

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6569803号
(P6569803)

(45) 発行日 令和1年9月4日 (2019.9.4)

(24) 登録日 令和1年8月16日 (2019.8.16)

(51) Int. Cl.	F 1
C 2 1 D 8/12 (2006.01)	C 2 1 D 8/12 D
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

請求項の数 8 (全 36 頁)

(21) 出願番号	特願2018-509660 (P2018-509660)	(73) 特許権者	000006655
(86) (22) 出願日	平成29年3月31日 (2017.3.31)		日本製鉄株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/013622		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(87) 国際公開番号	W02017/171013	(74) 代理人	100090273
(87) 国際公開日	平成29年10月5日 (2017.10.5)		弁理士 國分 孝悦
審査請求日	平成30年8月20日 (2018.8.20)	(72) 発明者	水村 崇人
(31) 優先権主張番号	特願2016-73151 (P2016-73151)		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新
(32) 優先日	平成28年3月31日 (2016.3.31)		日鐵住金株式会社内
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)	(72) 発明者	高橋 史明
			東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新
			日鐵住金株式会社内
		(72) 発明者	溝上 雅人
			東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新
			日鐵住金株式会社内

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】

延在方向が圧延方向と交差し、且つ深さ方向が板厚方向と平行な溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備え、

前記鋼板の表面の前記溝の両側に前記溝と平行に連なる溶融凝固物が存在し、

前記溝を含む特定領域内の前記鋼板表面を一定の間隔で測定した高さデータの高さ分布において最大度数となる高さを仮想平面とし、前記仮想平面より凹んだ凹部の空間体積を $V1$ とし、前記仮想平面よりも突出した凸部の体積を $V2$ としたとき、 $V2/V1$ の値が 0.10 超 0.80 未満であり、

前記特定領域内に複数の突起が形成されており、前記複数の突起のうちで、前記溝に最も近い突起の幅が他の突起の幅よりも大きく、

前記高さ分布において前記延在方向の平均高さが最も高い領域を延在方向及び板厚方向を含む溝長手断面で視た場合に、

当該領域の表面を成す粗さ曲線の平均粗さ Ra が、 $0.30 \sim 2.00 \mu m$ であり、

当該領域の表面を成す粗さ曲線要素の平均長さ RSm が、 $10 \sim 150 \mu m$ であることを特徴とする方向性電磁鋼板。

【請求項 2】

前記の高さデータにおいて 0.02% 番目となる高さが、 1 超 $\sim 10 \mu m$ であることを特徴とする請求項 1 に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 3】

10

20

前記溝周辺の鋼板表面形状を、溝延在方向と垂直な溝短手断面で視た場合に、前記凸部のうち、前記溝に最も近い突起の端部 T_{1s} と前記溝の端部 m との距離 L_s が、 $0 \sim 40 \mu m$ であることを特徴とする請求項1又は2に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項4】

前記複数の突起のうちで、前記溝に最も近い突起の幅 W_1 が、 $40 \mu m$ 以下であることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項5】

前記複数の突起のうちで、前記溝に最も近い突起の幅を W_1 、第 n 番目（ n は2以上の整数）に近い突起の幅を W_n と表したとき、 W_n / W_1 の値が $0.20 \sim 1.00$ 未満であることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

10

【請求項6】

前記溝延在方向に垂直な断面において最も高い突起の底に存在する結晶粒の数が平均で 10.0 個以下であることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項7】

前記高さ分布において前記延在方向の平均高さが最も高い領域内の突起の金属組織の結晶方位について、 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 方位の面積率が 65% 以上であることを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項8】

前記凸部表面及び溝表面を含む前記鋼板表面上に、ガラス皮膜を備えていることを特徴とする請求項1乃至7のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

20

【発明の詳細な説明】

【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】

従来から、変圧器の鉄芯（コア）用の鋼板として、特定の方向に優れた磁気特性を発揮する方向性電磁鋼板が知られている。この方向性電磁鋼板は、冷間圧延と焼鈍との組み合わせによって、結晶粒の磁化容易軸と圧延方向とが一致するように結晶方位が制御された鋼板である。方向性電磁鋼板の鉄損は可能な限り低いことが望ましい。

30

【0003】

鉄損を低減するために、上記のように結晶方位が制御された鋼板（母鋼板）の表面に絶縁皮膜が形成された方向性電磁鋼板が知られている。この絶縁皮膜は、電氣的絶縁性だけでなく、張力及び耐熱性、さらに耐錆性等を鋼板に与える役割も担っている。

【0004】

この他に鉄損を低減するための方法として、鋼板の表面に圧延方向と交差する方向に延びる溝を、圧延方向に沿って所定間隔で形成することにより、磁区を細分化し磁壁移動を容易にすることで鉄損を低減する磁区制御法が知られている。

【0005】

40

鋼板表面に溝を形成する方法として、化学的エッチングを行う方法（特許文献1）及びレーザー照射法（特許文献2～5）等の方法が知られている。

【0006】

化学的エッチングで溝を形成する場合、設備導入に関する費用が膨大となる一方で、レーザー照射法によれば、比較的、容易且つ安定的に鋼板表面に溝を形成することができる。絶縁被膜を形成した後にレーザー照射を行って溝を形成する方法が特許文献3～5に記載されている。

【0007】

しかしながら、この方法では、溝の形成に伴う絶縁皮膜の消失は避けることができない。絶縁皮膜が消失すると、錆が発生しやすくなる。溝の形成後に絶縁皮膜を形成すること

50

で耐錆性を向上することが可能であるが、コストが増加してしまう。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開平6-100939号公報

【特許文献2】特開平6-57335号公報

【特許文献3】特許第5234222号公報

【特許文献4】特開2012-177164号公報

【特許文献5】特開2012-87332号公報

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

溝の形成に伴う絶縁皮膜の消失を回避するために、絶縁皮膜の形成前に溝を形成することも考えられる。しかしながら、この方法では、レーザ照射部で溶解飛散した熔融鉄が溝周辺の鋼板表面に付着してしまう。熔融鉄が平坦な鋼板表面に付着すると、そこに突起が生じる。そして、突起が形成された鋼板に絶縁皮膜を形成すると、絶縁皮膜に種々の問題が生じる。例えば、突起が大きい場合には、突起が絶縁皮膜から露出したり、突起周辺の絶縁皮膜の薄い部分にクラック又は剥離が生じたりすることがある（特許文献2）。また、このような突起は、積層鉄芯内で隣り合う方向性電磁鋼板間の密な接触を妨げ、占積率の低下及びビルディングファクタの劣化を招き、騒音を増大させる。

20

【0010】

本発明は、コストの上昇を回避しながら、絶縁性及び耐錆性を向上することができ、積層鉄芯の騒音を低減することができる磁区細分化のための溝が表面に形成された方向性電磁鋼板を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の要旨は以下の通りである。

【0012】

(1)

延在方向が圧延方向と交差し、且つ深さ方向が板厚方向と平行な溝が形成された鋼板表面を有する鋼板を備え、

30

前記鋼板の表面の前記溝の両側に前記溝と平行に連なる熔融凝固物が存在し、

前記溝を含む特定領域内の前記鋼板表面を一定の間隔で測定した高さデータの高さ分布において最大度数となる高さを仮想平面とし、前記仮想平面より凹んだ凹部の空間体積を $V1$ とし、前記仮想平面よりも突出した凸部の体積を $V2$ としたとき、 $V2/V1$ の値が 0.10 超 0.80 未満であり、

前記特定領域内に複数の突起が形成されており、前記複数の突起のうちで、前記溝に最も近い突起の幅が他の突起の幅よりも大きく、

前記高さ分布において前記延在方向の平均高さが最も高い領域を延在方向及び板厚方向を含む溝長手断面で視た場合に、

40

当該領域の表面を成す粗さ曲線の平均粗さ Ra が、 $0.30 \sim 2.00 \mu m$ であり、

当該領域の表面を成す粗さ曲線要素の平均長さ RSm が、 $10 \sim 150 \mu m$ であることを特徴とする方向性電磁鋼板。

【0013】

(2)

前記の高さデータにおいて 0.02% 番目となる高さが、 $1 \sim 10 \mu m$ であることを特徴とする(1)に記載の方向性電磁鋼板。

【0014】

(3)

前記溝周辺の鋼板表面形状を、溝延在方向と垂直な溝短手断面で視た場合に、

50

前記凸部のうち、前記溝に最も近い突起の端部 T_{1s} と前記溝の端部 m との距離 L_s が、 $0 \sim 40 \mu m$ であることを特徴とする(1)又は(2)に記載の方向性電磁鋼板。

【0015】

(4)

前記複数の突起のうち、前記溝に最も近い突起の幅 W_1 が、 $40 \mu m$ 以下であることを特徴とする(1)～(3)のいずれかに記載の方向性電磁鋼板。

【0016】

(5)

前記複数の突起のうち、前記溝に最も近い突起の幅を W_1 、第 n 番目(n は2以上の整数)に近い突起の幅を W_n と表したとき、 W_n/W_1 の値が $0.20 \sim 1.00$ 未満であることを特徴とする(1)～(4)のいずれかに記載の方向性電磁鋼板。

10

【0017】

(6)

前記溝延在方向に垂直な断面において最も高い突起の底に存在する結晶粒の数が平均で 10.0 個以下であることを特徴とする(1)～(5)のいずれか1項に記載の方向性電磁鋼板。

【0018】

(7)

前記高さ分布において前記延在方向の平均高さが最も高い領域内の突起の金属組織の結晶方位について、 $\{100\} <001>$ 方位の面積率が 65% 以上であることを特徴とする(1)～(6)のいずれかに記載の方向性電磁鋼板。

20

【0019】

(8)

前記凸部表面及び溝表面を含む前記鋼板表面上に、ガラス皮膜を備えていることを特徴とする(1)～(7)のいずれかに記載の方向性電磁鋼板。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、鋼板表面に適切な突起が形成されているため、溝が表面に形成された方向性電磁鋼板において、コストの上昇を回避しながら、絶縁性及び耐錆性を向上することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1A】図1Aは、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板を示す平面模式図である。

【図1B】図1Bは、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板を示す断面模式図である。

【図2A】図2Aは、発明例の方向性電磁鋼板の溝周辺の高さ分布図である。

【図2B】図2Bは、図2Aを3次元的に表した図である。

【図3A】図3Aは、比較例の方向性電磁鋼板の溝周辺の高さ分布図である。

【図3B】図3Bは、図3Aを3次元的に表した図である。

【図4A】図4Aは、本発明の実施形態の方向性電磁鋼板の溝を、溝延在方向 Y に直交する断面で見た断面模式図である。

40

【図4B】図4Bは、図4Aの部分拡大図である。

【図5】図5は、比較例の方向性電磁鋼板の溝を、溝延在方向 Y に直交する断面で見た断面模式図である。

【図6】図6は、本発明の実施形態の方向性電磁鋼板の突起を、溝延在方向 Y 及び板厚方向 Z を含む断面で見た断面模式図である。

【図7A】図7Aは、結晶粒の数を測定する箇所を示す図である。

【図7B】図7Bは、結晶粒の数を測定する線分を示す図である。

【図8】図8は、本発明の実施形態の方向性電磁鋼板の製造方法を説明する工程図である。

【図9A】図9Aは、レーザ照射による溶融鉄の発生を示す模式図である。

50

【図 9 B】図 9 B は、溶融鉄の凝固に伴う凸部の形成を示す模式図である。

【図 9 C】図 9 C は、特定物質が塗布されている場合のレーザ照射による溶融鉄の発生を示す模式図である。

【図 9 D】図 9 D は、特定物質が塗布されている場合の溶融鉄の凝固に伴う凸部の形成を示す模式図である。

【図 10 A】図 10 A は、巻鉄心の寸法を示す図である。

【図 10 B】図 10 B は、巻鉄心の寸法を示す図である。

【図 11】図 11 は、試験 No. 1-23 の鋼板を示す断面模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

10

以下、本発明の実施形態について詳細に説明する。図 1 A は、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板を示す平面図であり、図 1 B は、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板を示す断面図である。

【0023】

図 1 A 及び図 1 B に示すように、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板 10 は、その表面に溝 5 が設けられた鋼板 1 と、この鋼板 1 の鋼板表面に形成された皮膜 2 とを備えている。皮膜 2 は、例えば絶縁被膜であり、ガラス皮膜を含んでいてもよい。図 1 において、鋼板 1 の圧延方向を X 方向、溝 5 の延在方向を Y 方向、鋼板 1 の板厚方向を Z 方向、Y 方向及び Z 方向に直交する方向を Q 方向と定義する。ただし、溝 5 の延在方向 Y は図示した方向に限られるものではなく、圧延方向 X と交差する方向であればよい。

20

【0024】

図 1 A に示すように、鋼板 1 の表面には、磁区細分化のために、延在方向 Y が圧延方向 X と交差し、且つ溝深さ方向が板厚方向 Z と平行な複数の溝 5 が、圧延方向 X に沿って所定間隔で形成されている。鋼板 1 の表面の溝 5 の両側に溝 5 と平行に連なる溶融凝固物 8 が存在する。溝 5 は、板厚方向 Z から視た場合、つまり溝 5 を平面視した場合、に、直線形状である必要はなく、曲線部を有していても良く、弓状の形状を有してもよい。ただし、本実施形態では、説明の便宜上、直線形状を有する溝 5 を例示する。

