

明 細 書

発明の名称： 積層コア

技術分野

[0001] 本発明は積層コアに関する。

本願は、2022年04月06日に、日本に出願された特願2022-063474号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 回転電機に使用されるコア（鉄心）として、複数の電磁鋼板が互いに接合されて積層された積層コアが知られている。電磁鋼板同士の接合方法としては、かしめや溶接が知られている。しかし、かしめや溶接では、加工時の機械的応力や熱応力、さらには層間短絡によって電磁鋼板の磁気特性が劣化し、積層コアの性能が低下することがある。

そこで、近年、かしめ、溶接以外の接合方法として、接着による接合方法が注目されている。接着剤を用いた接合ではかしめのように鋼板に加工が入らないので、積層されて接合された積層コア（接着積層コア）において、磁気特性の劣化が抑えられる。

[0003] 電磁鋼板同士を接着する接着剤として、例えば特許文献1に示されるように、体積変化が少なく、耐熱性や耐油性、耐薬品性に優れるエポキシ樹脂が知られている。

一方、エポキシ樹脂を硬化させるには比較的高温にする必要があるので、接着時に鋼板に応力が付加され、鉄損が劣化する恐れがある。そのため、例えば特許文献2～7には、エポキシ樹脂よりも低温で接着可能な接着剤として、ウレタン樹脂を用いるものが提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2022-000888号公報

特許文献2：日本国特開2017-179233号公報

特許文献3：日本国特開2017-186542号公報

特許文献4：日本国特開平6-182929号公報

特許文献5：日本国特開平6-271834号公報

特許文献6：日本国特開平7-268051号公報

特許文献7：日本国特開2002-293864号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、上述のような接着剤を用いる接合の場合、一般に、接着強度が高い樹脂ほど硬く、硬化収縮に伴い鋼板に歪みを与え磁気特性劣化をもたらすことが知られている。すなわち、接着強度と磁気特性影響とは相反すると考えられてきた。

そのため、従来、接着積層コアにおいて、高い接着強度と優れた磁気特性とを両立させることは容易ではなかった。

したがって、本発明は、高い接着強度と優れた磁気特性とを有する積層コア（接着積層コア）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

[0006] 本発明者らは、接着能を有する絶縁被膜によって複数の電磁鋼板が積層されてなる積層コアにおいて、高い接着強度と優れた磁気特性とを両立させる方法について検討を行った。

その結果、絶縁被膜において、ナノインデントで測定される μm オーダーの硬度を制御することで、高い接着強度と優れた磁気特性を両立させることができることを見出した。

また、絶縁被膜のゾル分の重量平均分子量を所定の範囲とすることで、磁気特性劣化抑制と接着強度向上とのバランスがより向上することを見出した。

[0007] 本発明は、上記の知見に基づいてなされた。本発明の要旨は以下の通りである。

[1] 本発明の一実施形態に係る積層コアは、互いに積層された複数の電磁

鋼板と、積層方向に隣り合う前記電磁鋼板同士の間に設けられ、前記電磁鋼板同士をそれぞれ接着する絶縁被膜と、を備え、前記絶縁被膜の硬度が200～300MPaである。

〔2〕〔1〕に記載の積層コアは、前記絶縁被膜の、ゾル分の重量平均分子量が10000～100000であってもよい。

〔3〕〔1〕または〔2〕に記載の積層コアは、前記複数の電磁鋼板は、表面から板厚の1/2の深さの圧延面に平行な面をSEM-EBSDで測定した際の{hkl}〈uvw〉方位の結晶粒の全視野に対する面積率を $A_{hkl-uvw}$ と表記したとき、 $A_{411-011}$ が15.0%以上であってもよい。

〔4〕〔3〕のいずれかに記載の積層コアは、前記電磁鋼板の化学組成が、質量%で、C:0.0100%以下、Si:1.50%～4.00%、sol、Al:0.0001%～1.0000%、S:0.0100%以下、N:0.0100%以下、Mn、Ni、Cuからなる群から選ばれる1種以上:総計で2.50%～5.00%、Co:0.000%～1.000%、Sn:0.000%～0.400%、Sb:0.000%～0.400%、P:0.000%～0.400%、及びMg、Ca、Sr、Ba、Ce、La、Nd、Pr、Zn、Cdからなる群から選ばれる1種以上:総計で0.000%～0.0100%、を含有し、質量%での、Mn含有量を[Mn]、Ni含有量を[Ni]、Cu含有量を[Cu]、Si含有量を[Si]、sol、Al含有量を[sol、Al]、P含有量を[P]としたときに、以下の式(1)を満たし、残部がFeおよび不純物からなってもよい。

$$(2 \times [\text{Mn}] + 2.5 \times [\text{Ni}] + [\text{Cu}]) - ([\text{Si}] + 2 \times [\text{sol, Al}] + 4 \times [\text{P}]) \geq 1.50\% \quad \cdots (1)$$

発明の効果

[0008] 本発明の上記態様によれば、高い接着強度と優れた磁気特性とを有する積層コアを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]本実施形態に係る積層コアの側面図の例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0010] 本発明の一実施形態に係る積層コア（本実施形態に係る積層コア）は、図1に示すように、互いに積層された複数の電磁鋼板21と、積層方向に隣り合う前記電磁鋼板21, 21同士の間設けられ、前記電磁鋼板21, 21同士をそれぞれ接着する絶縁被膜22と、を備え、前記絶縁被膜の硬度が、200～300MPaである。

以下、それぞれについて説明する。

[0011] <絶縁被膜>

[硬度]

本実施形態に係る積層コア1が備える絶縁被膜22は、絶縁性を確保するとともに、積層方向に隣り合う電磁鋼板21, 21同士を接着により接合している。

絶縁被膜は、電磁鋼板（絶縁被膜を有していないので、母材鋼板という場合がある）の表面に形成された時点では、加熱硬化性の接着能を有する絶縁被膜である。母材鋼板の上に、接着能を有する絶縁被膜を形成し、この絶縁被膜を有する電磁鋼板を複数枚積層し、加熱圧着することによって、それぞれの電磁鋼板は接着により接合される。

その際、一般に、接着強度の高い樹脂ほど硬く、硬化収縮に伴い鋼板に歪みを与え磁気特性劣化をもたらす。そのため、高い接着強度と優れた磁気特性とを高いレベルで両立させることは容易ではない。

本実施形態に係る積層コア1では、絶縁被膜22の、ナノインデントで測定される μm オーダーの硬度を制御することで磁気特性の劣化を抑えつつ、接着強度を高めることができる。具体的には、絶縁被膜の硬度を200～300MPaとする。

絶縁被膜の硬度が200MPa未満では、十分な接着強度（例えば10,000MPa以上）が得られない。一方、絶縁被膜の硬度が300MPaを超えると、磁気特性の劣化が顕著となる。

[0012] 絶縁被膜の硬度は以下の要領で求めることができる。

例えば数枚剥離させた積層コアから、精密カッターで切出すことで、絶縁被膜断面が観察できるようにサンプルを取出す。サンプルの絶縁被膜の加熱圧着部分の厚さ方向の中央部をCP加工（イオンミリング加工）することによって、測定用の試料を作成する。HYSITRON社製TRIBOINDENTERまたはこれと同等のナノインデントを用いて、室温（25℃）にて、荷重を250μNとして、硬度を測定する。5点について測定し、その平均値を絶縁被膜の硬度とする。

[0013] [ゾル分の重量平均分子量]

本実施形態に係る積層コア1が備える絶縁被膜22において、絶縁被膜のゾル分の重量平均分子量（Mw）は、10000～100000であることが好ましい。ゾル分の重量平均分子量を10000以上とすることで剛性を持った樹脂構造を取ることができ十分な接着強度が得られる。また、ゾル分の重量平均分子量を100000以下とすることで樹脂が硬くなりすぎず磁気特性の劣化を抑制できる、すなわち、ゾル分の重量平均分子量を所定の範囲とすることで、磁気特性劣化抑制と接着強度向上のバランスがより向上する。

