない。例えば、上記の化学組成を有するスラブを加熱した後、熱間圧延を施し、必要に応じて熱延板焼鈍を行い、酸洗し、冷間圧延を施し、その後、仕上げ焼鈍を施すことで、母材鋼板が得られる。なお、必要に応じて、仕上げ焼鈍後にスキンパス圧延を施してもよい。

【0064】

熱延板焼鈍、冷間圧延、仕上げ焼鈍の条件については特に制限はないが、熱延板焼鈍は900 ~ 1100 の温度域で行うことが好ましい。冷間圧延については、圧延性の観点から圧延前に80 ~ 300 に温めてから圧延してもよい。仕上げ焼鈍については、700 ~ 1050 の温度域で行うのが好ましく、900 以下の温度域で行うのがより好ましい。

30

【0065】

また、スキンパス圧延における圧下率は1 ~ 10%とすることが好ましい。圧下率を1%以上とすることで、歪誘起粒成長に必要な歪が十分に得られる。一方、圧下率を10%以下とすることで、結晶方位ごとの歪量の不均一を維持できる。

【0066】

続いて、得られた母材鋼板の表面に絶縁被膜を形成する。ここで、絶縁被膜の形成工程については、特に限定されるものではなく、上述の化学組成を有する絶縁被膜処理液を用いて、処理液の塗布および乾燥を行えばよい。ただし、炭素の母材鋼板中への侵入を抑制する観点から、処理液の乾燥・焼き付けの昇温速度の制御が重要となる。

40

【0067】

具体的には、処理液の乾燥・焼き付けの昇温速度は40 /s以上とすることが好ましく、50 /s以上とすることがより好ましい。加熱速度が遅いと被膜表面が平坦化することで歪取り焼鈍時の炭酸ガス等の抜けを阻害して、より炭素の鋼中への侵入量が増えることとなり、また逆に加熱速度が速ければ微小な凹凸ができることで炭素の悪影響を回避し易くなる。

【0068】

さらに、焼き付け温度については270 以上350 以下の範囲とすることが好まし

50

い。焼き付け温度が270 未満では、被膜表面が平坦化することで歪取り焼鈍時の炭酸ガス等の抜けを阻害して、より炭素の鋼中への侵入量が増えることとなり、また逆に焼き付け温度が高ければ微小な凹凸ができることで炭素の悪影響を回避し易くなる。一方、焼き付け温度が高すぎる場合は被膜中の樹脂がこの段階で燃焼を開始してしまい、打ち抜き性が劣化してしまう。焼き付け温度については300 以上350 以下とすることがより好ましい。

【0069】

なお、絶縁被膜が形成される母材鋼板の表面には、処理液を塗布する前に、アルカリ等による脱脂処理、または塩酸、硫酸、リン酸等による酸洗処理等、任意の前処理を施してもよいし、これら前処理を施さずに仕上焼鈍後のままであってもよい。

10

【0070】

8. 鉄心およびモータコアの製造方法

本発明の一実施形態に係る鉄心の製造方法は、上述した無方向性電磁鋼板を積層する工程を有する。この際、複数枚の無方向性電磁鋼板を積層することとなる。積層する複数枚の無方向性電磁鋼板のうちの一部または全部が、上記の無方向性電磁鋼板であればよい。

【0071】

また、上記の無方向性電磁鋼板に対して、所定の形状に打ち抜いて積層した後に、歪取焼鈍を施すことで、モータコアが得られる。なお、上述のように、ロータコアには歪取焼鈍を施さない方が好ましいため、ここでいうモータコアは、ステータコアであることが好ましい。

20

【0072】

歪取焼鈍の条件については特に制限はないが、磁気特性を改善する観点から、高温で歪取焼鈍を行うことが好ましく、具体的には、焼鈍温度を750~900 の温度範囲とすることが好ましい。焼鈍時間についても制限はなく、例えば、0.5~5.0 hとすることが好ましい。なお、焼鈍時間はモータコアが750 以上となっている時間であり、750 未満での昇温時間、冷却時間は適宜設定して構わない。