【0025】

図 2 A 及び図 2 B に、本発明の範囲内にある方向性電磁鋼板に含まれる鋼板の溝の周辺領域の高さ分布を示し、図 3 A 及び図 3 B に、本発明の範囲外の方

30

【0026】

図 4 A 及び図 4 B は、本実施形態の方向性電磁鋼板について、1 つの溝 5 を、溝延在方向 Y に直交する断面（溝短手断面）で視た図である。図 4 B は図 4 A の部分拡大図である。溝幅方向の外側の鋼板表面に複数の凸部 7 が形成されている。凸部 7 は、Z 方向の高さが後述する仮想平面 2 a よりも高い領域である。意図して制御される粗度だけでなく、意図しない疵又は微小な表面変動や測定誤差などにより仮想平面 2 a よりも高くなった領域も凸部 7 に含まれる。凸部 7 の中でも、仮想平面 2 a を基準としてその高さが $h/10$ を超え、かつ幅が h 以上のものを突起 T と定義する。 h については後述する。図 4 A においては、溝 5 の右側に図示された 3 つの凸部 7 は全て突起 T に該当する。溝 5 の左側に図示された 3 つの凸部 7 のうち、溝 5 に近い側の 2 つの凸部 7 は突起 T に該当するが、溝 5 から最も離れた凸部 7 は、仮想平面 2 a より高いが $h/10$ を超えていないので、突起 T に該当しない。

40

50

【0027】

図4Aには、凹部6の一つである溝5が示されている。凹部6とは、Z方向の高さが仮想平面2aよりも低い領域であり、溝5も凹部6に含まれる。意図して制御される粗度だけでなく、意図しない疵又は微小な表面変動や測定誤差などにより仮想平面2aよりも低くなった領域も凹部6に含まれる。溝5は、鋼板1の表面に形成された磁区制御用の凹部6であり、他の凹部6とは明らかに区別できる。

【0028】

図4Aに示すように、溝5の両側には複数の凸部7が形成されている。このうち、突起Tに該当する凸部7には符号Tを付す。突起Tは、レーザー照射により溝5を形成した際に、レーザーによって加熱された溶融鉄が溝5から排出され、その溶融鉄が鋼板表面上に堆積し凝固して形成されている。従って、突起Tは鋼板1の化学成分とほぼ同じ成分を有する鋼からなる。勿論凸部7も鋼板1の化学成分とほぼ同じ成分を有する鋼からなる。図4A及び図4Bで示される断面における鋼板表面の断面輪郭線を本実施形態では輪郭曲線QZ₂と呼ぶ。輪郭曲線QZ₂については後述する。

10

【0029】

図5は、本発明の範囲外の方方向性電磁鋼板について、1つの溝5を、溝延在方向Yに直交する断面で視た図である。方向性電磁鋼板10と同様に、溝5の溝幅方向の外側の鋼板表面に複数の凸部7が形成され、そのうちいくつかは突起Tに該当する。しかし、方向性電磁鋼板20では、突起Tの形成位置が、図4A及び図4Bに比較すると溝5から離れており、かつランダムである。更に、大きさの分布についても、溝5に近いものが大きいということではなく、溝5から離れていく方向で2番目以降のn番目の突起T_n（nは2以上の整数）が最大になる場合もある。より詳細には、方向性電磁鋼板20においては、溝5から2つ目の突起T₂の幅W₂が、溝から1つめの突起T₁の幅W₁より大きくなっている。すなわち、W₂/W₁の値が1.0超になっている。また、突起T₁の溝5側の端部T_{1s}と溝5の突起T₁側の端部mとの距離L_sが40μm超になっている。

20

【0030】

図6は、方向性電磁鋼板10における1つの突起Tを、溝延在方向Y及び板厚方向Zを含む断面で視た図である。本実施形態では、図6に示される断面における突起Tの断面形状を粗さ曲線YZ₃と呼ぶ。粗さ曲線YZ₃については後述する。

【0031】

方向性電磁鋼板10は、効果を得るための特徴的な構成として、以下の5つの構成（A）～（E）を有している。

30

（A）仮想平面2aを基準として、凹部6の空間体積をV₁とし、凸部7の体積をV₂としたときに、V₂/V₁の値が所定の範囲内にある。

（B）溝5に最も近い突起T₁の幅W₁が他の突起の幅よりも大きい。好ましくは、凸部7の高さ、突起T₁の溝5からの距離L_s及び突起T₁の幅W₁が所定範囲内にある。

（C）溝延在方向及び板厚方向に平行な溝長手断面において、Y方向の平均高さが最も大きい領域の表面粗さを示す表面粗さパラメータ（R_a、R_{Sm}）の値が所定範囲内である。

（D）好ましくは、各突起Tの金属組織が、鋼板1の金属組織と実質的に一致している。

40

（E）好ましくは、各突起Tの表面及び溝5の表面にも、鋼板表面と同様の皮膜が形成されている。

【0032】

以下、上記構成（A）～（E）のそれぞれについて詳細に説明する。

【0033】

〔構成（A）について〕

本実施形態では、仮想平面2aより凹んだ凹部6の総空間体積をV₁とし、仮想平面2aより突出した凸部7の総体積をV₂としたとき、V₂/V₁の値が0.10超0.80未満である。

50

【0034】

公知の方法でのレーザ照射により溝5を形成する場合、照射部の金属は溶融又は蒸発し、その一部が液滴又はヒュームとなって空間上に飛散することで照射部から失われ、凹部6が形成される。突起Tは溝5の形成に伴って取り除かれた金属が溝5の周辺に付着して凸部7となって形成される。このため、 $V2/V1$ の値が1.0超になることはなく、1.0から大きく低下することもない。実用的な方向性電磁鋼板で必要とされる程度の磁区制御効果を得るために公知のレーザ照射条件で溝を形成する場合、ヒュームで空間に飛散する量は10%未満であり、 $V2/V1$ の値は小さくてもせいぜい0.90程度で、ヒュームの飛散によってこの比を0.90未満にすることは難しい。レーザ照射と同時にアシストガスを吹き付けて溶融物を遠くに吹き飛ばす手段も考案されているが、それでも0.85未満にすることは困難である。

10

【0035】

目的とする磁区制御効果を得るには一定の深さ及び幅の溝5が必要である。言い換えれば一定量の金属の除去が必要である。 $V2/V1$ の値を1未満にできるということは、一定の磁区制御効果、すなわち一定の深さ及び幅の溝5を形成した場合に、突起Tを相対的に小さくできることを意味する。前述のように突起Tは、鋼板1の磁気特性にとって好ましいものではないので、 $V2/V1$ の値は小さいことが好ましく、本実施形態では0.80未満とし、好ましくは0.70未満、さらに好ましくは0.60未満とする。後述する製造方法を適用すれば、 $V2/V1$ の値を0.50未満にすることは困難ではなく、0.40未満とすることもできる。その結果、磁区細分化のために鋼板1の表面に溝5が形成された方向性電磁鋼板の絶縁性及び耐錆性が向上する。その一方で、突起Tは絶縁皮膜の密着性の向上に寄与し得る。 $V2/V1$ の値が0.10以下では、突起Tが小さすぎて十分な密着性が得られない。従って、 $V2/V1$ の値は0.10超である。

20

【0036】

〔構成(B)について〕

本実施形態では、後述の特定領域内で、溝5に最も近い突起 T_1 の幅 W_1 が他の突起の幅よりも大きい。すなわち、特定領域内で、溝5の溝幅方向の外側に離れる方向において、2番目以降に現れるすべての突起 T_n (n は2以上の整数)について、その幅 W_n が $W_n/W_1 < 1.0$ を満たす。つまり、幅 W_n は突起 T_1 の幅 W_1 より小さい。 W_n/W_1 の値は、好ましくは0.6未満であり、より好ましくは0.4未満である。その一方で、 W_n/W_1 の最大値が0.2以下では、複数の方向性電磁鋼板を積層した場合に、重なり合う方向性電磁鋼板間に隙間が生じやすい。このような隙間の存在は、複数の方向性電磁鋼板から構成された積層鉄芯の鉄損及び騒音の増大に繋がる。従って、 W_n/W_1 の最大値は好ましくは0.2超である。ここでは、2番目以降の突起 T_n の影響を、最初の突起 T_1 との幅についての関係で示したが、幅が狭い突起は高さが小さくなることは当然でもあり、高さについても同じような関係が成立することが確認されている。なお、後述するように、端点mは仮想平面2aと輪郭曲線 QZ_2 との交点であり、端点 T_{1s} は $h/10$ の高さにおける仮想平面2aと輪郭曲線 QZ_2 との交点である。

30

【0037】

従来技術では、前述のように、溝5から除去された金属のほとんどが溝5の周辺に付着して突起Tが形成されるため、 $V2/V1$ の値はほぼ1.0となり、必要な幅及び深さの溝5を形成することを前提とすると、突起Tの総体積を減らすことができない。従って、突起Tを低くすると突起Tの幅は大きくならざるを得ない。本実施形態では $V2/V1$ の値を従来では考えられなかったほど小さくでき、突起Tの高さ及び幅を独立して制御できる。

40

【0038】

また、好ましくは仮想平面2aからの凸部7の高さが1超～10 μm 以下である。凸部7の高さは、より好ましくは6 μm 以下、更に好ましくは3 μm 以下である。

【0039】

本実施形態では、溝5の溝幅方向の外側に離れる方向(Q方向)において、溝5に最も

50

近い突起 T_1 の溝5側の端点 T_{1s} の溝5の突起 T_1 側の端点 m からの距離 L_s は、好ましくは $0\mu m$ 超～ $40\mu m$ であり、より好ましくは $0.5\sim 25\mu m$ であり、更に好ましくは $1.0\sim 20\mu m$ である。また、突起 T_1 の幅 W_1 は、好ましくは $40\mu m$ 以下であり、より好ましくは $25\mu m$ 以下であり、更に好ましくは $15\mu m$ 以下である。

【0040】

本実施形態では突起 T の高さは小さい方が好ましい。本実施形態ではこれに加え、突起 T_1 と溝5との距離 L_s を制御し、突起 T の幅を独立して小さくすることで、磁壁の移動を容易にし、透磁率を向上させ、鋼板1の磁気特性が向上する効果を得る。突起 T の幅を小さくすることでこのような効果が得られる理由は明確ではないが、突起 T は二次再結晶により精緻に結晶方位が制御された鋼板1からすると異物であり、鋼板表面に付着して存在することで磁壁の動きを少なからず妨げる悪影響があるためと考えられる。突起 T_1 と溝5との距離 L_s についても、磁壁の移動に影響する理由は明確ではないが、溝5からの距離が離れるということは磁壁の途中に異物が存在することになり、突起 T_1 が溝5に隣接して磁壁の端部で移動の障害となる状況よりも悪影響が大きくなるためと考えられる。このため、複数の突起 T について幅の総長さが同じであれば、突起 T はできるだけ溝5の近傍に集めまわっていることが好ましく、溝5から離れる方向で2つめ以降の突起 T_n の幅は、突起 T_1 の幅より小さい。

【0041】

〔構成(C)について〕

本実施形態では、特定領域の高さ分布において、溝延在方向 Y の平均高さが最も高い領域を延在方向 Y 及び板厚方向 Z を含む断面（溝長手断面）で視た場合に、当該領域の表面の輪郭を成す粗さ曲線の平均粗さ R_a が、 $0.3\sim 2.0\mu m$ 以下であり、好ましくは $0.5\sim 1.7\mu m$ であり、更に好ましくは $0.7\sim 1.4\mu m$ であり、粗さ曲線要素の平均長さ R_{Sm} が、 $10\sim 150\mu m$ であり、好ましくは $40\sim 145\mu m$ であり、更に好ましくは $60\sim 140\mu m$ である。

【0042】

表面粗さパラメータ（ R_a 、 R_{Sm} ）が上記の範囲内にあるということは、当該領域の延在方向 Y での高さの変動が小さいことを意味する。従って、表面粗さパラメータ（ R_a 、 R_{Sm} ）が上記の範囲内であれば、皮膜への応力集中による皮膜破壊が回避されるとともに、絶縁性が確保されにくい突起 T の最大高さ部の高さが小さくなるため絶縁性も向上する。更に、突起 T の幅の変動も小さくなるため、磁壁移動の障害効果を律速すると予想される突起幅の最大幅が小さくなり、磁気特性が向上する。

【0043】

〔構成(D)について〕

本実施形態では、突起 T の金属組織を制御することで好ましい効果を得ることができる。前述のように、突起 T のほとんどは、溝5の形成に伴って取り除かれた金属が溝5の周辺に付着して形成されている。レーザ照射で溝5を形成する場合、鋼板1の溝5を形成しようとする部分から取り除かれる金属は溶融しており、これが鋼板表面に付着して急冷されると磁気特性にとっては好ましくない溶融凝固物となり、溶融凝固物に含まれる結晶粒は微細となる。また、溶融凝固物を構成する結晶粒の結晶方位は $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位から逸脱する可能性が高く、好ましい磁気特性が得られない可能性が高い。これらが、前述の磁壁移動の妨げになる一因でもあるが、突起 T の金属組織を鋼板1の金属組織に近いものにできれば磁壁移動の障害としての悪影響を小さくすることができる。