絶縁被膜のゾル分の重量平均分子量は、より好ましくは20000～70000、さらに好ましくは、30000～50000である。

ここで、絶縁被膜全体の重量平均分子量ではなく、ゾル分の重量平均分子量を規定するのは、接着剤の未架橋部の重量平均分子量が磁気特性に影響するためである。

[0014] 絶縁被膜のゾル分の重量平均分子量は、例えば数枚剥離させた積層コアから、精密カッターで切出した、固化した絶縁被膜（接着剤として機能）を10mM臭化リチウム含有N,N-ジメチルホルムアミドに24h浸漬して作成した測定試料を、東洋ソーダ製高速GPCシステム HLC-8320GPC等のGPC（Gel Permeation Chromatography：ゲル浸透クロマトグラフィー）を用いて測定することができる。その際

の条件は以下の通りとする。

カラム：PL gel 5 μ m Guard、PL gel 5 μ m MIXED
-C $\times$ 2 (Polymer Laboratories)

移動相：10 mM 臭化リチウム含有 N,N-ジメチルホルムアミド

流速：1.0 mL/min

カラム温度：40℃

データ処理：EcoSEC-WorkStation

[0015] 絶縁被膜は、硬化後にある程度の剛直性を持ち接着強度を確保でき、かつ硬化による鋼板への圧縮応力が少ないアクリル樹脂が90重量%以上であることが好ましい。

その他の成分としては樹脂や無機塩、無機微粒子を含んでもよい。その他の成分としての樹脂は、例えばエポキシ樹脂、ウレタン樹脂、フェノール樹脂等がある。無機塩は例えばリン酸塩、クロム酸塩、ホウ酸塩等がある。無機微粒子は例えば二酸化ケイ素、酸化チタン、酸化マグネシウム、水酸化ジルコニウム等が例示される。絶縁被膜を主に構成するアクリル樹脂の種類は、特に限定されない。

[0016] 本実施形態に係る積層コアでは、電磁鋼板21と絶縁被膜22との間に、下地層として、別の絶縁性を有する被膜を有していてもよい。この場合、絶縁被膜が、下地層を介して、電磁鋼板同士を接着することになる。

下地層は、限定されず、公知の被膜を用いることができるが、絶縁性を高めつつ、接着強度の低下を避けるため、例えば、クロム酸含有処理剤、リン酸塩含有処理剤等の一般的な処理剤を塗布し、焼付けることによって形成される被膜が好ましい。

下地層は、鉄心における積層された鋼板間での絶縁性の向上に寄与する。この効果を得る場合、膜厚を0.1 μ m以上とすることが好ましい。一方、下地層の膜厚が厚いと密着性が低下し剥がれ易くなる。そのため下地層の厚さは1.0 μ m以下が好ましい。

[0017] 絶縁被膜の厚さは、厚すぎると硬化の応力による磁気特性の劣化が増大し

、薄すぎると接着対象となる電磁鋼板の表面粗度の影響で接着面積が著しく低下し、接着強度が不足することが懸念される。

そのため、接着部の厚さを単位 μm で A としたとき、 A と、接着対象となる電磁鋼板の表面の、JIS B 0601 (2013)に規定される算術平均粗さ R_a とが、以下の式(3)を満たすことが好ましい。

$$3.0 \times R_a \leq A \leq 3.0 \quad (3)$$

[0018] 絶縁被膜の厚さ A は、例えばケツト科学研究所製電磁膜厚計LE-370またはこれと同等の電磁膜厚計にてJIS K 5600-1-7 (2014)に示された磁気法で測定することができる。

また、電磁鋼板の表面の算術平均粗さ R_a は、例えば小坂研究所製表面粗さ測定機SE3500またはこれと同等の触針粗さ計を用いて測定することができる。その際、測定方向は、板幅方向(C方向)とし、測定長さを8mm、速度は0.1mm/s、カットオフ値を0.8mmとする。

積層コアとなった後など、電磁鋼板の表面に絶縁被膜や下地層が存在する場合に電磁鋼板の表面の算術平均粗さを測定する場合、電磁鋼板の表面から絶縁被膜や下地層を除去した後に測定すればよい。

絶縁被膜は、例えば、DMF (ジメチルホルムアミド)に10～60分浸漬することで除去することができる。また、下地層は、例えば20%NaOH水溶液に1～10分浸漬することで除去することができる。

[0019] <電磁鋼板>

本実施形態に係る積層コア1が備える電磁鋼板は、公知の電磁鋼板(方向性電磁鋼板または無方向性電磁鋼板)であればよいが、モータ等への適用を想定した場合、無方向性電磁鋼板であることが好ましい。

また、無方向性電磁鋼板とする場合、以下のような集合組織及び化学組成を有することが好ましい。

[0020] [集合組織]

電磁鋼板では、低鉄損及び高い磁束密度を得るために集合組織が制御される。例えば、鋼板板面内に磁化容易軸を持ち、磁気特性向上に有利であり、

かつ鋼板製造の必須工程である熱間圧延および冷間圧延における圧延加工により比較的容易に集積を高めることが可能な組織（ α ファイバー）を発達させることで、磁気特性が向上する。具体的には、 $\langle 110 \rangle$ 方向が圧延方向（RD）に略平行な組織を形成することが有効である。

一方で、 $\{100\} \langle 011 \rangle$ 方位は応力に対する磁気特性の変化、具体的には圧縮応力が作用した場合の磁気特性の劣化（応力感受性）が大きくなる。

これに対し、 $\{411\} \langle 011 \rangle$ という特殊な方位を発達させることにより、磁気特性（特に圧延方向から 45° 方向での磁気特性）が一層改善される。

そのため、表面から板厚の $1/2$ の深さの圧延面に平行な面を、電子線後方散乱回折機能付き走査型電子顕微鏡（SEM-EBSD）で測定した際の、集合組織を制御することが好ましい。具体的には、上記の測定により得られる、 $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ 方位（裕度 10° 以内）の結晶粒の、全視野に対する面積率を、 $A_{hkl-uvw}$ と表記したときの、 $A_{411-011}$ （以下 $\{411\} \langle 011 \rangle$ 率という場合がある）、を 15.0% 以上とすることが好ましい。

$\{411\} \langle 011 \rangle$ 率は、より好ましくは 25.0% 以上、さらに好ましくは 30.0% 以上、一層好ましくは 35.0% 以上、特に好ましくは 40.0% 以上である。上限は特に限定されないが、製造負荷の観点から 80.0% 以下としてもよい。

[0021] 特定方位粒の面積率は、以下の方法で測定できる。すなわち、特定方位粒の面積率は、OIM Analysis 7.3（TSL社製）を用いて、下記測定条件で観察した電子線後方散乱回折（EBSD: Electron Back Scattering Diffraction）機能付き走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscope）による測定領域の中から、目的とする特定方位を抽出（トレランスは 10° に設定、以下裕度 10° 以内と表記）する。その抽出した面積を、測定

領域の面積で割り、百分率を求める。この百分率を特定方位粒の面積率とする。

本実施形態では、「 $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ 方位（裕度 10° 以内）の結晶方位を有する結晶粒の測定領域に対する面積率」、「 $\{hkl\}$ 方位（裕度 10° 以内）の結晶方位を有する結晶粒の測定領域に対する面積率」を、各々単に「 $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ 率」、「 $\{hkl\}$ 率」とも称する場合がある。結晶方位の記述においては裕度 10° 以内であるとする。

[0022] 各方位粒の面積率を求める測定条件の詳細は、次の通りである。

- ・測定装置：SEMの型番「JSM-6400（JEOL社製）」、EBSD検出器の型番「HIKARI（TSL社製）」、またはこれと同様の装置を使用
- ・ステップ間隔： $5.0 \mu m$
- ・倍率：100倍
- ・測定対象：表面から板厚の $1/2$ の深さの圧延面に平行な面
- ・測定領域： $1000 \mu m$ 以上 $\times 1000 \mu m$ 以上の矩形の領域