【0073】

上述のように、高温で歪取焼鈍を行う場合、炭化物の析出による鉄損の劣化が顕在化しやすくなるが、本発明においては、絶縁被膜の化学組成を適正化することでこれを抑制することが可能となる。言い換えれば、本実施形態に係る無方向性電磁鋼板は、所定の形状に打ち抜いて積層した後に、750~900 の温度範囲で歪取焼鈍が施される用途に好適に用いることができる。

30

【0074】

以下、実施例によって本発明をより具体的に説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

【実施例】

【0075】

所定の化学組成を有するスラブを1150 に加熱した後、仕上温度800 、仕上板厚2.2 mmにて熱間圧延を施し、700 で巻取って熱延鋼板とした。得られた熱延鋼板に対して、950 ×40 sの熱延板焼鈍を施し、酸洗により表面のスケールを除去した。さらに上記鋼板を、冷間圧延により板厚0.25 mmの冷延鋼板とした。

40

【0076】

その後、900 ×20 秒の条件で仕上焼鈍を行い、母材鋼板とした。得られた母材鋼板の化学組成を表1 に示す。また、母材鋼板の厚さはいずれも0.25 mmであった。

【0077】

【表 1】

表 1

鋼種	化学組成 (質量%、残部: Feおよび不純物)																(i)式† 左辺値		
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	Mo	V	Ca	Mg	REM	Sn	Sb	Ni		Cr	Cu
A	0.0021	3.4	0.50	0.020	0.0013	0.50	0.0015	0.0004	0.016	0.0008	0.0007	0.0003	-	-	-	-	-	-	0.0002
B	0.0010	3.5	0.20	0.008	0.0005	0.20	0.0017	-	-	-	-	0.0004	-	0.02	-	-	-	-	-0.0002
C	0.0014	3.7	1.0	0.011	0.0017	0.20	0.0007	0.0002	0.021	0.0009	0.0015	-	0.0032	-	0.01	0.03	0.05	0.06	-0.0003
D	0.0023	3.9	2.1	0.062	0.0011	0.01	0.0013	-	0.013	0.0006	0.0004	0.0005	-	-	-	0.05	-	0.03	-0.0001
E	0.0016	3.5	0.80	0.013	0.0025	0.70	0.0021	0.0006	0.004	-	0.0021	-	0.0035	0.01	-	-	-	0.04	-0.0001
F	0.0019	4.2	0.60	0.009	0.0007	0.30	0.0011	-	-	-	-	0.0006	-	0.01	-	0.02	0.02	0.05	-0.0003
G	0.0021	3.5	2.8	0.010	0.0014	0.30	0.0008	-	-	-	0.0009	-	0.0013	0.02	-	0.02	-	0.04	0.0004
H	0.0017	3.4	0.40	0.011	0.0012	0.40	0.0014	-	0.008	-	0.0003	-	-	0.01	-	0.03	0.02	0.04	0.0010
I	0.0024	3.8	0.07	0.008	0.0012	0.20	0.0008	-	-	-	0.0005	0.0006	-	0.01	-	0.03	0.03	0.03	-0.0002

† S-5/3×Mg-4/5×Ca-1/4×REM<0.0005 ... (i)

10

20

30

40

【 0 0 7 8 】

続いて、母材鋼板の表面に表 2 に示す成分からなる絶縁被膜処理液を塗布した後、大気中において、表 2 に示す温度で焼付けることで絶縁被膜を形成し、無方向性電磁鋼板とした。絶縁被膜の化学組成および膜厚を表 2 に併せて示す。