【0044】

基本的には突起 T の結晶粒径を大きくすることが有効である。方向性電磁鋼板10を構成する鋼板1は数 $10mm$ 単位の結晶粒で構成されている。従って、突起 T を構成する結晶粒の大きさも、溝延在方向 Y への大きさを考えれば、数 mm ～数 $10mm$ の長さで形成される溝5に沿った突起 T における結晶粒を、延在方向と同程度の大きさにまで成長させることも可能である。しかし、突起 T の Z 方向及び Q 方向の大きさは数 μm 程度であり、 Y 方向に数 $10mm$ の大きさにもなる異方性が大きな結晶粒を一般的に等方的であること

を前提としている結晶粒径で妥当な規定をすることは困難とも思われる。さらに突起T自体の大きさが広い範囲で変動するので、一律に結晶粒径で規定することは適当でないとも考えられる。そこで、本実施形態では、溝延在方向Yに垂直な断面（溝短手断面）で観察した際の突起Tの金属組織における平均結晶粒数で突起内の結晶粒の成長の程度を判断する。従来の方法において溝5の形成の際に飛散した溶融鉄が急冷凝固して得られる組織は、非常に微細な結晶粒で形成される。そして、突起Tの底での結晶粒数は溝短手断面において数10個にもなる。突起Tがこのような微細な結晶粒から構成されている場合、 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位から逸脱した結晶粒が多量に含まれる。その一方で、後述する製造方法を適用すれば、突起Tを粗大な結晶粒から構成することが可能であり、溝短手断面において最も高い突起Tの底に存在する結晶粒の数を平均で10.0個以下にすることができる。結晶粒の数を測定する方法は後述するが、結晶粒の数の平均値が10.0超では、 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位から逸脱した結晶粒が多く含まれることがある。従って、結晶粒の平均数は、好ましくは10.0個以下であり、より好ましくは5.0個以下であり、更に好ましくは3.0個以下である。突起Tが単一の結晶粒で構成されていることが最も好ましい。

10

【0045】

また、突起Tの磁壁移動の障害としての悪影響は、その結晶方位にも依存していると考えられる。突起Tの結晶方位が、鋼板1から連続した同一の結晶方位であれば、磁壁移動の障害効果は可能な限り小さくできる。鋼板1においては二次再結晶でいわゆるゴス方位を大きく成長させるので、これより前の工程で溝5及び突起Tを形成しておけば、二次再結晶の過程で突起Tが鋼板1側から成長してきたゴス方位で蚕食させることができ、突起Tの結晶方位を好ましいものにできる。

20

【0046】

〔構成（E）について〕

図4A、図4B及び図6では、溝5及び突起Tの表面を含めた鋼板表面に皮膜が存在しない状態を例示しているが、本実施形態の方向性電磁鋼板では、凹部6及び凸部7の表面がガラス皮膜で覆われていても良い。特に絶縁皮膜と鋼板1の間にガラス皮膜が介在する形態とすることで、鋼板1と絶縁皮膜との密着性を確保でき、耐錆性や絶縁性の向上が可能となる。絶縁皮膜の形成後にレーザ照射して溝を形成するプロセスでは、溝5内の絶縁皮膜及びガラス皮膜を消失させてしまう。耐錆性及び絶縁性の確保のために、溝の形成後に絶縁皮膜が再形成されるが、この場合、溝5の表面では鋼板に直接絶縁皮膜が接触するため、十分な絶縁皮膜の密着性を確保できないことがある。

30

【0047】

詳細は後述するが、ガラス皮膜の形成のための焼鈍分離剤の塗布前に溝5及び突起Tを形成しておき、溝5の表面及び突起Tの表面にも焼鈍分離剤を塗布した状態で仕上焼鈍を行うことで、溝5の内面及び突起Tの表面にもガラス皮膜を形成させることが可能である。ガラス皮膜は特別なものである必要はなく、例えば、ガラス皮膜の厚さは0超～5 μm 、絶縁皮膜の厚さは、1～5 μm の皮膜を適用可能である。また、ガラス皮膜を有さず、鋼板1上に絶縁皮膜を密着性を確保するように配置する、いわゆるガラスレス皮膜についても適用できる。なお、これらの皮膜は、溝5の表面、突起Tの表面、平坦部（後述の仮想平面に一致する鋼板表面）で、厚さが同一である必要はない。これらの皮膜は、鋼板表面に液体状の物質を塗布し、乾燥、焼き付けで形成されるため、表面の凹凸である溝5や突起Tでは厚さが変化することは当然である。これら厚さの変化は、本発明の効果を失わせるものではない。

40

【0048】

上記のように、ガラス皮膜や絶縁皮膜を有する形態とすることにより、溝5の周辺及び突起Tの周辺での皮膜のクラック及び剥離がより発生しにくくなるので、より優れた絶縁皮膜の密着性を得ることができる。

【0049】

ところで、上述の構成（A）～（E）の説明においては、凹部6の空間体積V1、凸部

50

7の体積 V_2 、凸部7及び突起Tの高さ、突起Tの幅 W 、突起 T_1 と溝5との距離 L_s 、突起Tにおける金属組織の結晶粒径などは、便宜上、特定の一断面での特徴を念頭に説明してきた。しかし、図6に示すように、溝5の延在方向（Y方向）において、突起Tの形状は必ずしも一定ではない。同様に、突起Tの幅 W や突起Tの金属組織の結晶粒径や結晶方位分布も観察する断面によって大きく変化する。そこで、以下に、本発明での鋼板表面の形状に関する定量値の特定方法について説明する。

【0050】

なお、本発明で規定する各種の鋼板表面形状に関する値は、方向性電磁鋼板の表面の皮膜については考慮せず、鋼板1の表面で特定すべきものである。つまり、本発明の形状に関する規定は皮膜を除いた鋼板1についてのものであり、皮膜を有する方向性電磁鋼板については、断面観察による鋼板1の表面の計測、又は皮膜を剥離した後の鋼板1で計測すべきものである。本発明で必要な測定値を簡便に得るには、断面観察により鋼板1の表面を特定して、それを元に必要な測定値を得るよりも、皮膜がない状態の鋼板1の表面の形状を三次元的に測定する方法が適している。以下ではその方法について説明する。

【0051】

本発明では、溝5及び突起Tを含む、レーザ式表面粗さ測定器を用いて鋼板表面の十分に広い範囲のZ方向位置を測定する。本発明においては、制御すべき突起Tの大きさや表面の凹凸、形成位置を勘案して、溝5の延在方向Yについては $1000\mu\text{m}$ の範囲にわたり、Q方向については溝を中央として $400\mu\text{m}$ （溝の片側に $200\mu\text{m}$ ）の範囲を特定領域とし、この特定領域内で一定の間隔で鋼板1の表面のZ方向位置を測定し、高さデータの高さ分布を得る。この測定では、レーザスポット径を $0.40\mu\text{m}$ 以下（例えば $0.40\mu\text{m}$ ）として、Y方向に $0.30\mu\text{m}$ 以下（例えば $0.15\mu\text{m}$ ）のステップで走査し、Q方向に $0.30\mu\text{m}$ 以下（例えば $0.15\mu\text{m}$ ）のステップで走査し、Z方向の測定精度を $0.10\mu\text{m}$ 以下（例えば $0.10\mu\text{m}$ ）とし、対物レンズの倍率を50倍とする。

【0052】

走査ステップにもよるが、このようにして、特定領域の全域から総数1000万点以上からなる表面形状データを得る。そして、そのデータをZ方向高さ毎の度数分布として集計する。そして、度数が最大となる高さを仮想平面2aとして規定するとともに、溝5や突起Tを形成する前の鋼板表面に一致する理想的な基準面と考え、Z方向高さをゼロとする。Z方向高さとして窪んだ領域となる溝5の幅は $20\mu\text{m}$ 程度であり、また、この領域から飛散した金属が鋼板表面に堆積して突起Tとなる領域も溝5の近傍 $400\mu\text{m}$ 程度の広い領域を考えれば全面に薄く広がるということはなく局所的なものであり、さらに元の鋼板1の平坦部分の表面に多少の凹凸があったとしても、上記の度数で元の鋼板表面（Z方向の高さがゼロ）と見なす仮想平面2aを特定することは妥当と考えられる。

【0053】

この仮想平面2aは、溝5や突起Tが存在する領域については、延伸した平面を想定する。図4A、図4B及び図6には、このようにして決定された仮想平面2aを一点鎖線で描いている。このような平面を決定すれば、溝5として金属が除去された空間体積 V_1 は、Z方向高さが負の値となった測定点について、ステップ幅とZ方向高さの積を総計することで特定できる。同様に、突起Tとして鋼板表面より溶融鉄が排出されて凸部7となった体積 V_2 は、Z方向高さが正の値となった測定点について、ステップ幅とZ方向高さの積を総計することで特定できる。

【0054】

凸部7の高さに関連する「 h 」は上記の表面形状データをZ方向高さの高い順に並べて、順位が全体の 0.02% になる高さとして特定する。例えば1000万点のデータの場合、高さが2000番目の測定点の高さを h とする。

【0055】

実際の凸部7の高さは0超から様々な高さのものが考えられるが、本発明では h によって凸部7の大きさの程度を表すものである。 h となる高さは、数多く存在する凸部7の中

10

20

30

40

50

では、比較的高さの高い凸部7の高さに相当する値になると考えられるが、注目する特性、すなわち絶縁性、耐錆性、磁気特性などが、比較的高さの高い凸部7に強く影響されることから考えると、このような評価は妥当と考えられる。

【0056】

その他の本発明での規定値を特定するには、Y方向垂直断面（溝短手断面）及びQ方向垂直断面（溝長手断面）での鋼板表面を表す曲線が用いられる。以下ではまずこれら曲線の求め方を説明する。

【0057】

上記表面形状データのうち、Y方向位置が同じである一連のデータ、すなわち特定のQ-Z断面での高さデータにおいて高さの変化を表す断面曲線 QZ_1 を得る。この断面曲線 QZ_1 をすべてのY方向位置について平均することで、Q方向の平均的な輪郭を成す輪郭曲線 QZ_2 （図4A）を得る。

10

【0058】

同様に上記表面形状データのうち、Q方向位置が同じである一連のデータ、すなわち特定のY-Z断面での高さデータにおいて高さの変化を表す断面曲線 YZ_1 を得る。さらに特定のQ方向位置における断面曲線 YZ_1 のそれぞれについて、高さの平均 Z_a を求める。断面曲線 YZ_1 のうち、平均 Z_a が最大となる断面曲線が輪郭曲線 YZ_2 である。輪郭曲線 YZ_2 は、高さ分布において延在方向Yの平均高さが最も高い領域の輪郭曲線に該当する。

20

【0059】

輪郭曲線 YZ_2 が得られるQ方向の位置は、上記の定義からも分かる通り、輪郭曲線 QZ_2 においてZ方向高さが最高となる位置に一致する。そしてこの位置は、通常、後述の突起 T_1 の頂上部の位置となる。輪郭曲線 YZ_2 にカットオフ値 λ_s の低域フィルタとカットオフ値 λ_c の高域フィルタを適用して、粗さ曲線 YZ_3 （図6）を得る。

【0060】

カットオフ値 λ_s 及び λ_c は、レーザ式表面粗さ測定器の型式及び対物レンズにより決定される。本発明では、キーエンス社製のVK-9700にて対物レンズの倍率を50倍として粗さを測定した際のカットオフ値として、 $\lambda_s = 0.8 \mu m$ 、 $\lambda_c = 0.08 mm$ を用いる。

【0061】

次にこれらの曲線から本発明で用いられる規定値を特定する手順を説明する。

30

【0062】

輪郭曲線 QZ_2 からは、突起Tの幅と溝5からの距離に関係する規定値を特定する。

【0063】

輪郭曲線 QZ_2 が、Q方向中央、つまり溝5の中央部から離れる方向において、仮想平面 $2a$ と最初に交わる点を溝端点mとする。溝端点mよりも溝から離れた領域において突起Tを規定する。この規定において突起Tとは、輪郭曲線 QZ_2 の高さが $h/10$ の高さよりも高い位置にあり、かつ輪郭曲線 QZ_2 の高さが $h/10$ 以上で継続するQ方向の距離が h 以上の領域である。このような規定で突起Tを特定する理由は、鋼板1の表面には本発明の効果をj得るために意図して制御すべき凹凸とは異なる凹凸が存在し、この意図しない凹凸を本発明で規定すべき突起から除外するためである。除外すべき凹凸は圧延などで現れる微小な凹凸（粗度）であったり、測定誤差に起因する数値変動などが考えられる。これらは現在の工業的な製造技術や測定精度によれば非常に微細なものであるので、前述のように、生データである断面曲線 QZ_1 をY方向位置について平均して輪郭曲線 QZ_2 を得る処理によりかなりの部分は消失すると考えられるが、さらに上記のように高さ h と比較して相対的に小さな高さや幅である凹凸を評価対象から除外するものである。