[0023]（化学組成）

また、本実施形態に係る積層コアが備える電磁鋼板の化学組成は限定されず、公知の範囲でよいが、上記の $\{411\} \langle 011 \rangle$ 率を得て、優れた磁気特性を得る場合、以下に示す化学組成とすることが好ましい。

以下の説明において、各元素の含有量の単位である「%」は、特に断りがない限り「質量%」を意味する。また、「～」を用いて表される数値範囲は、「～」の前後に記載される数値を下限値及び上限値として含む範囲を意味する。

[0024] 本実施形態に係る積層コアが備える電磁鋼板は、フェライトーオーステナイト変態（以下、 $\alpha-\gamma$ 変態）がある程度生じ得る化学組成（全体が γ に変態しなくても、加熱した際に一定量の γ が生じる化学組成）であって、C： 0.0100% 以下、Si： $1.50\% \sim 4.00\%$ 、sol. Al： $0.0001\% \sim 1.0000\%$ 、S： 0.0100% 以下、N： 0.0100

%以下、Mn、Ni、Cuからなる群から選ばれる1種以上：総計で2.50%～5.00%、Co：0.000%～1.000%、Sn：0.000%～0.400%、Sb：0.000%～0.400%、P：0.000%～0.400%、及びMg、Ca、Sr、Ba、Ce、La、Nd、Pr、Zn、及びCdからなる群から選ばれる1種以上：総計で0.0000%～0.0100%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ことが好ましい。さらに、Mn、Ni、Cu、Si、sol、AlおよびPの含有量が後述する所定の条件を満たすことが好ましい。不純物としては、鋳石やスクラップ等の原材料に含まれるもの、製造工程において含まれるもの、が例示される。

[0025] (C：0.0100%以下)

Cは、微細な炭化物が析出して粒成長を阻害することにより、鉄損を高めたり、磁気時効を引き起こしたりする元素である。従って、C含有量は低ければ低いほどよい。このような現象は、C含有量が0.0100%超で顕著である。このため、C含有量は0.0100%以下とすることが好ましい。C含有量は、より好ましくは0.0050%以下、さらに好ましくは0.0025%以下である。C含有量の下限は特に限定しないが、精錬時の脱炭処理のコストを踏まえ、C含有量は、0.0005%以上とすることが好ましい。

[0026] (Si：1.50%～4.00%)

Siは、電気抵抗を増大させて、渦電流損を減少させ、鉄損を低減したり、降伏比を増大させて、鉄心への打ち抜き加工性を向上させたりする元素である。Si含有量が1.50%未満では、これらの効果を十分に得られない。従って、上記効果を得る場合、Si含有量は1.50%以上とすることが好ましい。

一方、Si含有量が4.00%超では、磁束密度が低下したり、硬度の過度な上昇により打ち抜き加工性が低下したり、冷間圧延が困難になったりする。従って、Si含有量は4.00%以下とすることが好ましい。

[0027] (s o l. A l : 0. 0 0 0 1 % ~ 1. 0 0 0 0 %)

s o l. A l は、電気抵抗を増大させて、渦電流損を減少させ、鉄損を低減する元素である。s o l. A l は、飽和磁束密度に対する磁束密度 B 5 0 の相対的な大きさの向上にも寄与する元素である。ここで、磁束密度 B 5 0 とは、5 0 0 0 A / m の磁場における磁束密度である。s o l. A l 含有量が 0. 0 0 0 1 % 未満では、これらの作用効果を十分に得られない。また、A l には製鋼での脱硫促進効果もある。従って、s o l. A l 含有量は 0. 0 0 0 1 % 以上とすることが好ましい。s o l. A l 含有量は、より好ましくは 0. 0 0 1 0 % 以上、さらに好ましくは 0. 1 0 0 0 % 以上である。

一方、s o l. A l 含有量が 1. 0 0 0 0 % 超では、磁束密度が低下する。従って、s o l. A l 含有量は 1. 0 0 0 0 % 以下とすることが好ましい。

[0028] (S : 0. 0 1 0 0 % 以下)

S は、必須元素ではなく、例えば鋼中に不純物として含有される元素である。S は、微細な M n S として析出し、焼鈍における再結晶及び結晶粒の成長を阻害する。従って、S 含有量は低ければ低いほどよい。このような再結晶及び結晶粒成長の阻害による鉄損の増加および磁束密度の低下は、S 含有量が 0. 0 1 0 0 % 超で顕著である。このため、S 含有量は 0. 0 1 0 0 % 以下とすることが好ましい。S 含有量の下限は特に限定しないが、精錬時の脱硫処理のコストを踏まえ、S 含有量は、0. 0 0 0 3 % 以上とすることが好ましい。

[0029] (N : 0. 0 1 0 0 % 以下)

N は T i N や A l N などの微細な析出物の形成を通じて磁気特性を劣化させる元素である。そのため、N 含有量は低ければ低いほどよい。このような磁気特性の劣化は、N 含有量が 0. 0 1 0 0 % 超で顕著であるので、N 含有量は 0. 0 1 0 0 % 以下とすることが好ましい。N 含有量の下限は特に限定しないが、精錬時の脱窒処理のコストを踏まえ、N 含有量は、0. 0 0 1 0 % 以上とすることが好ましい。

[0030] (Mn、Ni、Cuからなる群から選ばれる1種以上：総計で2.50%～5.00%)

これらの元素は、 α - γ 変態を生じさせるために必要な元素である。これらの元素の少なくとも1種を総計で2.50%以上含有させることが好ましい。

一方で、これらの元素の含有量が総計で5.00%を超えると、コスト高となるだけでなく、磁束密度が低下する場合もある。したがって、これらの元素の少なくとも1種を総計で5.00%以下とすることが好ましい。

Mn、Ni、Cuのそれぞれの含有量は限定されないが、比抵抗の点で、好ましくは、Mn含有量は1.50%以上であることが好ましい。

[0031] また、 α - γ 変態が生じ、かつ良好な磁気特性を得る条件として、さらに以下の条件を満たす。つまり、Mn含有量(質量%)を[Mn]、Ni含有量(質量%)を[Ni]、Cu含有量(質量%)を[Cu]、Si含有量(質量%)を[Si]、sol. Al含有量(質量%)を[sol. Al]、P含有量(質量%)を[P]としたときに、以下の式(1)を満たすことが好ましい。

$$(2 \times [\text{Mn}] + 2.5 \times [\text{Ni}] + [\text{Cu}]) - ([\text{Si}] + 2 \times [\text{sol. Al}] + 4 \times [\text{P}]) \geq 1.50\% \quad \cdots (1)$$

前述の式(1)を満たさない場合には、 α - γ 変態が生じない、あるいは生じたとしても変態点が高いため、後述の製造方法を適用しても、十分な磁束密度が得られない場合がある。

[0032] 電磁鋼板の化学組成は、上記の元素を含み、残部がFe及び不純物(上記以外の不純物)からなることを基本とするが、残部のFeの一部に代えて、Co、Sn、Sb、P、Mg、Ca、Sr、Ba、Ce、La、Nd、Pr、Zn、及びCdの1種以上を以下に示す範囲で含有してもよい。これらの元素は必ずしも含有しなくてもよいので、下限は0%である。また、これらの元素は、意図的に添加されず、不純物として含有されていたとしても、許容される。

[0033] (C o : 0. 0 0 0 % ~ 1. 0 0 0 %)

C o は磁束密度を上げる元素である。そのため、必要に応じて含有させてもよい。

一方、C o が過剰に含まれるとコスト高となる。したがって、C o 含有量は 1. 0 0 0 % 以下とすることが好ましい。

[0034] (S n : 0. 0 0 0 % ~ 0. 4 0 0 %, S b : 0. 0 0 0 % ~ 0. 4 0 0 %)