【 0 0 7 9 】

【表 2】

表2 絶縁被膜

試験 No.	鋼種	焼付温度 (°C)	焼付加熱速度 (°C/s)	成分				原子濃度 (at%)		(ii)式 ⁺ 右辺値	膜厚 (μm)	炭素換算炭化物量 (mg/m ²)	C濃度増加量 (ppm)	鉄損 W _{10/400} (W/kg)	備考
				無機化合物	有機樹脂	その他	[M]	[C]	[O]						
1	A	300	56	リン酸Al	アクリル	リン酸Zr	2	18	38	3.0	19	0	10.7	本発明例	
2	A	320	52	リン酸Al	アクリル	リン酸Zr	2	18	38	3.0	18	1	10.8	本発明例	
3	A	300	63	ジルコニア	アクリル	-	11	22	31	4.5	23	0	10.7	本発明例	
4	A	300	51	リン酸Mn	アクリル	-	5	24	27	-5.5	1	6	11.5	比較例	
5	B	330	41	リン酸Zr	エポキシ	-	5	20	37	3.5	20	0	11.1	本発明例	
6	B	350	44	シリカ	ポリエステル	ジルコニア	8	22	32	2.0	14	1	11.2	本発明例	
7	B	290	55	シリカ	ポリエステル	ジルコニア	8	22	32	2.0	16	0	11.2	本発明例	
8	B	300	54	リン酸Al	ポリエステル	-	0	22	31	-6.5	1	7	11.8	比較例	
9	C	350	57	リン酸Mn	エポキシ	-	8	18	34	7.0	24	1	10.6	本発明例	
10	C	300	66	ジルコニア	ポリエステル	Hf	5	20	34	2.0	16	0	10.5	本発明例	
11	C	290	57	リン酸Al	アクリル	-	0	22	31	-6.5	3	0	10.7	比較例	
12	D	300	53	シリカ	エポキシ	ジルコニア、タンタル	8	20	35	5.5	21	0	9.9	本発明例	
13	D	300	49	リン酸Al	ポリエステル	リン酸Mn	1	23	30	-7.0	2	7	11.6	比較例	
14	D	320	57	シリカ	アクリル	ジルコニア	3	21	32	-2.0	3	4	11.5	比較例	
15	D	280	59	リン酸Zn	アクリル	リン酸Zr	3	27	25	-11.5	1	9	11.7	比較例	
16	E	300	54	リン酸Al	アクリル	リン酸Zr	2	18	39	3.5	20	0	10.3	本発明例	
17	E	280	63	ジルコニア	エポキシ	-	8	22	32	2.0	16	1	10.4	本発明例	
18	E	350	48	リン酸Mn	ポリエステル	リン酸Zn	4	20	34	1.0	13	0	10.4	本発明例	
19	E	300	58	リン酸Al	アクリル	リン酸Zr	1	23	30	-7.0	2	8	11.6	比較例	
20	F	320	52	シリカ	アクリル	ジルコニア	8	22	32	2.0	16	0	10.1	本発明例	
21	G	300	48	リン酸Mn	エポキシ	-	8	18	34	7.0	22	1	9.8	本発明例	
22	H	280	41	ジルコニア	エポキシ	-	8	22	32	2.0	16	0	11.8	比較例	
23	I	300	41	リン酸Zr	エポキシ	-	5	20	37	3.5	20	0	10.9	本発明例	
24	G	250	25	リン酸Mn	エポキシ	-	8	18	34	7.0	11	4	11.5	参考例	
25	G	250	25	リン酸Al	アクリル	リン酸Zr	1	23	30	-7.0	2	10	11.9	比較例	

⁺ [M]-[C]+1/2×[O]>0 ... (ii)