40

【0064】

本発明では、溝端点mからQ方向に溝5の外側に離れていく方向において、溝に近い方から順番に突起に番号をつける。n番目の突起 T_n において、突起 T_n の溝に近い側の端点の位置を T_{ns} 、溝から遠い側の端点の位置を T_{ne} として、 T_{ns} と T_{ne} の間の距

50

離が突起 T_n の幅 W_n である。端点 T_{ns} 及び T_{ne} はそれぞれ、 $h/10$ の高さにおける仮想面と輪郭曲線 QZ_2 との交点である。本発明では、溝にもっとも近い突起 T_1 の幅を W_1 とする。また溝 5 に最も近い突起 T_1 について、溝端点 m と T_{1s} との距離が L_s である。

【0065】

粗さ曲線 YZ_3 からは、Y 方向の平均高さが最も高い突起 T の平均粗さ R_a と粗さ曲線要素の平均長さ R_{Sm} を求める。平均粗さ R_a 及び粗さ曲線要素の平均長さ R_{Sm} は、日本工業規格 JIS B 0601 (2013) に準じて決定する。

【0066】

突起 T を形成する結晶粒の平均個数は、溝延在方向 Y に垂直な断面（溝短手断面、Q-Z 面）から求める。本発明では、図 7A に示すように、Y 方向において 10 の観察箇所 31～40 にて溝短手断面の金属組織を観察し、観察箇所 31～40 の各々において最も高い突起 T の底に存在する結晶粒の数を求める。すなわち、図 7B に示すように、溝短手断面において突起 T の Z 方向高さが $h/10$ の線分 41 上に存在する結晶粒の数を求める。そして、観察箇所 31～40 毎の結晶粒数の平均値を算出する。鋼板 1 の金属組織を観察する手段は公知の手段で可能であるが、溝短手断面における突起の大きさは数 μm なので、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope: SEM）により観察することが好ましい。

【0067】

また、突起 T における結晶方位は、輪郭曲線 YZ_2 を得る断面の金属組織を観察することで決定する。注意すべきは断面組織のうち、突起 T に相当する領域、すなわち、Z 方向高さが $h/10$ である領域のみに限定して結晶方位を求めることである。結晶方位は後方散乱電子回折（Electron Back Scattering Diffraction Pattern: EBSD）法によって、当該領域における $\{110\} <001>$ 方位の面積率を求める。

【0068】

EBSD の測定条件は次の通りとする。

(a) 測定装置：電子線後方散乱回折装置付き走査型電子顕微鏡（SEM-EBSD）（SEM の型番「JSM-6400」（JEOL 社製））

(b) ビーム径：0.5 μm

(c) ステップ間隔：0.1 μm

(d) 倍率：100 倍

(e) 測定領域：輪郭曲線 YZ_2 を得る断面を Y 方向に 1000 μm

以上の条件で測定された突起 T に相当する領域について、 $\{110\} <001> (\pm 10^\circ)$ 方位である領域の面積比率を本発明における面積率とする。面積率は 65% 以上が磁気特性を向上できる点で好ましい。すなわち、高さ分布において溝延在方向 Y の平均高さが最も高い領域内の突起 T の金属組織の結晶方位について、 $\{100\} <001>$ 方位の面積率が 65% 以上であることが好ましい。

【0069】

なお、これら突起 T に関する測定は、溝 5 の片側の領域のみについて行えば十分である。上記の突起 T に関する数値は溝 5 の両側で同等となりやすく、また、ずれがあったとしても、片側で条件が満たされていれば、本発明の効果が得られるからである。

【0070】

溝延在方向については、上記突起 T の規定値は、延在方向の中央近傍で測定する。これは溝 5 の延在の端の方ではレーザ照射角度の変化により、延在の端の方に近づくに従い溝 5 の深さが浅くなり、突起 T の形状の変化も大きくなるためである。

【0071】

また、本発明では溝 5 は直線状である必要はないため、前記の三次元粗度計による表面高さ Z の測定において、Y 方向と測定領域の 1000 μm の長さの方向は厳密には一致しないことも考えられる。しかし、曲線状に形成された溝 5 であっても、工業製品として実

10

20

30

40

50

用範囲で製造された溝5については、1000 μ m程度の距離であれば、実質的に直線として差し支えなく、本発明ではそのようにして特徴を規定する。

【0072】

また複数の溝5についてのばらつきについては、工業製品の製造ばらつきの範囲内であり異常値による判断などについては特に配慮する必要はない。本発明の規定では延在方向に1mmにわたる長さについて平均した値を用いており、個々の溝5毎のばらつきについては全く問題がない程度に代表的な値が得られるものとなっている。

【0073】

なお、本発明で規定している突起5は、鋼板1の表面形状である。つまり、皮膜を有する方向性電磁鋼板の皮膜の上からの形状ではない。これは鋼板1の表面に皮膜が形成されていても、断面観察を行えば、目視で計測することは可能である。しかし、様々な値を定量化するには、上述のように三次元粗さ測定装置を用いて表面形状を計測することが操作性が良く、この場合は皮膜がない状態で鋼板1の表面を計測する必要がある。これは皮膜を形成する前に溝5及び突起Tを形成するのであれば、形成直後又は皮膜形成前に計測すれば良い。また、皮膜形成後に測定するのであれば、方向性電磁鋼板のガラス皮膜及び絶縁皮膜を、例えば、次の方法によって除去して計測することができる。

【0074】

ガラス皮膜又は絶縁皮膜を有する方向性電磁鋼板を、NaOH：10質量%+H₂O：90質量%の水酸化ナトリウム水溶液に、80℃で15分間、浸漬する。次いで、H₂SO₄：10質量%+H₂O：90質量%の硫酸水溶液に、80℃で3分間、浸漬する。その後、HNO₃：10質量%+H₂O：90質量%の硝酸水溶液によって、常温で1分間弱、浸漬して洗浄する。最後に、温風のブローアードで1分間弱、乾燥させる。

【0075】

なお、上記の方法によって方向性電磁鋼板からガラス皮膜又は絶縁皮膜を除去した場合、鋼板1の溝5の形状や粗さは、ガラス皮膜又は絶縁皮膜を形成する前と同等であることが確認されている。さらに鋼板製造工程の途中で形成された溝5は、その後に冷間圧延などの大きな変形が行われるとその形状は大きく変化してしまうが、焼鈍や皮膜形成などであればそれらのプロセスを通過してもその形状の変化は小さいことを確認している。本発明では、突起Tに関する規定は、最終製品に適用するものとし、最終製品の表面に皮膜が形成されている場合は、これを剥離した鋼板1に適用するものとする。

【0076】

化学成分に関し、鋼板1は、例えば、質量%で、Si：0.8～7%、C：0超～0.085%、酸可溶性Al：0～0.065%、N：0～0.012%、Mn：0～1%、Cr：0～0.3%、Cu：0～0.4%、P：0～0.5%、Sn：0～0.3%、Sb：0～0.3%、Ni：0～1%、S：0～0.015%、Se：0～0.015%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる。

【0077】

鋼板1の化学成分は、結晶方位を{110}<001>方位に集積させたGoss集合組織に制御するために好ましい化学成分である。上記元素のうち、Si及びCが必須元素であり、酸可溶性Al、N、Mn、Cr、Cu、P、Sn、Sb、Ni、S、及びSeが選択元素である。上記の選択元素は、その目的に応じて含有させればよいので下限値を制限する必要がなく、下限値が0%でもよい。また、選択元素としては上記の元素に限らず、方向性電磁鋼板において公知の効果を有する公知の元素が公知の範囲で含有されても、本実施形態の効果は損なわれない。例えば、鋼板1の必須元素及び選択元素の残部はFe及び不純物からなる。不純物とは、鋼板1を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップ、又は製造環境等から不可避免的に混入する元素を意味する。

【0078】

また、方向性電磁鋼板では、二次再結晶時に純化焼鈍を経ることが一般的である。純化焼鈍においてはインヒビター形成元素の系外への排出が起きる。特にN、Sについては濃度の低下が顕著で、50ppm以下になる。通常の純化焼鈍条件であれば、N、Sはそれ

10

20

30

40

50

それぞれ9 ppm以下、さらには6 ppm以下、純化焼鈍を十分に行えば、一般的な分析では検出できない程度（1 ppm以下）にまで達する。

【0079】

鋼板1の化学成分は、鋼の一般的な分析方法によって測定すればよい。例えば、鋼板1の化学成分は、ICP-AES（Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry）を用いて測定すればよい。具体的には、皮膜除去後の鋼板1の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特定できる。なお、C及びSは燃焼-赤外線吸収法を用い、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

【0080】

以上のように、本実施形態によれば、磁区細分化のために鋼板表面に溝5及び突起Tが形成された方向性電磁鋼板の耐錆性及び絶縁性さらには磁気特性を大幅に向上させることが可能である。

【0081】

次に、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法について説明する。図8は、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板の製造方法を示すフローチャートである。本製造方法は、図8に示すように、鑄造工程S01、熱間圧延工程S02、焼鈍工程S03、冷間圧延工程S04、脱炭焼鈍工程S05、焼鈍分離剤塗布工程S06、仕上焼鈍工程S07、絶縁被膜形成工程S08及びレーザ照射工程S99を含む。本製造方法のポイントは

20

【0082】

鑄造工程S01では、例えば、質量%で、Si：0.8～7%、C：0超～0.085%、酸可溶性Al：0～0.065%、N：0～0.012%、Mn：0～1%、Cr：0～0.3%、Cu：0～0.4%、P：0～0.5%、Sn：0～0.3%、Sb：0～0.3%、Ni：0～1%、S：0～0.015%、Se：0～0.015%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる化学成分を有する溶鋼が連続鑄造機に供給されて、ス

30

【0083】

続いて、熱間圧延工程S02では、鑄造工程S01で得られたスラブが所定の温度（例えば1150～1400℃）に加熱された後、熱間圧延が実施される。これにより、例えば、1.8～3.5mmの厚さを有する熱延鋼板が得られる。

【0084】

続いて、焼鈍工程S03では、熱間圧延工程S02で得られた熱延鋼板に対して、所定の温度条件（例えば750～1200℃で30秒～10分間加熱する条件）で焼鈍が実施される。続いて、冷間圧延工程S04では、焼鈍工程S03で焼鈍処理が実施された熱延鋼板が酸洗された後、冷間圧延が実施される。これにより、例えば、0.15～0.35

40

【0085】

続いて、脱炭焼鈍工程S05では、冷間圧延工程S04から得られた冷延鋼板に対して、所定の条件（例えば700～900℃で1～3分間加熱）の熱処理（すなわち、脱炭焼鈍処理）が実施される。このような脱炭焼鈍処理が実施されると、冷延鋼板において、炭素が所定量以下に低減され、一次再結晶組織が形成される。脱炭焼鈍工程S05では、冷延鋼板の表面に、シリカ（SiO₂）を主成分として含有する酸化物層が形成される。また、方向性電磁鋼板の二次再結晶のインヒビターを脱炭焼鈍に続く、窒化焼鈍で形成してもよい。この技術を適用するのであれば、脱炭焼鈍工程S05に引き続き窒化焼鈍を実施する。ここでは、このような窒化焼鈍も、脱炭焼鈍工程S05に含めて説明する。

50

【0086】

続いて、焼鈍分離剤塗布工程S06では、マグネシア(MgO)を主成分として含有する焼鈍分離剤が、冷延鋼板の表面(酸化物層の表面)に塗布される。続いて、仕上焼鈍工程S07では、焼鈍分離剤が塗布された冷延鋼板に対して、所定の条件(例えば1100~1300℃で20~24時間加熱)の熱処理(すなわち、仕上げ焼鈍処理)が実施される。このような仕上焼鈍処理が実施されると、二次再結晶が冷延鋼板に生じるとともに、冷延鋼板が純化される。その結果、上述の鋼板1の化学組成を有し、結晶粒の磁化容易軸と圧延方向Xとが一致するように結晶方位が制御された冷延鋼板が得られる。

【0087】

また、上記のような仕上焼鈍処理が実施されると、シリカを主成分として含有する酸化物層が、マグネシアを主成分として含有する焼鈍分離剤と反応して、冷延鋼板の表面に例えば、フォスフェイト(Mg_2SiO_4)、スピネル($MgAl_2O_4$)、又は、コーディエライト($Mg_2Al_4Si_5O_{16}$)などの複合酸化物を含むガラス皮膜が形成される。仕上焼鈍工程S07では、冷延鋼板がコイル状に巻かれた状態で仕上げ焼鈍処理が実施される。仕上焼鈍処理中に冷延鋼板の表面にガラス皮膜が形成されることにより、コイル状に巻かれた冷延鋼板の焼き付きを防止することができる。

【0088】

続いて、絶縁皮膜成形工程S08では、例えばコロイダルシリカ及びリン酸塩を含有する絶縁コーティング液が、ガラス皮膜の上から塗布される。その後、所定の温度条件(例えば840~920℃)の下で焼付熱処理が実施される。