S n や S b は冷間圧延、再結晶後の集合組織を改善して、磁束密度を向上させる元素である。そのため、これらの元素を必要に応じて含有させてもよい。磁気特性等のさらなる効果を付与する場合には、0. 0 2 0 % ~ 0. 4 0 0 % の S n 、及び 0. 0 2 0 % ~ 0. 4 0 0 % の S b からなる群から選ばれる 1 種以上を含有することが好ましい。

一方、これらの元素が過剰に含まれると鋼が脆化する。したがって、S n 含有量、S b 含有量はいずれも 0. 4 0 0 % 以下とする。

[0035] (P : 0. 0 0 0 % ~ 0. 4 0 0 %)

P は再結晶後の鋼板の硬度を確保するために有効な元素である。また、P は、磁気特性への好適な影響を有する元素でもある。そのため、含有させてもよい。これらの効果を得る場合には、P 含有量を 0. 0 2 0 % 以上とすることが好ましい。

一方、P が過剰に含まれると鋼が脆化する。したがって、P 含有量は 0. 4 0 0 % 以下とすることが好ましい。

[0036] (M g、C a、S r、B a、C e、L a、N d、P r、Z n 及び C d からなる群から選ばれる 1 種以上 : 総計で 0. 0 0 0 0 % ~ 0. 0 1 0 0 %)

M g、C a、S r、B a、C e、L a、N d、P r、Z n 及び C d は、溶鋼の casting 時に溶鋼中の S と反応して硫化物若しくは酸硫化物又はこれらの両方の析出物を生成する元素である。以下、M g、C a、S r、B a、C e、L a、N d、P r、Z n 及び C d を総称して「粗大析出物生成元素」ということがある。粗大析出物生成元素の析出物の粒径は 1 μ m ~ 2 μ m 程度であ

り、MnS、TiN、AlN等の微細析出物の粒径（100nm程度）よりはるかに大きい。このため、これら微細析出物は粗大析出物生成元素の析出物に付着し、中間焼鈍などの焼鈍における再結晶及び結晶粒の成長を阻害しにくくなる。これらの作用効果を十分に得るためには、これらの元素の総計が0.0005%以上であることが好ましい。より好ましくは0.0010%以上である。

一方、これらの元素の総計が0.0100%を超えると、硫化物若しくは酸硫化物又はこれらの両方の総量が過剰となり、中間焼鈍などの焼鈍における再結晶及び結晶粒の成長が阻害される。従って、粗大析出物生成元素の含有量は総計で0.0100%以下とすることが好ましい。

[0037] 化学組成については、鋼の一般的な分析方法によって測定すればよい。例えば、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、鋼板から採取した試験片を予め作成した検量線に基づいた条件で所定の測定装置にて測定することにより、化学組成が特定される。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。

電磁鋼板が、表面に絶縁被膜を有している場合には、研磨、またはミニターなどにより機械的に除去したのちに、分析に供すればよい。

[0038] 本実施形態に係る積層コアは、製造方法によらず、上記の特徴を有していれば、その効果が得られる。しかしながら、以下の方法に依れば、安定して製造できるので好ましい。

（I）電磁鋼板の表面に接着能を有する絶縁被膜を形成する、絶縁被膜形成工程

（II）絶縁被膜が形成された電磁鋼板を、必要に応じて所定の形状に打ち抜いた後、複数枚積層し、加熱圧着することで、積層コアとする、積層工程

以下、好ましい条件について説明する。説明しない条件については公知の条件を適用することができる。

[0039] <絶縁被膜形成工程>

絶縁被膜形成工程では、母材鋼板からなる電磁鋼板に対し、接着能を有する絶縁被膜を形成する。絶縁被膜は、片面のみに形成してもよいし、両面に形成してもよい。

絶縁被膜の形成は、母材鋼板に処理液を塗布した後、焼付を行うことで行う。焼付に際しては、単位℃で、絶縁被膜の硬化温度を T_r (℃)としたとき、材料の到達温度 T_{max} (℃)が 200°C 未満、かつ以下の式(4)を満足するように材料を加熱する。また昇温速度を $6.0^\circ\text{C}/\text{秒}$ 以下とし、材料温度が T_r 以上となる時間 t_r を $30\sim 60$ 秒とすることが好ましい。

$$T_r + 30 \leq T_{max} \leq T_r + 50 \quad (4)$$

[0040] 焼付の際の、材料の到達温度 T_{max} (℃)が 200°C 以上であると、樹脂が酸化することが懸念される。

また、 T_{max} が $T_r + 50^\circ\text{C}$ 超では過剰硬化により応力が増大し磁気特性が劣化し、 $T_r + 30^\circ\text{C}$ 未満では硬化不足により接着強度が低下する。

また、昇温速度が $6.0^\circ\text{C}/\text{秒}$ 超であると、好適に硬化が進行せず接着強度不足となる。一般には、昇温速度を遅くすると、炉長を長くしたり、ラインスピードを下げたりする必要性が生じ、設備制約や生産性の点で好ましくないと考えられている。しかしながら、本実施形態に係る積層コアの製造方法においては、昇温速度を遅くすることで上記の効果が得られるとの新たな知見に基づいて、あえて昇温速度を遅くしている。

[0041] ここで、硬化温度 T_r は、剛体振子型物性試験器で測定される対数減衰率が、硬化に伴って低下する温度とする。硬化反応の進行に伴い架橋構造が発現すると、振り子の運動が制限され、振り子の振れ周期が急激に低下する。したがって、振り子の振れ周期の変化に基づいて硬化温度 T_r を決定することができる。

対数減衰率は、ISO 12013-2に従い、シリンダーエッジの剛体振り子を用いた剛体振り子試験により、昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{秒}$ で測定される。対数減衰率を測定することにより、被膜の動的粘弾性を評価できる。対数減衰

率は、例えばエー・アンド・ディ製RPT-3000Wまたはこれと同等の剛体振子型物性試験器を用いて測定することができる。対数減衰率の測定温度範囲は適宜設定することができ、例えば、室温（25℃）から300℃とすることができる。

[0042] 接着能を有する絶縁被膜の形成に用いる処理液について、硬化後にある程度の剛直性を持ち、接着強度を確保でき、かつ硬化による鋼板への圧縮応力が少ないアクリル樹脂が固形分換算で処理液全体の90重量%以上であることが好ましい。その他の成分としては樹脂や無機塩、無機微粒子を含んでもよい。樹脂は例えば、エポキシ樹脂、ウレタン樹脂、フェノール樹脂等がある。無機塩は例えばリン酸塩、クロム酸塩、ホウ酸塩等がある。無機微粒子は例えば二酸化ケイ素、酸化チタン、酸化マグネシウム、水酸化ジルコニウム等がある。ただし、無機微粒子が発泡性の微粒子であると、絶縁被膜に気泡が生じ、被膜密着性が低下するので、発泡性の無機微粒子は使用しない。

また、接着強度の点から、無機微粒子は0.05質量%以下とすることが好ましい。

[0043] 処理液に含まれるアクリル樹脂としては、特に限定されない。アクリル樹脂に用いるモノマーとしては、例えば、アクリル酸、メタクリル酸等の不飽和カルボン酸、メチル（メタ）アクリレート、エチル（メタ）アクリレート、*n*-ブチル（メタ）アクリレート、イソブチル（メタ）アクリレート、シクロヘキシル（メタ）アクリレート、2-エチルヘキシル（メタ）アクリレート、2-ヒドロキシエチル（メタ）アクリレート、ヒドロキシプロピル（メタ）アクリレート等の（メタ）アクリレートを例示できる。（メタ）アクリレートとは、アクリレート又はメタクリレートを意味する。アクリル樹脂としては、1種を単独で使用してもよく、2種以上を併用してもよい。

[0044] <積層工程>

積層工程では、絶縁被膜が形成された電磁鋼板を、必要に応じて求められる所定の形状（ステータコア、ロータコアなどに適用する際に求められる形状）に打ち抜いた後、加熱圧着することで、積層コアとする。