【0080】

その後、得られた無方向性電磁鋼板を所定形状に打ち抜き、5枚積層した後、N₂ : 100% (露点 - 30) の雰囲気において、800 で2時間保持する歪取焼鈍を行った。そして、積層した5枚の無方向性電磁鋼板のうち、積層方向中央の1枚を取り出し、当該無方向性電磁鋼板について、JIS C 2550-1:2011に規定されるエプスタイン試験により、鉄損W_{10/400} (W/kg) を測定した。なお、鉄損W_{10/400} は、最大磁束密度が1.0 Tで周波数400 Hz という条件下で発生する全鉄損を意味する。本実施例においては、鉄損W_{10/400} が11.5 W/kg 未満である場合に、低鉄損であると判断した。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 1 】

次に、上述の積層方向中央の1枚の無方向性電磁鋼板について、母材鋼板中のC濃度を測定し、焼鈍前の母材鋼板中のC濃度と比較することで、C濃度増加量を求めた。その結果を表2に併せて示す。

【 0 0 8 2 】

表2に示すように、(ii)式を満足する本発明例の試験No. 1~3、5~7、9、10、12、16~18、20、21および23では、C濃度増加量が1ppm以下となり、鉄損にも優れる結果となった。一方、比較例の試験No. 4、8、13~15および19については、(ii)式を満足しないため、C濃度増加量が大きくなり、鉄損が劣化する結果となった。なお、試験No. 11については、(ii)式を満足しないにもかかわらず、絶縁被膜の膜厚が1.0μmを超えているため、C濃度増加量は大きくならなかった。また、試験No. 22については、(i)式を満足しないため、(ii)式を満足し、C濃度増加量が1ppm以下であるにもかかわらず、鉄損が劣化する結果となった。

10

【 0 0 8 3 】

さらに、試験No. 24については、焼き付け条件が不適切であったため、C濃度増加量が大きくなり、鉄損が劣化する結果となった。そして、試験No. 25については、焼き付け条件が不適切であり、(ii)式も満足しないため、C濃度増加量が大きくなり、鉄損が劣化する結果となった。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 8 4 】

以上のように、本発明によれば、低鉄損の無方向性電磁鋼板を安定的に得ることが可能となる。

20

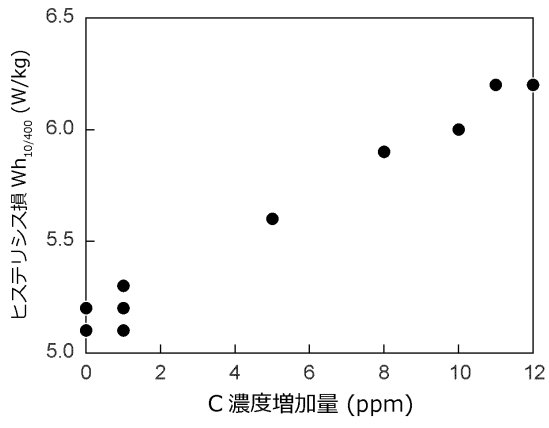
30

40

50

【図面】

【図 1】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類		F I			
<i>H 0 1 F</i>	<i>41/02 (2006.01)</i>	<i>H 0 1 F</i>	<i>41/02</i>		<i>B</i>
<i>C 2 1 D</i>	<i>8/12 (2006.01)</i>	<i>C 2 1 D</i>	<i>8/12</i>		<i>A</i>
<i>C 2 1 D</i>	<i>9/46 (2006.01)</i>	<i>C 2 1 D</i>	<i>9/46</i>	<i>5 0 1 B</i>	

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 河口 展明

- (56)参考文献 特開2021-031714(JP,A)
 国際公開第2018/025941(WO,A1)
 国際公開第2021/117325(WO,A1)
 特開2009-068055(JP,A)
 国際公開第2016/125783(WO,A1)
 特開2001-295001(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
 C 2 2 C 3 8 / 0 0 - 3 8 / 6 0
 C 2 3 C 2 2 / 0 0
 H 0 1 F 1 / 1 4 7
 H 0 1 F 4 1 / 0 2
 C 2 1 D 8 / 1 2
 C 2 1 D 9 / 4 6