【0089】

次に、レーザ照射工程S99について説明する。レーザ照射工程S99は、鑄造工程S01以降、どのタイミングでも実施することは可能であるが、表面形状の変化としてせいぜい数100μm程度の溝5および突起Tは、その後に、熱間圧延、酸洗、冷間圧延を実施すると、ほとんど消失してしまう。このため、少なくとも冷間圧延工程S04より後に実施すべきである。まず、レーザ照射工程S99の実施タイミングにより現れる特徴について説明する。

【0090】

レーザ照射工程S99を冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で実施する場合、圧延ままの状態では鋼板表面に存在する圧延油が鋼板表面の形状制御に有効に作用するとともに、溝5および突起Tの表面にも、脱炭焼鈍工程中に生成するシリカ(SiO_2)を主成分として含有する酸化物層が形成される。このため、最終製品での良好なガラス皮膜の形成に有利となる。また、鋼板の平坦部までではないにしろ、脱炭焼鈍工程で突起の粒成長が起きて粒径が整えられるので、仕上焼鈍での鋼板からの二次再結晶粒による蚕食も起きやすくなる。

【0091】

窒化焼鈍を採用するプロセスである場合は、脱炭焼鈍工程S05の途中でレーザ照射工程S99を実施することができる。窒化焼鈍の前にレーザ照射を行えば、溝5の表層領域及び突起Tの領域も窒化によりインヒビター制御が行われた組織となるため、これらの領域についてもその後の二次再結晶で結晶方位が好ましく制御されることが期待される。ただし、一般的には窒化焼鈍は脱炭焼鈍の後、鋼板温度を下げることなく行うことでエネルギーコストの増加を回避するように実施されている。この途中でレーザ照射を行うには、鋼板を一旦冷却し、レーザ照射後、窒化のために再加熱する必要も生じるため、あえてこのタイミングで実施することについては、この点を考慮すべきである。

【0092】

レーザ照射工程S99を脱炭焼鈍工程S05と焼鈍分離剤塗布工程S06の間で実施する場合、溝5及び突起Tの表面にもガラス皮膜の形成が可能となる。ただし、溝5の表面と突起Tの表面は脱炭焼鈍工程S05で形成したシリカを主成分とする酸化物層が消失しているため、ガラス皮膜の状態としては好ましいとは言えないものになる。また、窒化焼鈍を実施してインヒビター制御を行っていた場合は、溝5の表層領域と突起T領域はイン

10

20

30

40

50

ヒビターが好ましい状態とはなっておらず、この領域からの好ましい結晶方位としてのGoss方位の二次再結晶は望めない。とは言え、少なくとも仕上焼鈍工程S07が突起形成後になるため、突起Tの金属組織の粒成長や鋼板からの二次再結晶粒による蚕食は期待できる。

【0093】

レーザ照射工程S99を焼鈍分離剤塗布工程S06と仕上焼鈍工程S07の間で実施する場合、液体状態の焼鈍分離剤が鋼板表面の形状制御に有効に作用するため、焼鈍分離剤の乾燥前にレーザ照射を実施すべきである。溝5の表面に塗布されていた焼鈍分離剤はレーザ照射直後は散逸してしまうが、焼鈍分離剤が液体状態であれば、溝5の表面は再度、焼鈍分離剤で覆われる。ただし、焼鈍分離剤の上に乗り上げて凝固した溶融鉄は、その後のガラス皮膜形成に少なからざる影響を及ぼし、局所的な皮膜不良発生の原因となる懸念があることには注意する必要がある。

10

【0094】

レーザ照射工程S99を仕上焼鈍工程S07と絶縁皮膜形成工程S08の間で実施する場合、溝5及び突起Tの表面にも絶縁被膜は形成されるので、皮膜密着性についてのメリットを得られる。

【0095】

レーザ照射工程S99は絶縁皮膜形成工程S08の中で実施することも可能である。絶縁被膜形成工程S08は、鋼板に絶縁コーティング液を塗布し、焼付熱処理を実施するが、絶縁コーティング液は本発明の鋼板表面状態を制御するために活用できる。絶縁コーティング液を塗布した後、焼付熱処理の前にレーザ照射を実施し、その後、焼付熱処理を行う。この場合、溝5及び突起Tの表面にはガラス皮膜は存在しないものの、とりあえず絶縁皮膜は形成される。最終製品で溝5及び突起Tを形成した場合に必要な絶縁皮膜の再形成が不要となるメリットはある。

20

【0096】

レーザ照射工程S99を絶縁皮膜形成工程S08の後で実施する場合、溝5及び突起Tの表面には絶縁皮膜が存在しなくなり、前述のように耐錆性や絶縁性の確保のため絶縁皮膜の再形成が必要となるため、あえてこの工程で実施するメリットはない。

【0097】

さらに考慮すべき点は、鋼板表面の形状を制御するために、後述のように何らかの物質を塗布した状態でレーザ照射工程S99を実施する場合、レーザ照射工程S99の実施タイミングと塗布する物質によっては、レーザ照射後に塗布物質を除去する必要があることである。例えば、脱炭焼鈍と窒化焼鈍の間で、油を塗布した状態でレーザ照射して鋼板表面の形状を制御した場合、油が付着したままで窒化焼鈍を実施することに問題があれば、レーザ照射後に電解脱脂ラインを通板するなどして油を除去した上で窒化焼鈍を実施する必要がある。

30

【0098】

この点、冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で圧延油を塗布物質として活用する場合、焼鈍分離剤塗布工程S06と仕上焼鈍工程S07の間で液体状態の焼鈍分離剤を塗布物質として活用する場合、絶縁皮膜形成工程S08の途中で絶縁コーティング液を塗布物質として活用する場合は、塗布物質の除去の必要がないため好都合である。

40

【0099】

以上のような点を考慮すると、レーザ照射工程S99は、図8に示すように、冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で実施することが特に好ましい。また、後述する、本発明で特徴的な突起を形成する一手法として、レーザを照射する鋼板表面への油塗布という手段を採用する場合、冷延後の鋼板は不可避免的に鋼板表面が圧延油で覆われているため、この点でも非常に都合が良い。

【0100】

ここで、レーザ照射工程S99について説明する。レーザ照射工程S99では、鋼板の表面に特定の物質が塗布された上で、鋼板の表面に向けてレーザが照射され、鋼板の表面

50

に溝5が形成される。溝5の形成に伴って突起Tが形成される。上記特定の物質については後述するが、上記特定の物質は、例えば冷間圧延で用いられた圧延油である。レーザ制御条件は、特別なものである必要はなく、公知の条件が採用される。鋼板の表面にレーザを照射することにより、鋼板の表面に、圧延方向に交差する方向に延びる複数の溝5が、圧延方向に沿って所定間隔で形成される。これは例えば、レーザ光源から出射されたレーザを、光ファイバを介してレーザ照射装置に伝送し、ポリゴンミラーとその回転駆動装置によって、レーザを鋼板の表面に向けて照射すると共に、レーザを冷延鋼板の板幅方向と略平行に走査することで形成される。

【0101】

レーザの照射と同時に、空気又は不活性ガス等のアシストガスを、鋼板のレーザが照射される部位に吹き付けてもよい。アシストガスは、レーザ照射によって鋼板から飛散又は蒸発した成分を除去する役割を担う。

【0102】

ポリゴンミラーの回転速度と、鋼板の圧延方向への搬送速度を同期制御することで、圧延方向に交差する複数の溝5を、圧延方向に沿って所定間隔で形成できる。

【0103】

レーザ光源としては、例えばファイバレーザを用いることができる。YAGレーザ、半導体レーザ、又はCO₂レーザ等の一般的に工業用に用いられる高出力レーザをレーザ光源として使用してもよい。また、パルスレーザ、又は連続波レーザをレーザ光源として使用してもよい。レーザとしては、集光性が高く、溝5の形成に適したシングルモードレーザを用いることが好ましい。

【0104】

レーザの照射条件として、例えば、レーザ出力を200～2000Wに、レーザの圧延方向における集光スポット径（レーザ出力の86%を含む直径）を10～1000μmに、レーザの板幅方向における集光スポット径を10～1000μmに、レーザ走査速度を5～100m/sに、レーザ走査ピッチ（間隔）を2～10mmに設定することが好ましい。所望の溝深さが得られるように、これらのレーザ照射条件を公知の範囲で適宜調整すればよい。例えば、深い溝深さを得る場合には、レーザ走査速度を遅く設定し、レーザ出力を高く設定すればよい。

【0105】

次に、レーザ照射に際して鋼板の表面に塗布される物質（塗布物質）について説明する。塗布物質は、好ましくは、油脂、水、アルコール、コロイド、エマルション、方向性電磁鋼板の製造時に用いられる焼鈍分離剤、及び絶縁コーティング液などの液体状の物質である。一般的な方向性電磁鋼板の製造で使用される物質などを考慮すると、圧延油や防錆油として使用されている油脂は取り扱いが容易であり、より好ましい。圧延油は冷間圧延後にあらためて塗布する必要がないため、特に好ましい。

【0106】

塗布物質は、次の2つ条件を満たす。

(a) 粘度が特定の範囲内にあり、液状で比較的小さな力でも瞬間的に変形する物質であること。

(b) 塗布後の鋼板の表面での液膜の厚さが特定の範囲内にあり、溶融鉄の広がりを抑制するとともに、溶融鉄の一部が当該液膜の上に乗り上げた際に、鋼板との間に介在することで溶融鉄の鋼板への溶着を抑制する物質であること。

【0107】

このようにして、本発明の実施形態に係る方向性電磁鋼板を製造することができる。この方向性電磁鋼板に含まれる鋼板1は、化学成分として、質量%で、Si：0.8～7%、C：0超～0.085%、酸可溶性Al：0～0.065%、N：0～0.012%、Mn：0～1%、Cr：0～0.3%、Cu：0～0.4%、P：0～0.5%、Sn：0～0.3%、Sb：0～0.3%、Ni：0～1%、S：0～0.015%、Se：0～0.015%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる。

【0108】

本製造方法では、必要に応じて、ブラシ洗浄工程など、方向性電磁鋼板の何らかの特性を維持するための公知の製造工程をさらに有してもよい。

【0109】

以下、塗布物質の影響で鋼板1の特定の表面形状が得られるメカニズム、及び塗布物質の好適な条件について説明する。

【0110】

〔メカニズムについて〕

レーザ照射時に鋼板表面に特定物質を塗布しておくことで本発明効果が得られるメカニズムについては明確ではないが、様々な物質の影響を調査した結果とも整合するものとして、現時点では以下のように考えている。

10

【0111】

磁区制御を目的として溝を形成するため、鋼板1の表面にレーザ光10を照射すると、照射部の鋼は瞬間的に熔融して、照射部の外に飛散する(図9A)。このようにして溝5が形成されるとともに、飛散した熔融鉄11の一部は鋼板表面に溶着して突起7等の凸部が形成される(図9B)。

【0112】

一方、図9Cに示すように、レーザ照射時に鋼板表面に塗布物質12が適切な状態で均一に塗布されていると、熔融鉄11が溝5の周囲に押し出される際に、熔融鉄11が特定物質12を溝5から押し広げることになり飛散が抑制される。このようにして特定物質12の膜により熔融鉄11が溝5から遠くまで飛散することが抑えられる。また、熔融鉄11の一部13は特定物質12の塗布膜の上に乗上げる。図9Dに示すように、塗布膜の上に乗上げた熔融鉄13は、特定物質12の塗布膜の上で凝固剥落し鋼板表面への溶着物としては残存しない。このため、溶着物の総量が低下する。また溝から遠く離れた地点まで飛散した溶着物も特定物質12の塗布膜の上で凝固剥落し鋼板表面への溶着物としては残存しないため、突起は溝に近接するもの(突起 T_1)のみとなり、突起 T_1 よりも溝から離間する突起(突起 T_2 以降)の幅は突起 T_1 の幅より小さくなる。

20

【0113】

このような溶着物が凸部7若しくは突起Tとなり溝周囲に広がることで様々な害を及ぼすことは前述のとおりであるが、本発明では溶着物の総量が減少し飛散が溝周囲に限定されることで特性の低下を回避できる。

30

【0114】

〔粘度について〕

上記のメカニズムを考えると、塗布物質は高温の熔融鉄と接触した状態で規定すべきかも知れないが、これは現実的ではない。本発明ではレーザ照射前の状態での塗布物質の粘度で発明を規定する。

【0115】

塗布物質の粘度は $100\text{ mm}^2/\text{s}$ 以下であることが好ましい。粘性を有して熔融鉄から受ける力で変形する何らかの物質が塗布されていれば、本発明の効果は得られると考えられるため、下限は特に限定しないが、粘度が高過ぎると、塗布などの取り扱いが困難となるばかりでなく、熔融物の溝周辺での適度な広がりを妨げ、溝5の極近傍のみに堆積して凸部の高さ h が高くなってしまいうとともに、所望の V_2/V_1 が得られなくなる。また、粘度が低すぎると熔融鉄の溝からの飛散を抑制し、溝周辺に堆積させる効果が小さくなり、距離 L_s 、突起幅 W を特定範囲内に制御することが困難になる。粘度は、好ましくは $10\sim70\text{ mm}^2/\text{s}$ 以下であり、さらに好ましくは $40\sim60\text{ mm}^2/\text{s}$ である。