その際、積層コアとした後の絶縁被膜の硬度を、 $200 \sim 300 \text{ MPa}$ とするために、圧着力を $10 \sim 60 \text{ kgf/cm}^2$ 、圧着温度 T_p ($^{\circ}\text{C}$) を以下の式 (2) が成立するような条件とすると好ましい。

$$T_r + 60 \leq T_p \leq T_r + 100 \quad (2)$$

[0045] また、積層される電磁鋼板において、 $A411-011$ を 15.0% 以上とする場合、以下の工程を有する製造方法を適用することができる。

以下、本実施形態において、 A_r3 温度、 A_r1 温度、 A_c1 温度 (いずれも単位は $^{\circ}\text{C}$) は、以下の方法で求めたものを用いる。

A_r3 温度及び A_r1 温度は、 $1^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ の平均冷却速度で冷却中の鋼材 (鋼板) の熱膨張変化から求め、 A_c1 温度は、 $1^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ の平均加熱速度で加熱中の鋼材 (鋼板) の熱膨張変化から求める。

[0046] <熱間圧延工程>

熱間圧延工程では、所定の化学組成 (好ましくは上述の化学組成) を満たす鋼材に対して熱間圧延を実施して熱間圧延鋼板を製造する。熱間圧延工程は、加熱過程と、圧延過程とを備える。

[0047] 鋼材は、例えば通常の連続 casting によって製造されるスラブであり、上述した化学組成の鋼材は周知の方法で製造される。たとえば、転炉又は電気炉等で溶鋼を製造する。製造された溶鋼に対して脱ガス設備等で二次精錬して、上記化学組成を有する溶鋼とする (その後の工程では化学組成は実質的に変化しない)。溶鋼を用いて連続 casting 法又は造塊法によりスラブを casting する。casting されたスラブを分塊圧延してもよい。

[0048] 加熱過程では、上述の化学組成を有する鋼材を $1000 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ に加熱することが好ましい。具体的には、鋼材を加熱炉又は均熱炉に装入して、炉内にて加熱する。加熱炉又は均熱炉での上記加熱温度での保持時間は特に限定されないが、例えば $1 \sim 200$ 時間である。

[0049] 圧延過程では、加熱過程により加熱された鋼材に対して、複数回パスの圧延を実施して、熱間圧延鋼板を製造する。ここで、「パス」とは、一対のワークロールを有する 1 つの圧延スタンドを鋼板が通過して圧下を受けること

を意味する。熱間圧延はたとえば、一列に並んだ複数の圧延スタンド（各圧延スタンドは一对のワークロールを有する）を含むタンデム圧延機を用いてタンデム圧延を実施して、複数回パスの圧延を実施してもよいし、一对のワークロールを有するリバース圧延を実施して、複数回パスの圧延を実施してもよい。生産性の観点から、タンデム圧延機を用いて複数回の圧延パスを実施するのが好ましい。

[0050] 圧延過程（粗圧延および仕上げ圧延）での圧延は、 γ 域（A r 3 温度以上）の温度で行うことが好ましい。つまり、仕上げ圧延の最終パスを通過する際の温度（仕上げ圧延温度 F T（℃））が A r 3 温度以上となるように熱間圧延を行うことが好ましい。

[0051] 仕上げ圧延温度 F T とは、熱間圧延工程中の上記圧延過程において、最終パスの圧下を行う圧延スタンド出側での鋼板の表面温度（℃）を意味する。仕上げ圧延温度 F T は、例えば最終パスの圧下を行う圧延スタンド出側に設置された測温計により、測温可能である。仕上げ圧延温度 F T は、例えば鋼板全長を圧延方向に 10 等分して 10 区分とした場合において、先端の 1 区分と、後端の 1 区分とを除いた部分の測温結果の平均値を意味する。

[0052] <冷却工程>

冷却工程では、熱間圧延工程後（仕上げ圧延完了後）の鋼板（熱間圧延鋼板）を冷却する。この冷却によってオーステナイトからフェライトへ変態することにより、高歪みで適度に微細な結晶粒が得られる。冷却条件としては、仕上げ圧延の最終パスを通過してから 0.10 秒後以降に（0.10 秒以上経過してから）冷却を開始し、3 秒後に熱間圧延鋼板の表面温度が 300℃ 以上 A r 1 温度以下となるように、冷却する（直後急冷しないようにする）ことが好ましい。このように直後急冷を回避することによって、特殊な急冷装置が不要となり、製造（コスト）上のメリットにもなる。また、熱間圧延鋼板の集合組織は、直後急冷すると未再結晶オーステナイトが変態した組織になり、その後に行う仕上げ焼鈍後の組織において {100} <011> 方位に集積した集合組織となりやすい。一方、直後急冷を行わない場合には

部分再結晶オーステナイトが変態した組織になり、その後の仕上げ焼鈍後の組織において $\{411\} \langle 011 \rangle$ 方位に集積しやすくなると推察される。すなわち、 $\{411\} \langle 011 \rangle$ 率を高めるためには部分再結晶オーステナイトを変態させることが重要であり、直後急冷を行わないことが好ましい。

また、冷却条件としては、冷間圧延前の熱間圧延鋼板での平均結晶粒径が $3 \sim 10 \mu\text{m}$ となるような条件とすることが好ましい。過度に微細化されることのない好適な結晶粒径において、その後冷間圧延を施すと、中間焼鈍後に α ファイバーが発達し、続くスキンプス、仕上げ焼鈍後に通常は発達しにくい $\{411\} \langle 011 \rangle$ 方位を発達させることができる。一方、結晶粒が粗大化しすぎると、冷間圧延、中間焼鈍後に α ファイバーが発達しにくくなり、所望の $\{411\} \langle 011 \rangle$ 率が得られない場合がある。

冷間圧延前の熱間圧延鋼板での平均結晶粒径を $3 \sim 10 \mu\text{m}$ とするためには、仕上げ圧延の最終パスを通過してから3秒以内に A_{r1} 温度以下の温度とすればよい。一方、冷却停止温度が、 300°C 未満であると、熱間圧延鋼板での平均結晶粒径が過度に微細化されることが懸念される。そのため、冷却停止温度を 300°C 以上とすることが好ましい。

[0053] 熱間圧延鋼板温度（特に仕上げ圧延温度）、仕上げ圧延の最終パスを通過してから3秒後の熱間圧延鋼板の表面温度は、次の方法で測定する。

電磁鋼板の製造に用いられる熱間圧延設備ラインにおいて、熱間圧延機の下流に、冷却装置及び搬送ライン（例えば搬送ローラ）が配置され、熱間圧延機 of 最終パスを実施する圧延スタンドの出側には、熱間圧延鋼板の表面温度を測定する測温計が配置され、圧延スタンドの下流に配置された搬送ローラにも、複数の測温計が搬送ラインに沿って配列されている場合、熱間圧延温度、仕上げ圧延の最終パスを通過してから3秒後の熱間圧延鋼板の表面温度は、熱間圧延設備ラインに配置されている測温計で測定すればよい。

冷却は、最終パスを実施する圧延スタンドの下流に配置されている冷却装置を用いて行う。水冷装置は一般に複数配置され、水冷装置の入側には、それぞれ測温計が配置されている。冷却装置はたとえば、周知の水冷装置であ

ってもよいし、周知の強制空冷装置であってもよい。好ましくは、冷却装置は水冷装置である。水冷装置の冷却液は、水であってもよいし、水と空気の混合流体であってもよい。

[0054] <冷間圧延工程>

冷間圧延工程では、熱間圧延鋼板に対して冷間圧延を行って冷間圧延鋼板を得る。熱間圧延鋼板には、冷間圧延後の α ファイバーを発達させるために、冷間圧延工程前に、熱延板焼鈍を行わないことが好ましい。ここでいう熱延板焼鈍とは、例えば、加熱温度が A_c1 温度以下であって、 300°C 以上の熱処理を意味する。