40

【0116】

また粘度は塗布物質を変えることで制御できるが、例えば温度や濃度を変えることで制御することも可能である。塗布物質の温度は $10\sim100^\circ\text{C}$ であることが好ましい。好ましくは $15\sim60^\circ\text{C}$ 、さらに好ましくは $20\sim50^\circ\text{C}$ である。温度は塗布物質の粘度を変化させて発明効果に影響を及ぼすが、適切な温度範囲は、製造工程での温度管理や取り扱

50

いの容易さも考慮して決定すべきものである。塗布物質を油脂又は油脂のエマルジョンとした場合、上記の温度範囲が、粘度についての好ましい範囲と概略一致する。

【0117】

塗布物質が何らかの混合物である場合は、濃度を調整して取り扱いやすい温度範囲で適切な粘度に制御することも可能である。一般的に方向性電磁鋼板の製造工程で使用される油脂のエマルジョンや焼鈍分離剤や絶縁コーティング液のようなコロイド溶液を塗布する場合の濃度は、油脂のエマルジョンであれば、水と油脂の合計に対する油脂の体積濃度で50～70%であり、焼鈍分離剤であれば水とマグネシアに対するマグネシアの濃度で5～80%、さらに絶縁コーティング液であれば水とリン酸アルミニウムとコロイダルシリカとクロム酸に対するリン酸アルミニウムとコロイダルシリカとクロム酸の濃度で20～80%とすれば、本発明の突起制御効果を好ましく得るための粘度に制御できる。もちろん適切な濃度範囲は、発明効果を得るための粘度の調整とともに、製造工程での温度管理や取り扱いの容易さを考慮すべきことは温度と同様である。

【0118】

〔塗布厚さについて〕

塗布物質の厚さが薄過ぎると、熔融鉄と鋼板表面の間に塗布物質が介在して鋼板1への溶着を防ぐ効果が小さくなり、 $V2/V1$ が十分に低下しないとともに、熔融鉄の飛散に対する障害にもならないため熔融鉄が遠くまで飛散して、幅 W_1 、距離 L_s が過度に大きくなる。塗布物質の厚さが厚過ぎると、熔融鉄が油膜の上に乗ることが困難となり、溝5の極近傍のみに堆積して凸部7の高さ h が高くなってしまふとともに、所望の $V2/V1$ が得られなくなる。このため、塗布物質の厚さは好ましくは0超～50 μm とし、より好ましくは0.01～25 μm とし、さらに好ましくは0.1～1 μm とする。

【0119】

〔塗布物質についてその他〕

塗布物質の沸点は好ましくは100℃以上である。沸点が低すぎると、レーザ照射時に瞬間的に高温となる溝周囲から物質が蒸発してしまい本発明の効果が失われてしまう。完全に蒸発しなくとも、塗布物質の厚さが薄くなってしまい、塗布物質を溝周辺に押しとどめる効果が小さくなり、距離 L_s 、突起幅 W が過度に大きくなったり、膜が薄過ぎるため、塗布膜の上に乗上げた熔融鉄の母鋼板への溶着を抑制することができず、所望の $V2/V1$ が得られない。沸点はより好ましくは130℃以上であり、さらに好ましくは150℃以上である。混合物質の場合は、溶媒の沸点を制御すると良い。

【0120】

なお、上記実施形態は、何れも本発明を実施するにあたっての具体化の例を示したものに過ぎず、これらによって本発明の技術的範囲が限定的に解釈されてはならないものである。すなわち、本発明はその技術思想、又はその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

【実施例】

【0121】

次に、本発明の実施例について説明する。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。

【0122】

(基本条件)

使用する方向性電磁鋼板の製造条件は以下のようなものである。

質量%で、Si:3.0%、C:0.08%、酸可溶性Al:0.05%、N:0.01%、Mn:0.12%、Cr:0.05%、Cu:0.04%、P:0.01%、Sn:0.02%、Sb:0.01%、Ni:0.005%、S:0.007%、Se:0.001%、を含有し、残部がFe及び不純物からなる化学成分を有するスラブに対して熱間圧延を実施し、厚さ2.3mmの熱延鋼板を得る。

【0123】

続いて、上記の熱延鋼板に対して、1000℃で1分間の焼鈍処理を実施する。その後、酸洗、冷間圧延を実施し、厚さ0.23mmの冷延鋼板を得る。

【0124】

続いて、冷延鋼板に対して、800℃で2分間の脱炭焼鈍を実施し、マグネシア(MgO)を主成分として含有する焼鈍分離剤を表面に塗布する。必要により公知の窒化焼鈍を行う。

【0125】

続いて、1200℃20時間の仕上焼鈍処理を実施する。その結果、結晶粒の磁化容易軸と圧延方向とが一致するように結晶方位が制御された鋼板（ガラス皮膜が表面に形成された鋼板）が得られる。

10

【0126】

上記の鋼板に、コロイダルシリカ及びリン酸塩を含有する絶縁コーティング液を塗布し、850℃で1分間の熱処理を実施し、最終的に、溝及び突起が形成され、さらに表面にガラス皮膜及び絶縁皮膜を備える方向性電磁鋼板を得る。

【0127】

なお、上記工程の途中で、特定物質の塗布及びレーザ照射を実施し、鋼板の表面に、圧延方向に直交する方向に延びる複数の溝（及び突起）を、圧延方向に沿って所定間隔で形成する。レーザの照射条件は、レーザ出力：200W、レーザの圧延方向における集光スポット径（86%径）：100μm、レーザの板幅方向における集光スポット径（86%径）：4000μm、レーザ走査速度：16m/s、レーザ走査ピッチ：4mmである。

20

【0128】

本発明効果は、鋼板の特性やレーザ照射条件によるものではないため、上記は、レーザ照射前の塗布物質制御以外は、一般的な方向性電磁鋼の製造条件で固定している。最終的に得られる上記方向性電磁鋼板は、レーザ照射時の鋼板表面の特定物質の塗布条件に応じて変化する突起の形状を除けば、主に、Si：3.0%を含有する通常の方方向性電磁鋼板である。本発明のポイントとなる特定物質の塗布条件及びレーザ照射を含めた実施タイミングについては、各実験例において説明する。

【0129】

評価する鋼板の溝の深さは25～30μm以下、溝の幅は30～40μmであり、レーザ照射の条件を一定とした場合の溝の形状変動の範囲内かつ公知範囲であり、特別なものではない。

30

【0130】

これらの方向性電磁鋼板の磁気特性、耐錆性、絶縁性、及び巻鉄心にしたときの特性を測定する。また、これらの方向性電磁鋼板の皮膜を剥離し、母鋼板の表面形状を、上記実施形態で説明した特定方法によって特定する。三次元粗さの測定及び表面粗さパラメータ(Ra、Rsm)の測定には、レーザ式表面粗さ測定器（キーエンス社製のVK-9700）を用いる。突起に関する測定値は溝の両側の突起について測定した値の平均値である。

【0131】

40

耐錆性は、各方向性電磁鋼板から30mm角の試験片を採取し、その試験片を、温度50℃及び湿度91%の雰囲気中に試験片を1週間放置して、その前後における試験片の重量変化に基づき、下記の式の質量増加率にて評価する。錆が発生すると試験片の重量が増加するため、重量増加率が少ないものほど耐錆性が良いと判断できる。

放置前後の質量増加率(%) = 100 × (放置後 - 放置前) / 放置前

【0132】

絶縁性は、JIS C 2550-4に記載の方法により測定される層間電流で評価する。

【0133】

磁気特性（磁束密度B₈、鉄損W_{17/50}）はJIS C 2556に記載のHコイ

50

ル法に従い $W 60\text{ mm} \times L 300\text{ mm}$ の単板を評価する。

【0134】

巻鉄心にしたときの特性として、ビルディングファクタ（BF）及び騒音を評価する。

【0135】

ビルディングファクタの測定では、各方向性電磁鋼板を積層し、図10A及び図10Bに示す寸法（mm）を有する巻鉄心20を作製する。巻鉄心20はバンド21で締め付ける。そして、巻鉄心20に対して、JIS C 2550-1に記載の励磁電流法を用いた測定を、周波数50Hz、磁束密度1.7Tの条件で行い、巻鉄心の鉄損値 W_A を測定する。また、巻鉄心に使用した方向性電磁鋼板の平面部のみからなる幅100mm×長さ500mmの試料を採取し、この試料に対して、JIS C 2556に記載のHコイル法を用いた電磁鋼板単板磁気特性試験による測定を、周波数50Hz、磁束密度1.7Tの条件で行い、素材鋼板単板の鉄損値 W_B を測定する。そして、鉄損値 W_A を鉄損値 W_B で除することによりビルディングファクタ（BF）を求める。本発明においてはBFが小さいほど、素材鋼板を巻鉄心として使用した際の悪影響が少ないと評価できる。

10

【0136】

騒音の評価では、上記の巻鉄心を準備し、励磁し、騒音測定を実施する。この騒音測定は暗騒音が16dBAの無響室内で、騒音計を鉄心表面から0.3mの位置に設置し、聴感補正としてA特性を使用して行う。また励磁では周波数を50Hz、磁束密度を1.7Tとする。

【0137】

20

（第1の実験例）

第1の実験例の鋼板は窒化焼鈍を含むプロセスで製造するものである。表1～表3に詳細を示す。

【0138】

【表 1】

表1

試験 No.	塗布条件と溝形成工程					
	塗布物質	濃度 (%)	温度 (°C)	粘度 (mm ² /s)	塗布厚さ (μm)	工程S99のタイミング
1-1	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.54	工程S04とS05の間 (圧延まま)
1-2	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.54	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-3	ダフニーロールオイルCU-40	50	25	4.3	0.48	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-4	ダフニーハイテンオイル	50	25	66.0	0.54	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-5	ダフニーマーグプラスED5	50	25	5.5	0.48	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-6	ダフニーオイルコートNo.9	50	25	15.0	0.54	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-7	純水	50	25	0.9	0.53	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-8	ベンゼン	50	25	0.7	0.44	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-9	エタノール	50	25	1.4	0.57	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-10	酢酸メチル	50	25	0.5	0.53	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-11	トルエン	50	25	0.7	0.52	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-12	ヘキサン	50	25	0.5	0.51	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-13	ヘプタン	50	25	0.6	0.51	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-14	焼鈍分離剤	50	25	7.6	0.51	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-15	絶縁コーティング液	50	25	24.0	0.46	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
1-16	なし	-	-	-	-	工程S04とS05の間 (脱脂まま)
1-17	ダフニーロールオイルCU-40	50	25	4.3	0.54	工程S05とS06の間 (窒化後)
1-18	焼鈍分離剤	50	25	7.6	0.51	工程S06とS07の間
1-19	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.50	工程S06とS07の間
1-20	なし	-	-	-	-	工程S07とS08の間
1-21	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.50	工程S07とS08の間
1-22	絶縁コーティング液	50	25	24.0	0.46	工程S08中
1-23	なし	-	-	-	-	工程S08後
1-24	なし	-	-	-	-	溝は形成せず

【0139】

【表 2】

表2

試験 No.	溝および突起形態										
	V1 (μm^3)	V2 (μm^3)	V2/V1	h (μm)	Ls (μm)	W ₁ (μm)	W _n /W ₁ の 最大値	Ra (μm)	RSm (μm)	結晶粒の 平均数 (個)	{110}<001> 面積率 (%)
1-1	612234	85713	0.14	4	6	9	0.16	0.80	40	1.1	97
1-2	640118	89617	0.14	4	6	9	0.21	0.90	40	1.0	100
1-3	596703	322220	0.54	9	21	22	0.42	1.10	140	1.0	100
1-4	640457	204946	0.32	4	17	14	0.33	1.20	60	1.0	100
1-5	682218	409331	0.60	7	12	16	0.44	1.40	80	3.2	68
1-6	557239	239613	0.43	5	5	14	0.37	1.60	50	1.0	100
1-7	632118	461446	0.73	10	29	37	0.76	1.80	120	1.0	100
1-8	562111	432825	0.77	9	13	35	0.54	1.70	100	5.6	68
1-9	617223	333300	0.54	6	17	24	0.61	1.60	140	2.0	75
1-10	666632	506640	0.76	7	16	18	0.55	1.40	90	1.0	100
1-11	597213	435965	0.73	8	24	22	0.46	1.70	110	1.9	70
1-12	703281	407903	0.58	9	21	34	0.61	1.40	80	2.7	66
1-13	723204	462851	0.64	8	14	26	0.31	1.20	80	1.8	73
1-14	532015	180885	0.34	5	3	12	0.28	0.80	60	1.3	85
1-15	610928	171060	0.28	5	7	7	0.32	1.80	50	1.0	100
1-16	685233	582448	0.85	17	47	46	<u>1.75</u>	<u>2.10</u>	<u>160</u>	6.8	70
1-17	633568	399148	0.63	9	15	75	0.63	1.10	145	17.1	75
1-18	599824	395884	0.66	5	11	16	0.69	1.60	110	18.5	68
1-19	602247	445663	0.74	15	5	67	0.74	1.20	70	19.0	67
1-20	598836	544941	0.91	10	2	27	<u>1.20</u>	1.40	120	20.2	16
1-21	610235	207480	0.34	2	12	16	0.34	1.50	110	15.0	27
1-22	631972	366544	0.58	6	15	18	0.64	1.10	100	23.8	6
1-23	610234	24409	<u>0.04</u>	1	1	5	0.10	0.80	<u>170</u>	30.6	2
1-24	-	-	-	-	-	-	-	<u>0.29</u>	<u>9</u>	-	-

【 0 1 4 0 】

10

20

30

【表 3】

表3

試験 No.	特性				特性(巻鉄芯)		評価
	B8 (T)	W17/50 (W/kg)	耐錆性 (%)	絶縁性 (mA)	ビルディングファクタ (BF)	騒音 (dBA)	
1-1	1.92	0.67	0	0	0.94	21	発明例
1-2	1.92	0.67	0	0	0.93	24	発明例
1-3	1.91	0.72	4	100	0.97	30	発明例
1-4	1.92	0.74	3	40	0.96	29	発明例
1-5	1.92	0.76	2	65	0.95	28	発明例
1-6	1.91	0.75	1	80	0.96	28	発明例
1-7	1.89	0.80	3	300	0.97	29	発明例
1-8	1.89	0.82	3	200	0.96	28	発明例
1-9	1.91	0.76	2	120	0.97	27	発明例
1-10	1.92	0.74	2	210	0.97	27	発明例
1-11	1.90	0.79	3	405	0.98	28	発明例
1-12	1.89	0.78	2	330	0.97	29	発明例
1-13	1.91	0.73	2	280	0.97	28	発明例
1-14	1.91	0.69	1	55	0.97	27	発明例
1-15	1.92	0.68	1	10	0.96	26	発明例
1-16	1.84	1.01	11	1600	1.07	36	比較例
1-17	1.90	0.82	2	120	0.97	26	発明例
1-18	1.91	0.83	5	50	0.97	27	発明例
1-19	1.89	0.79	2	80	0.98	26	発明例
1-20	1.86	0.91	9	1400	1.08	38	比較例
1-21	1.87	0.83	4	500	1.06	37	発明例
1-22	1.89	0.84	4	40	0.97	28	発明例
1-23	1.90	0.77	12	1700	1.07	36	比較例
1-24	1.92	0.87	0	0	1.02	38	比較例

【0141】

塗布物質の温度、塗布厚さは一定として、粘度が異なる塗布物質を塗布する場合の例である。試験No. 1-1～No. 1-16では冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で塗布物質の塗布及びレーザー照射を実施した。試験No. 1-17では脱炭焼鈍工程S05と焼鈍分離剤塗布工程S06の間で、工程S06で焼鈍分離剤を塗布後、乾燥し、さらに塗布物質としてダイロール（大同化学工業株式会社製）を塗布した上でレーザー照射を実施した。試験No. 1-18では焼鈍分離剤塗布工程S06と仕上焼鈍工程S07の間で、工程S06で塗布する焼鈍分離剤を塗布物質としてレーザー照射を実施した。試験No. 1-19では焼鈍分離剤塗布工程S06と仕上焼鈍工程S07の間で、工程S06で焼鈍分離剤を塗布後、乾燥し、さらに塗布物質としてダイロールを塗布した上でレーザー照

10

20

30

40

50

射を実施した。試験No. 1-19ではレーザ照射後、ダイロールが付着したまま工程S07を実施した。試験No. 1-20及びNo. 1-21では仕上焼鈍工程S07と絶縁被膜形成工程S08の間でレーザ照射を実施した。試験No. 1-22では絶縁被膜形成工程S08の中で塗布される絶縁コーティング液を特定物質としてレーザ照射を実施した後、絶縁被膜の焼付を実施した。試験No. 1-23では絶縁被膜形成工程S08後、皮膜の上からレーザ照射を実施した。試験No. 1-24では溝を形成することなく絶縁被膜の形成までの処理を行った。

【0142】

試験No. 1-2～No. 1-15では、冷間圧延後に鋼板表面の圧延油を一旦電解脱脂で除去した後、所定の塗布物質を所定の条件で塗布した。ダイロールSZ-48Hについては、塗布前の冷間圧延において圧延油として使用しており、試験No. 1-1では、圧延直後に表面に圧延油が付着したままレーザ照射した。試験No. 1-2～No. 1-15では冷間圧延工程S04後に圧延油を一旦脱脂し、その後、塗布物質を再塗布した。試験No. 1-4などで使用したダフニーロールオイル、ダフニーハイテンオイル、ダフニーマーズプラス及びダフニーオイルコートは出光興産株式会社製である。

【0143】

塗布物質による鋼板表面の形状の制御及び特性の向上を確認できた。塗布物質を適用しない試験No. 1-16及びNo. 1-20では突起の制御が好ましくなく、特性が劣化した。試験No. 1-23では塗布物質は適用しないが、溝形成に伴う溶融鉄は皮膜の上に付着したため、鋼板に溶着した突起はほとんど形成されなかった。しかし、V2/V1の値が過小であったため、突起による絶縁皮膜の密着性の向上の効果が十分に得られず、絶縁皮膜の一部が剥がれ、耐錆性と絶縁性が低下した。図11に、試験No. 1-23の鋼板51の断面図を示す。また、脱炭焼鈍工程S05より前にレーザ照射工程S99を実施した発明例では、仕上焼鈍で少なくともそれなりの二次再結晶が起きるため、突起を含めて結晶粒径と結晶方位が制御され、磁気特性も良好であった。試験No. 1-24では、溝を形成しなかったために、鉄損を十分に低減できなかった。

【0144】

(第2の実験例)

第2の実験例の鋼板は窒化焼鈍を含まないプロセスで製造するものである。表4～表6に詳細を示す。

【0145】

10

20

30

【表 4】

表4

試験 No.	塗布条件と溝形成工程					
	塗布物質	濃度 (%)	温度 (°C)	粘度 (mm ² /s)	塗布厚さ (μm)	工程S99のタイミング
2-1	ダイロール SZ-48H	10	25	5.0	0.50	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-2	ダイロール SZ-48H	25	25	15.0	0.48	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-3	ダイロール SZ-48H	70	25	56.0	0.51	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-4	ダイロール SZ-48H	95	25	92.0	0.50	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-5	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.53	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-6	ダイロール SZ-48H	50	50	20.0	0.47	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-7	ダイロール SZ-48H	50	70	10.0	0.48	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-8	ダイロール SZ-48H	50	90	6.0	0.50	工程S04とS05の間 (圧延まま)
2-9	ダイロール SZ-48H	10	25	5.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-10	ダイロール SZ-48H	25	25	15.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-11	ダイロール SZ-48H	70	25	56.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-12	ダイロール SZ-48H	95	25	92.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-13	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-14	ダイロール SZ-48H	50	50	20.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-15	ダイロール SZ-48H	50	70	10.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
2-16	ダイロール SZ-48H	50	90	6.0	0.50	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)

【 0 1 4 6 】

【表 5】

表5

試験 No.	溝および突起形態										
	V1 (μm^3)	V2 (μm^3)	V2/V1	h (μm)	Ls (μm)	W ₁ (μm)	W _n /W ₁ の 最大値	Ra (μm)	RSm (μm)	結晶粒の 平均数 (個)	{110}<001> 面積率 (%)
2-1	641319	384791	0.60	8	23	30	0.74	1.70	116	2.1	89
2-2	591241	212847	0.36	6	17	15	0.75	1.60	80	1.0	100
2-3	638172	51054	0.08	3	12	3	0.47	0.90	40	1.0	100
2-4	684283	205285	0.30	6	4	4	0.15	1.60	65	1.4	88
2-5	553281	77459	0.14	4	7	9	0.23	1.20	55	1.0	100
2-6	632318	145433	0.23	4	18	12	0.32	0.80	60	1.0	100
2-7	562179	140545	0.25	4	15	14	0.44	2.00	65	1.1	92
2-8	618429	284477	0.46	6	23	19	0.46	1.70	90	1.5	91
2-9	687491	426244	0.62	7	25	24	0.87	1.30	70	1.3	87
2-10	532113	133028	0.25	7	20	15	0.44	1.40	83	1.0	100
2-11	718231	79005	0.11	4	13	4	0.15	0.60	43	1.0	100
2-12	532117	313949	0.59	5	3	2	0.34	0.90	65	1.8	89
2-13	547233	65668	0.12	5	7	9	0.21	0.90	55	1.0	100
2-14	685056	198666	0.29	4	12	12	0.37	1.20	64	1.7	92
2-15	607723	212703	0.35	5	19	16	0.62	1.50	62	1.5	91
2-16	535932	273325	0.51	7	19	19	0.74	1.10	86	1.2	94

【 0 1 4 7 】

10

20

【表 6】

表6

試験 No.	特性				特性(巻鉄心)		評価
	B8 (T)	W17/50 (W/kg)	耐錆性 (%)	絶縁性 (mA)	ビルディングファクタ (BF)	騒音 (dBA)	
2-1	1.91	0.71	2	50	1.07	38	発明例
2-2	1.92	0.66	1	0	0.93	23	発明例
2-3	1.95	0.62	0	0	0.94	26	発明例
2-4	1.93	0.70	0	60	0.97	30	発明例
2-5	1.92	0.67	0	0	0.94	28	発明例
2-6	1.93	0.66	0	0	0.97	29	発明例
2-7	1.91	0.72	1	10	0.98	30	発明例
2-8	1.91	0.76	1	10	0.97	30	発明例
2-9	1.91	0.70	2	30	1.06	30	発明例
2-10	1.92	0.66	0	0	0.94	28	発明例
2-11	1.95	0.62	0	0	0.95	30	発明例
2-12	1.93	0.70	0	45	0.98	26	発明例
2-13	1.92	0.67	0	0	0.94	27	発明例
2-14	1.91	0.71	0	0	0.94	29	発明例
2-15	1.91	0.72	1	5	0.96	24	発明例
2-16	1.91	0.76	1	10	0.98	30	発明例

【0148】

試験No. 2-1～No. 2-16では冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で塗布物質の塗布及びレーザ照射を実施した。塗布物質及び塗布厚さを一定とし、塗布状態での濃度と温度で粘度を変化させる例である。塗布物質はすべてダイロールSZ-48H（大同化学工業株式会社製）であり、圧延ままの場合と、脱脂後に再塗布する場合を評価した。

【0149】

粘度の変化に伴う発明効果の変化が確認でき、粘度に特に好ましい範囲があることが確認できるとともに、圧延油を圧延ままで塗布物質として利用した場合でも、再塗布した場合と同等の効果が得られることがわかる。

【0150】

（第3の実験例）

第3の実験例の鋼板は窒化焼鈍を含むプロセスで製造するものである。表7～表9に詳細を示す。

【0151】

【表 7】

表7

試験 No.	塗布条件と溝形成工程					
	塗布物質	濃度 (%)	温度 (°C)	粘度 (mm ² /s)	塗布厚さ (μm)	工程S99のタイミング
3-1	なし	-	-	-	-	工程S04とS05の間 (圧延まま)
3-2	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.06	工程S04とS06の間 (圧延まま)
3-3	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.22	工程S04とS07の間 (圧延まま)
3-4	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.88	工程S04とS08の間 (圧延まま)
3-5	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	1.50	工程S04とS09の間 (圧延まま)
3-6	なし	-	-	-	-	工程S04とS05の間 (脱脂後、再塗布)
3-7	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.02	工程S04とS06の間 (脱脂後、再塗布)
3-8	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.06	工程S04とS07の間 (脱脂後、再塗布)
3-9	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.18	工程S04とS08の間 (脱脂後、再塗布)
3-10	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	0.60	工程S04とS09の間 (脱脂後、再塗布)
3-11	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	1.04	工程S04とS10の間 (脱脂後、再塗布)
3-12	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	1.80	工程S04とS11の間 (脱脂後、再塗布)
3-13	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	2.80	工程S04とS12の間 (脱脂後、再塗布)
3-14	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	4.91	工程S04とS13の間 (脱脂後、再塗布)
3-15	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	8.35	工程S04とS14の間 (脱脂後、再塗布)
3-16	ダイロール SZ-48H	50	25	46.0	13.11	工程S04とS15の間 (脱脂後、再塗布)

【 0 1 5 2 】

【表 8】

表8

試験 No.	溝および突起形態										結晶粒の 平均数 (個)	{110}<001> 面積率 (%)
	V1 (μm^3)	V2 (μm^3)	V2/V1	h (μm)	Ls (μm)	W _l (μm)	W _n /W _l の 最大値	Ra (μm)	RSm (μm)			
3-1	661309	555500	<u>0.84</u>	27	12	43	<u>1.12</u>	<u>3.50</u>	<u>300</u>	7.7	75	
3-2	592137	112506	0.19	2	20	7	0.66	0.60	55	1.0	100	
3-3	702034	231671	0.33	3	12	19	0.22	1.10	30	1.0	100	
3-4	721211	411090	0.57	4	5	27	0.36	1.30	90	1.0	100	
3-5	702034	498444	0.71	7	3	19	0.22	1.10	114	1.2	97	
3-6	568393	505870	<u>0.89</u>	25	32	31	<u>2.70</u>	<u>4.20</u>	<u>215</u>	<u>11.2</u>	43	
3-7	601211	66133	0.11	8	45	9	0.71	1.70	54	1.3	95	
3-8	623032	118376	0.19	3	10	6	0.56	0.90	23	1.0	100	
3-9	619023	61902	0.10	2	3	22	0.97	0.70	38	1.4	92	
3-10	702034	105305	0.15	5	7	22	0.24	1.10	36	1.0	100	
3-11	721211	137030	0.19	4	5	15	0.30	1.30	85	1.0	100	
3-12	702034	161468	0.23	7	5	19	0.61	1.00	110	1.0	100	
3-13	721211	238000	0.33	8	10	26	0.30	1.50	90	1.0	100	
3-14	721211	411090	0.57	7	15	26	0.36	0.90	122	1.1	98	
3-15	721211	540908	0.75	8	5	27	0.44	1.30	144	1.5	92	
3-16	721211	620241	<u>0.86</u>	11	2	10	0.33	<u>2.20</u>	90	9.7	50	