冷間圧延はたとえば、一列に並んだ複数の圧延スタンド（各圧延スタンドは一对のワークロールを有する）を含むタンデム圧延機を用いてタンデム圧延を実施して、複数回パスの圧延を実施してもよい。また、一对のワークロールを有するゼンジミア圧延機等によるリバース圧延を実施して、1回パス又は複数回パスの圧延を実施してもよい。生産性の観点から、タンデム圧延機を用いて複数回パスの圧延を実施するのが好ましい。

[0055] 冷間圧延では、冷間圧延途中で焼鈍処理を実施することなく冷間圧延を実施する。例えば、リバース圧延を実施して、複数回のパスにて冷間圧延を実施する場合、冷間圧延のパスとパスとの間に焼鈍処理を挟まずに複数回パスの冷間圧延を実施する。パスとパスの間に焼鈍を行うと、後述する工程で所望の方位を発達させることができない。

冷間圧延は、リバース式の圧延機を用いて、1回のパスのみで冷間圧延を実施してもよい。また、タンデム式の圧延機を用いた冷間圧延を実施する場合、複数回のパス（各圧延スタンドでのパス）で連続して冷間圧延を実施する。

[0056] 本実施形態では、 α ファイバーを発達させるため、冷間圧延における圧下率 $RR1$ （％）を $75\sim95\%$ とすることが好ましい。圧下率 $RR1$ は、より好ましくは $78\sim92\%$ である。ここで、圧下率 $RR1$ は、次のとおり定義される。

圧下率 $RR1$ (%) = $(1 - \text{冷間圧延での最終パスの圧延後の板厚} / \text{冷間圧延での1パス目の圧延前の板厚}) \times 100$

[0057] <中間焼鈍工程>

中間焼鈍工程では、冷間圧延工程後の鋼板（冷間圧延鋼板）に対し、中間焼鈍を行う。

本実施形態では、 300°C /秒以上の昇温速度で、 $600^{\circ}\text{C} \sim A_c1$ 温度以下の焼鈍温度（中間焼鈍温度 $T1$ ）（ $^{\circ}\text{C}$ ）まで昇温（加熱）する焼鈍を行うことが好ましい。

焼鈍温度までの昇温速度が 300°C /秒未満では、十分な回復が生じず、所望の集合組織が得られないことが懸念される。昇温速度は、好ましくは 400°C /秒以上である。昇温速度は速い方が、集合組織の形成には好ましいが、 2000°C /秒超の昇温速度を得る場合、特別な装置や制御が必要になるなど、コストが大幅に増加するので、昇温速度を 2000°C /秒以下としてもよい。より好ましくは、 1000°C /秒以下である。

昇温速度は、室温（例えば 25°C ）から、焼鈍温度までの温度変化を、昇温に要した時間で除することで算出される。

また、中間焼鈍の焼鈍温度が A_c1 温度を超えると、鋼板の組織の一部がオーステナイトに変態してしまい、変態にともなう結晶方位変化に起因して、続くスキンプス圧延および仕上げ焼鈍時に $\{411\} \langle 011 \rangle$ 方位粒が十分に成長せず、磁束密度が高くない場合がある。

一方、中間焼鈍の温度が低過ぎると、再結晶が生じず、続くスキンプス圧延および仕上げ焼鈍時に $\{411\} \langle 011 \rangle$ 方位粒が十分に成長せず、磁束密度が高くない場合がある。したがって、中間焼鈍温度 $T1$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）は 600°C 以上とすることが好ましい。

中間焼鈍温度 $T1$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）は、焼鈍炉の抽出口近傍での板温（表面の温度）とする。

中間焼鈍工程における中間焼鈍温度 $T1$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）での保持時間は当業者に周知の時間でよい。中間焼鈍温度 $T1$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）での保持時間は、例えば $5 \sim 60$

秒であるが、これに限定されない。

また、中間焼鈍時の雰囲気は特に限定されないが、例えば、体積率で20%の H_2 を含有し、残部が N_2 からなる雰囲気ガス（乾燥）を用いる。中間焼鈍後の鋼板の冷却速度は特に限定されず、例えば5.0～60.0℃/秒である。

[0058] <スキンプス圧延工程>

スキンプス圧延工程では、中間焼鈍工程後の冷間圧延鋼板に対して、常温、大気中において、圧延（冷間圧延）を実施する。ここでのスキンプス圧延は、例えば上述のゼンジミア圧延機に代表されるリバース圧延機、又は、タンデム圧延機を用いる。

スキンプス圧延工程では、途中で焼鈍処理を実施することなく圧延を実施する。例えば、リバース圧延を実施して、複数回のパスにてスキンプス圧延を実施する場合、パス間に焼鈍処理を挟まずに実施する。リバース式の圧延機を用いて、1回のパスのみでスキンプス圧延を実施してもよい。また、タンデム式の圧延機を用いたスキンプス圧延を実施する場合、複数回のパス（各圧延スタンドでのパス）で連続して圧延を実施する。

本実施形態では、熱間圧延および冷間圧延により鋼板にひずみを導入した後、中間焼鈍により鋼板に導入されたひずみをいったん低減させる。そして、スキンプス圧延を実施する。これにより、冷間圧延により過剰に導入されたひずみを中間焼鈍において低減しつつ、中間焼鈍を実施することにより、鋼板板面中において $\{111\}$ 粒が優先的に再結晶を起こすのを抑制して、 $\{411\}$ <011>結晶方位粒を残存させる。そして、スキンプス圧延において鋼板中の各結晶粒に適切なひずみ量を導入して、次工程の仕上げ焼鈍において、バルジングによる粒成長を発生しやすい状態にする。

スキンプス圧延における圧下率RR2は、10～15%とすることが好ましい。圧下率RR2が10%未満だとひずみ量が小さくなりすぎ、バルジングによる粒成長にかかる仕上げ焼鈍時間が長くなる。一方、圧下率RR2が15%を超えるとひずみ量が大きくなりすぎ、バルジングではなく通常の粒

成長が起こり、仕上げ焼鈍で {4 1 1} <1 4 8>や {1 1 1} <1 1 2>が成長してしまう。

[0059] ここで、圧下率 R R 2 は、次のとおり定義される。

圧下率 R R 2 (%) = (1 - スキンパス圧延での最終パスの圧延後の板厚 / スキンパス圧延での1パス目の圧延前の板厚) × 100

[0060] スキンパス圧延でのパス回数は1回パスのみ（つまり、1回の圧延のみ）であってもよいし、複数回パスの圧延であってもよい。

本実施形態において実施するスキンパス圧延は、仕上げ焼鈍後に行うスキンパス圧延とは効果が大きく異なる。熱間圧延、冷却、冷間圧延、中間焼鈍、スキンパス圧延、仕上げ焼鈍を所定の条件でこの順で行うことで、所定の組織を得ることができる。

[0061] <仕上げ焼鈍工程>

仕上げ焼鈍工程では、スキンパス圧延工程後の鋼板に対し、750℃以上 A c 1 温度以下の焼鈍温度 T 2 (℃) で、2時間以上保持する焼鈍を行う。仕上げ焼鈍温度 T 2 (℃) を750℃未満とした場合には、バルジングによる粒成長が十分に起こらないことが懸念される。この場合、{4 1 1} <0 1 1>方位の集積度が低下してしまう。

一方、仕上げ焼鈍温度 T 2 (℃) が A c 1 温度超では、鋼板の組織の一部がオーステナイトに変態してしまい、バルジングによる粒成長は起こらず、所望の {4 1 1} <0 1 1>率が得られない。

また、焼鈍時間が2時間未満である場合は、仕上げ焼鈍温度 T 2 (℃) が750℃以上 A c 1 温度以下であっても、バルジングによる粒成長が十分に起こらず、{4 1 1} <0 1 1>方位の集積度が低下してしまうことが懸念される。

一方、仕上げ焼鈍の焼鈍時間は特に限定されないが、焼鈍時間が10時間を超えても効果が飽和するため、10時間以下としてもよい。

[0062] 仕上げ焼鈍工程における仕上げ焼鈍温度 T 2 までの昇温速度 T R 2 は、当業者に周知の昇温速度であればよい。40℃/時間以上、200℃/時間未

満が例示されるが、この範囲に限定されない。

[0063] 昇温速度 TR_2 は、次の方法により求める。

上記化学組成を有し、上記熱間圧延からスキnpasまで実施して得られた鋼板に熱電対を取り付けて、サンプル鋼板とする。熱電対を取り付けたサンプル鋼板に対して昇温を実施して、昇温を開始してから仕上げ焼鈍温度 T_2 に到達するまでの時間を測定する。測定された時間に基づいて、昇温速度 TR_2 を求める。

[0064] 仕上げ焼鈍工程時の雰囲気は特に限定されない。仕上げ焼鈍工程時の雰囲気には、例えば体積率で 20% H_2 を含有し、残部が N_2 からなる雰囲気ガス（乾燥）や、100% 水素（ H_2 ）雰囲気などとすればよい。仕上げ焼鈍後の鋼板の冷却速度は特に限定されない。冷却速度は、例えば 5 ~ 20 °C / 秒である。

[0065] 電磁鋼板の製造方法では、たとえば、上記製造工程のうち、冷却工程後であって、冷間圧延工程前に、ショットブラスト及び／又は酸洗を実施してもよい。ショットブラストでは、熱間圧延後の鋼板に対してショットブラストを実施して、熱間圧延後の鋼板の表面に形成されているスケールを破壊して除去する。酸洗では、熱間圧延後の鋼板に対して酸洗処理を実施する。酸洗処理はたとえば、塩酸水溶液を酸洗浴として利用する。酸洗により鋼板の表面に形成されているスケールが除去される。冷却工程後であって、冷間圧延工程前に、ショットブラストを実施して、次いで、酸洗を実施してもよい。また、冷却工程後であって冷間圧延工程前に、酸洗を実施して、ショットブラストを実施しなくてもよい。冷却工程後であって冷間圧延工程前に、ショットブラストを実施して、酸洗処理を実施しなくてもよい。ショットブラスト及び酸洗は任意の工程である。したがって、ショットブラスト工程及び酸洗工程の両方を実施しなくてもよい。

[0066] <下地層形成工程>

本実施形態による電磁鋼板の製造方法は、仕上げ焼鈍工程後にコーティングによって、仕上げ焼鈍後の鋼板（電磁鋼板）の表面に、被膜（下地層）を

形成してもよい。例えば、クロム酸含有処理剤、リン酸塩含有処理剤等の一般的な処理剤を塗布し、焼付けることによって被膜を形成すればよい。

実施例

[0067] 溶鋼を鑄造することにより、表 1 に示す化学組成を有するインゴットを作製した。表 1 において、式 (1) 左辺とは、前述の式 (1) の左辺の値を表している。また、Mg 等の粗大析出物生成元素は、Mg、Ca、Sr、Ba、Ce、La、Nd、Pr、Zn、Cd からなる群から選ばれる 1 種以上の総計を表している。

鋼板 No. e については、 α が安定であり、 $\alpha-\gamma$ 変態が起こらない成分系であった。

この作製したインゴットを 1150℃ まで加熱して、1 時間保持した後、熱間圧延を行い、仕上げ圧延温度 FT が表 2 に示す温度となるように仕上げ圧延を行った。

熱間圧延完了後（最終パスを通過してから）、冷却開始までの時間を表 2 に示す通りとし、冷却開始から 3 秒後の鋼板の温度が、表 2 に示す温度となるように冷却を行い、その温度で冷却を停止した。

このようにして得られた熱間圧延鋼板に対し、熱延板焼鈍を行わず、酸洗によりスケールを除去し、表 2 に示す圧下率 RR1 で冷間圧延を行い板厚が 0.30mm の鋼板とした。

そして、体積率で、水素が 20% かつ窒素が 80% からなる雰囲気中で、表 2 に示す昇温速度で、表 2 に示す中間焼鈍温度 T1 まで加熱し、T1 で 30 秒間保持する中間焼鈍を行った。

中間焼鈍後の鋼板に対し、表 2 に示す圧下率 RR2 でスキンプス圧延を行った。

次に、スキンプス圧延後の鋼板を、水素 100% の雰囲気中で昇温速度を 100℃/時間、表 1 に示す仕上げ焼鈍温度 T2 にて仕上げ焼鈍を行った。この時、仕上げ焼鈍温度 T2 での保持時間を 2 時間とした。

仕上げ焼鈍後に表 3 に示す条件にて焼付けを行い、鋼板の表面に、絶縁被

膜を形成した。

[0068] 上記の方法で得られた絶縁被膜を有する電磁鋼板から、30 mm×60 mmの鋼板を2枚切り出し、10 mm×30 mmの面積が重なるように、板厚方向に鋼板を重ねた。

その後、表3に示す条件で熱圧着した。

[0069] 熱圧着した電磁鋼板について、上述の方法にて絶縁被膜の厚さ、硬度、重量平均分子量を測定した。

[0070] また、上記とは別に、表面に絶縁被膜を有する電磁鋼板から30 mm×60 mmの鋼板を2枚切り出し、10 mm×30 mmの面積が重なるように、板厚方向に鋼板を重ねた。

その後、表3に示す条件で熱圧着した。

[0071] [接着強度]

接着強度は、以下の方法で測定した。

<分析装置>

オートグラフAGS-10kNX

<測定条件>

引張形態：せん断引張試験

引張温度：25℃

引張速度：10 mm/min

測定は、n=5で破断まで引張試験を行い、破断までの最大強度の平均値を、接着強度とした。

結果を表4に示す。

接着強度が10.0 MPa以上であれば十分な接着強度を持つと判断した。

[0072] また、上記とは別に、表面に絶縁被膜を有する電磁鋼板から55 mm×55 mmの鋼板を3枚切り出し、このうち、2枚を全面が重なるように、接着剤を塗布した後、板厚方向に鋼板を重ねた。その後、表3に示す条件で熱圧着した。

[0073] [磁気特性]

得られた電磁鋼板の、磁気特性の劣化割合について、以下の方法で測定した。

まず、切り出した後重ね合わせた2枚とは別の、1枚について、JISC 2556 (2015) に沿って、圧延方向から0° 方向、90° 方向の鉄損 $W10/400$ (W/Kg) を測定し、その平均値を、接着無しでの鉄損 $W1$ とした。

その後、接着した電磁鋼板について、JISC 2556 (2015) に沿って、圧延方向から0° 方向、90° 方向の鉄損 $W10/400$ (W/Kg) を測定し、その平均値を、接着後の鉄損 $W2$ とした。

この $W1$ 、 $W2$ から以下の式に基づいて、鉄損劣化率 Wa (%) を算出した。

$$Wa = (W2 - W1) / W1 \times 100$$

結果を表4に示す。

Wa が10.0%以下であれば、磁気特性の劣化が抑制されたと判断した。

[0074]

[表1]

鋼板 No.	化学組成 (残部はFe及び不純物)													Mn+ Ni+Cu [mass%]	式 (1) 左辺
	C	Si	sol. Al	S	N	Mn	Ni	Cu	Co	Sn	Sb	P	Mg等 粗大析出物 生成元素		
	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]	[mass%]		
a	0.0018	2.50	0.0050	0.0018	0.0011	3.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.020	0.0000	3.00	3.41
b	0.0012	2.40	0.1200	0.0015	0.0014	2.80	0.20	0.00	0.000	0.030	0.010	0.010	0.0040	3.00	3.42
c	0.0009	2.50	0.8000	0.0008	0.0008	4.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.110	0.100	0.0000	4.00	3.50
d	0.0012	2.60	0.5000	0.0015	0.0014	2.60	0.00	0.15	0.000	0.150	0.000	0.000	0.0000	2.75	1.75
e	0.0018	2.50	0.3000	0.0018	0.0011	2.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.020	0.0000	2.00	0.82
f	0.0018	2.50	0.0050	0.0018	0.0011	3.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.020	0.0000	3.00	3.41
g	0.0034	2.50	0.0050	0.0018	0.0019	3.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.020	0.0000	3.00	3.41
h	0.0022	3.43	0.0200	0.0042	0.0023	3.70	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.006	0.0050	3.70	3.91