【 0 1 5 3 】

10

20

【表 9】

表9

試験 No.	特性				特性(巻鉄心)		評価
	B8 (T)	W17/50 (W/kg)	耐錆性 (%)	絶縁性 (mA)	ビルディングファクタ (BF)	騒音 (dBA)	
3-1	1.84	0.93	8	900	1.05	38	比較例
3-2	1.92	0.68	0	0	0.94	23	発明例
3-3	1.93	0.67	1	40	0.93	26	発明例
3-4	1.91	0.72	2	120	0.98	30	発明例
3-5	1.92	0.67	1	40	0.94	28	発明例
3-6	1.83	0.96	8	840	1.06	35	比較例
3-7	1.92	0.67	0	10	0.92	26	発明例
3-8	1.93	0.67	1	60	0.94	23	発明例
3-9	1.91	0.70	2	100	0.97	29	発明例
3-10	1.93	0.67	1	40	0.95	26	発明例
3-11	1.90	0.69	2	85	0.97	27	発明例
3-12	1.92	0.71	1	40	0.94	26	発明例
3-13	1.92	0.69	2	125	0.98	28	発明例
3-14	1.91	0.70	2	120	0.97	27	発明例
3-15	1.90	0.69	2	120	0.97	27	発明例
3-16	1.87	0.85	6	685	1.05	37	比較例

【0154】

試験No. 3-1～No. 3-16では冷間圧延工程S04と脱炭焼鈍工程S05の間で塗布物質の塗布及びレーザ照射を実施した。塗布物質及び粘度を一定とし、塗布厚さの影響を確認する例である。塗布物質はすべてダイロールSZ-48H（大同化学工業株式会社製）であり、圧延ままの場合と、脱脂後に再塗布する場合を評価した。

【0155】

塗布厚さの変化に伴う発明効果の変化が確認でき、塗布厚さに特に好ましい範囲があることが確認できる。塗布厚さは薄い場合に突起を小さくできる傾向が見られるが、熔融鉄の飛散を十分に抑えることができず、突起が溝から離れた位置に形成されるようになる。一方で厚過ぎる場合は、熔融鉄が皮膜の上に乗ることができず、V2/V1が悪化するとともに、溝の極近傍に集中して堆積している。このような状態では、突起形態の変動（Ra、Rsm）が大きくなり、局所的に二次再結晶が起きにくい突起が生じて、磁気特性も低下気味となる。

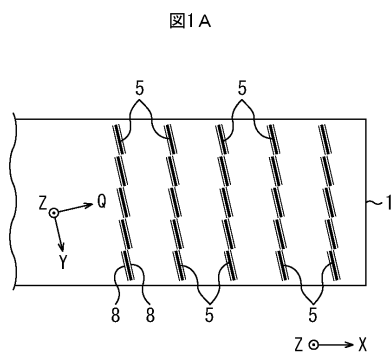
【産業上の利用可能性】

【0156】

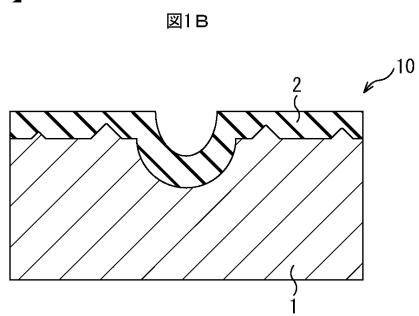
本発明は、例えば、変圧器の鉄芯用の方向性電磁鋼板の製造産業及び利用産業において

利用することができる。

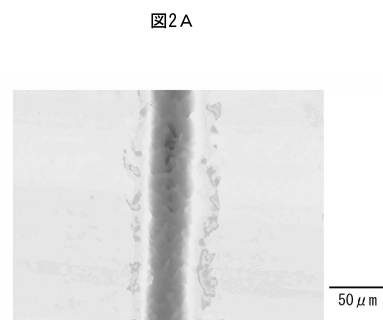
【図 1 A】



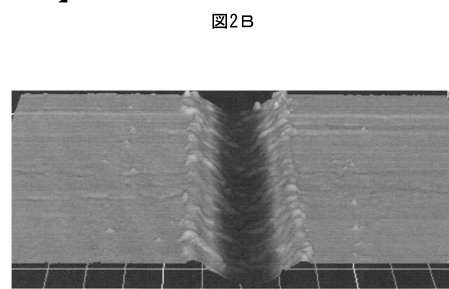
【図 1 B】



【図 2 A】

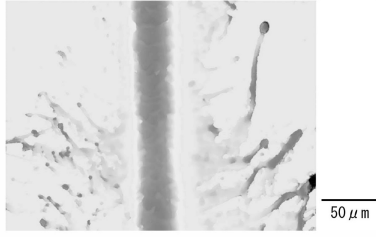


【図 2 B】



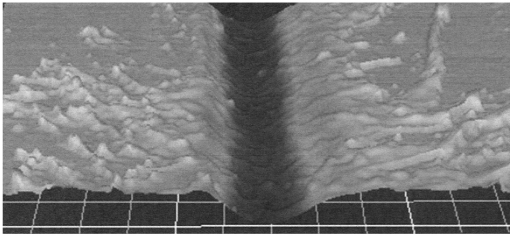
【図 3 A】

図3A



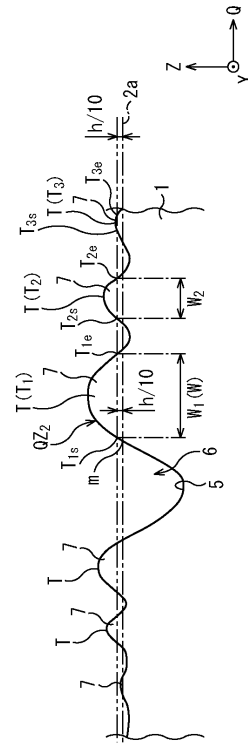
【図 3 B】

図3B



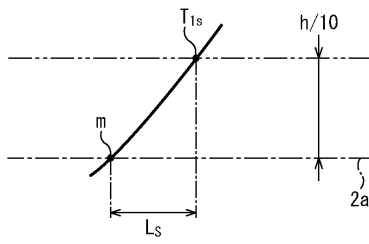
【図 4 A】

図4A



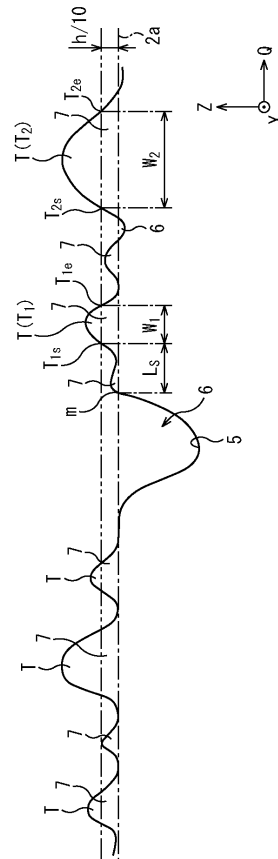
【図 4 B】

図4B



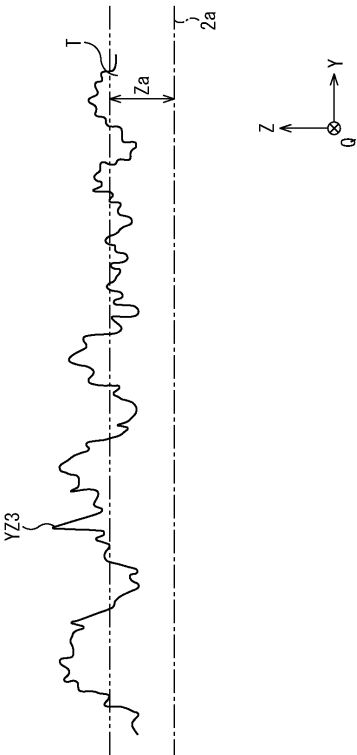
【図 5】

図5

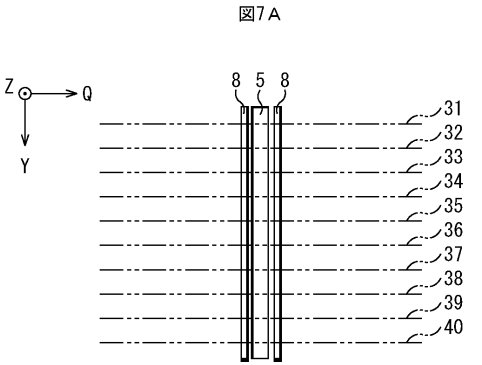


【図 6】

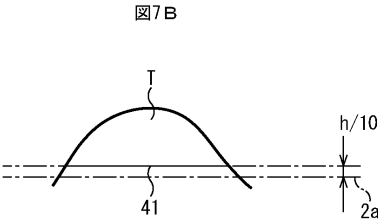
図6



【図 7 A】

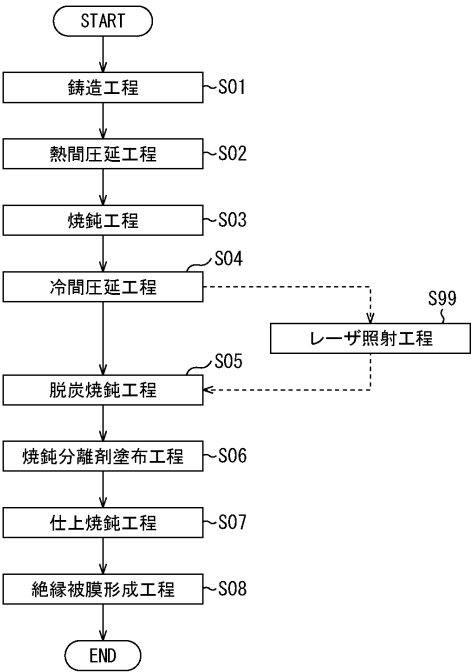


【図 7 B】



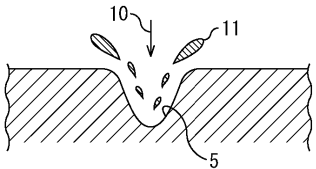
【図 8】

図8



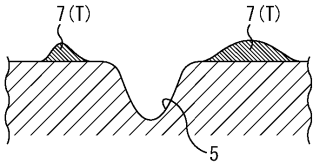
【図 9 A】

図9A



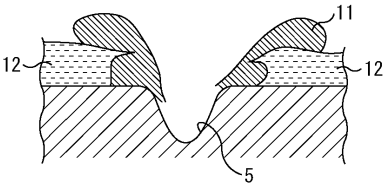
【図 9 B】

図9B

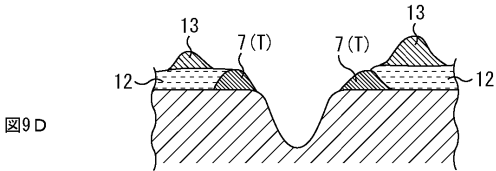


【図 9 C】

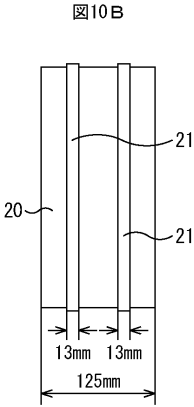
図9C



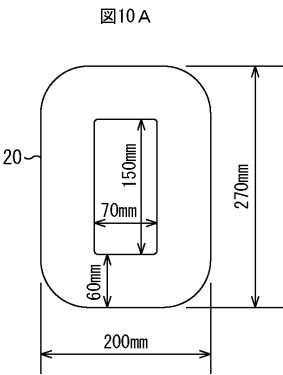
【図 9 D】



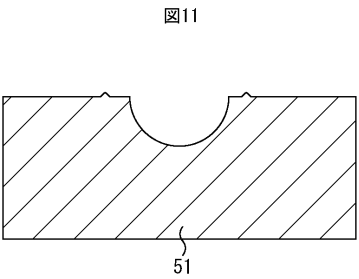
【図 1 0 B】



【図 1 0 A】



【図 1 1】



フロントページの続き

- (72)発明者 茂木 尚
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 濱村 秀行
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 今井 浩文
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 林 申也
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
- (72)発明者 村上 健一
東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内

審査官 静野 朋季

- (56)参考文献 特開2012-87332 (JP, A)
国際公開第2012/033197 (WO, A1)
国際公開第2012/172624 (WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
C21D 8/12
C22C 38/00-38/60