[0075]

[表2]

鋼板 No.	変態点			熱間 圧延工程	冷却工程		冷間 圧延工程	中間焼鈍工程		スキムパス 圧延工程	仕上げ 焼鈍工程	集合組織
	Ar3 温度	Ar1 温度	Ac1 温度	仕上げ 圧延温度 FT	冷却開始 までの 時間	3秒後 温度	圧下率 RR1	昇温速度	焼鈍温度 T1	圧下率 RR2	焼鈍温度 T2	A411-011
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[秒]	[°C]	[%]	[°C/秒]	[°C]	[%]	[°C]	[%]
a	812	779	932	950	0.10	700	88	500	700	15	800	47.9
b	809	777	929	950	0.50	400	88	1200	700	15	800	51.9
c	787	759	908	850	0.12	600	88	300	700	15	800	49.2
d	918	953	1059	950	0.50	400	88	800	700	15	800	49.3
e	-	-	-	950	0.10	700	88	600	700	15	800	8.7
f	812	779	932	650	0.10	550	88	300	700	15	800	12.4
g	812	779	932	950	0.00	200	88	400	700	15	800	14.3
h	805	699	897	950	0.10	500	88	500	700	0	800	12.8

[0076]

[表3]

製造 No.	製造条件								
	鋼板 No.	絶縁被膜形成の 処理液の組成 (固形分)	電磁鋼板の 表面粗度Ra (μm)	絶縁被膜の 硬化温度Tr ($^{\circ}\text{C}$)	焼付け時の 材料到達 温度Tmax ($^{\circ}\text{C}$)	昇温速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)	材料温度が Tr以上の 時間tr (秒)	圧着力 (kgf/cm^2)	圧着 温度 Tp ($^{\circ}\text{C}$)
1	a	アクリル樹脂	0.32	122	167	3.2	55	30	202
2	b	アクリル樹脂+ 5wt%エポキシ樹脂	0.51	138	173	3.2	48	30	218
3	c	アクリル樹脂+1wt%AlPO ₄	0.47	131	171	3.2	45	30	211
4	d	アクリル樹脂+0.05wt%MgO	0.61	127	159	3.2	36	30	207
5	e	アクリル樹脂	0.32	122	157	3.2	55	30	212
6	a	アクリル樹脂	0.32	122	212	4.2	55	30	217
7	b	アクリル樹脂	0.32	122	172	1.7	120	30	202
8	c	アクリル樹脂	0.32	122	167	8.5	20	30	202
9	e	アクリル樹脂	0.32	122	132	3.2	55	20	187
10	f	アクリル樹脂	0.32	122	162	3.2	55	5	187
11	g	アクリル樹脂	0.32	122	162	3.2	55	20	152
12	h	アクリル樹脂	0.32	122	162	3.2	55	30	272
13	a	エポキシ樹脂+ 5wt%アクリル樹脂	0.32	122	162	3.2	55	30	202
14	b	ウレタン樹脂	0.32	147	187	3.2	55	30	227
15	c	メラミン樹脂	0.32	166	206	3.2	55	30	246
16	d	フェノール樹脂	0.32	193	233	3.2	55	30	273

[0077]

[表4]

製造 No.	接着コア						電磁鋼板
	鋼板 No.	絶縁被膜の 硬度 (MPa)	絶縁被膜の 重量 平均分子量	絶縁被膜の 厚さ (μm)	接着強度 (MPa)	磁気特性 (W10/400)の 劣化割合Wa (%)	鉄損 (W10/400) W1 (W/Kg)
1	a	236	42070	2.7	14.7	5.4	12.9
2	b	265	31644	1.9	13.5	6.3	13.2
3	c	281	58764	2.1	11.5	8.1	13.4
4	d	225	26108	2.5	12.2	5.2	13.3
5	e	242	48647	2.8	13.8	8.3	14.3
6	a	<u>321</u>	143290	2.7	3.2	12.2	12.9
7	b	<u>311</u>	86731	2.7	8.9	11.1	13.2
8	c	<u>173</u>	5899	2.7	4.7	6.2	13.4
9	e	<u>159</u>	5438	2.7	3.8	5.9	14.3
10	f	<u>188</u>	7536	2.7	4.4	6.8	14.5
11	g	<u>167</u>	6431	2.7	3.1	7.7	13.0
12	h	<u>181</u>	123057	2.7	2.5	7.5	14.3
13	a	<u>328</u>	1191	2.7	13.6	13.3	12.9
14	b	<u>338</u>	5167	2.7	14.3	13.7	13.2
15	c	<u>356</u>	1876	2.7	15.1	14.5	13.4
16	d	<u>372</u>	167841	2.7	14.5	15.7	13.3

[0078] 表1～4から分かるように、本発明例である製造No. 1～5では、電磁鋼板の組成、製造条件および絶縁被膜の組成、製造条件が本発明範囲内にあり、絶縁被膜の硬度が本発明範囲にあり、接着強度が高く、磁気特性劣化が小さかった。

これに対し、比較例である、製造No. 6～16では、所定の絶縁被膜を有しておらず、接着強度または磁気特性の劣化割合が目標を下回った。

産業上の利用可能性

[0079] 本発明によれば、高い接着強度と優れた磁気特性とを有する積層コアを提供することができる。このコアは、回転電機等に使用でき、産業上の利用可

能性が高い。

符号の説明

- [0080] 1 積層コア
- 2 1 電磁鋼板（母材鋼板）
- 2 2 絶縁被膜

請求の範囲

- [請求項1] 互いに積層された複数の電磁鋼板と、
積層方向に隣り合う前記電磁鋼板同士の間設けられ、前記電磁鋼板同士をそれぞれ接着する絶縁被膜と、を備え、
前記絶縁被膜の硬度が200～300MPaである、
積層コア。
- [請求項2] 前記絶縁被膜の、ゾル分の重量平均分子量が10000～100000である、
請求項1に記載の積層コア。
- [請求項3] 前記複数の電磁鋼板は、表面から板厚の1/2の深さの圧延面に平行な面をSEM-EBSDで測定した際の{h k l} <u v w>方位の結晶粒の全視野に対する面積率をA h k l - u v wと表記したとき、A 4 1 1 - 0 1 1が15.0%以上である、
請求項1または2に記載の積層コア。
- [請求項4] 前記電磁鋼板の化学組成が、質量%で、
C : 0.0100%以下、
Si : 1.50%～4.00%、
sol. Al : 0.0001%～1.0000%、
S : 0.0100%以下、
N : 0.0100%以下、
Mn、Ni、Cuからなる群から選ばれる1種以上 : 総計で2.50%～5.00%、
Co : 0.000%～1.000%、
Sn : 0.000%～0.400%、
Sb : 0.000%～0.400%、
P : 0.000%～0.400%、及び
Mg、Ca、Sr、Ba、Ce、La、Nd、Pr、Zn、Cdからなる群から選ばれる1種以上 : 総計で0.0000%～0.010

0%、

を含有し、

質量%での、Mn含有量を[Mn]、Ni含有量を[Ni]、Cu含有量を[Cu]、Si含有量を[Si]、sol. Al含有量を[sol. Al]、P含有量を[P]としたときに、以下の式(1)を満たし、

残部がFeおよび不純物からなる、

請求項3に記載の積層コア。

$$(2 \times [\text{Mn}] + 2.5 \times [\text{Ni}] + [\text{Cu}]) - ([\text{Si}] + 2 \times [\text{sol. Al}] + 4 \times [\text{P}]) \geq 1.50\% \quad \cdots (1)$$