

明 細 書

発明の名称：

無方向性電磁鋼板、ロータコア、モータ、及び、無方向性電磁鋼板の製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、無方向性電磁鋼板、ロータコア、モータ、及び、無方向性電磁鋼板の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 無方向性電磁鋼板は、モータコア（鉄心）の素材として広く利用されている。高効率なモータコアを得るために、無方向性電磁鋼板には優れた鉄損が求められる。そこで、優れた鉄損を持つ無方向性電磁鋼板を製造するために、鋼板の高合金化が進んできている。

[0003] モータコアは、固定子であるステータコア及び回転子であるロータコアを備える。ステータコア及びロータコアのうち、ロータコアでは特に、次の理由により、高い強度と優れた磁気特性（鉄損劣化の低減）との両方が求められる。電気自動車やハイブリッド自動車用途のモータでは、近年、モータ回転数を高速化することにより、モータ出力を高める設計がされている。そのため、モータの動作中において、回転子であるロータコアに掛かる負荷が増大している。したがって、ロータコアには高い強度が求められる。また、ロータコアは回転軸に固定されるため、冷却が困難である。そこで、ロータコアの熱管理も重要である。無方向性電磁鋼板の鉄損は最終的に熱となる。そのため、ロータコアの熱管理の観点からも、無方向性電磁鋼板の鉄損劣化を低減することが求められる。

[0004] 高い強度及び優れた磁気特性を有する無方向性電磁鋼板が、特開2008-050686号公報（特許文献1）に提案されている。特許文献1では、化学組成を適切に調整することにより、高い強度及び優れた磁気特性を実現している。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2008-050686号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] ところで、無方向性電磁鋼板からロータコアを製造する場合、無方向性電磁鋼板に対して打抜き加工を実施して、ロータコア素材等の打抜き加工品を製造する。高合金及び高強度の無方向性電磁鋼板では、打抜き加工時に所望の形状に打ち抜くことが困難となり、打抜き加工後の打抜き加工品の寸法精度が低下する場合がある。具体的には、打抜き加工後の打抜き加工品の端面（打抜き端面）に凹凸が生じる場合がある。打抜き端面に凹凸が生じると、打抜き加工品をモータに組み込んだ場合に、磁石やシャフト、モータケース等の他部品との接触界面で、打抜き加工品が他部品と密着しにくくなる。そのため、モータコアの固定に課題が生じる。さらに、上述のモータコアの熱管理における抜熱に課題が生じる。一方で、無方向性電磁鋼板に導入されたせん断ひずみは鉄損の劣化を生じる。したがって、モータコアの発熱量が増加する。最近では、ロータコア素材は、機能向上のために複雑な形状に打抜き加工されるようになってきている。そのため、ロータコア素材では、打抜き端面が占める割合が増加してきている。その結果、打抜き加工時にロータコア素材に導入されるせん断ひずみによる鉄損劣化低減の重要性も増してきている。

[0007] 本開示の目的は、高強度及び優れた磁気特性が得られ、かつ、打抜き加工後の寸法精度に優れた無方向性電磁鋼板、ロータコア、モータ、及び、無方向性電磁鋼板の製造方法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0008] 本開示の無方向性電磁鋼板は、質量％で、Si：3.1～4.5％、C：0.0025％以下、N：0.0025％以下、O：0.0400％以下、

P : 0.100%以下、S : 0.0050%以下、Ti : 0.0100%以下、Mn : 2.0%以下、Al : 1.500%以下、Zr : 0~0.0100%、Nb : 0~0.0100%、V : 0~0.0100%、Mo : 0~0.100%、Cr : 0~2.000%、La : 0~0.0100%、Ce : 0~0.0100%、B : 0~0.0010%、Zn : 0~0.0050%、Ga : 0~0.0050%、Ge : 0~0.0050%、As : 0~0.0100%、Ni : 0~0.500%、Cu : 0~0.500%、Sn : 0~0.200%、Sb : 0~0.100%、Ca : 0~0.0050%、Nd : 0~0.0010%、Mg : 0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

無方向性電磁鋼板ではさらに、引張強さTSが570MPaよりも高い。

無方向性電磁鋼板ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

無方向性電磁鋼板ではさらに、平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0009] 本開示のロータコアは、互いに積層された複数のロータコア素材を備える。

ロータコア素材は、質量%で、Si : 3.1~4.5%、C : 0.0025%以下、N : 0.0025%以下、O : 0.0400%以下、P : 0.100%以下、S : 0.0050%以下、Ti : 0.0100%以下、Mn : 2.0%以下、Al : 1.500%以下、Zr : 0~0.0100%、Nb : 0~0.0100%、V : 0~0.0100%、Mo : 0~0.100%、Cr : 0~2.000%、La : 0~0.0100%、Ce : 0~0.0100%、B : 0~0.0010%、Zn : 0~0.0050%、Ga : 0~0.0050%、Ge : 0~0.0050%、As : 0~0.0100%、Ni : 0~0.500%、Cu : 0~0.500%、Sn : 0~0.200%、Sb : 0~0.100%、Ca : 0~0.0050%、Nd : 0~0.0010%、Mg : 0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

ロータコア素材ではさらに、引張強さTSが570MPaよりも高い。

ロータコア素材ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$\text{WH} = Y_{2.0} - \text{YS} \quad (3)$$

ロータコア素材ではさらに、平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - Si \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0010] 本開示のモータは、上述のロータコアを備える。

[0011] 本開示の無方向性電磁鋼板の製造方法は、熱間圧延工程と、冷間圧延工程と、仕上げ焼鈍工程とを備える。

熱間圧延工程では、スラブに対して熱間圧延を実施して熱延鋼板を製造する。

冷間圧延工程では、熱延鋼板を冷間圧延して冷延鋼板を製造する。

仕上げ焼鈍工程では、冷延鋼板に対して仕上げ焼鈍炉で仕上げ焼鈍を実施する。

仕上げ焼鈍工程ではさらに、950℃以下の最高到達温度T1で冷延鋼板を焼鈍する。さらに、最高到達温度T1で冷延鋼板に付与する張力TEを2.0～10.0MPaとする。さらに、仕上げ焼鈍炉の加熱帯、均熱帯及び冷却帯での焼鈍温度T1～700℃の間の滞在時間t0(秒)と、冷却帯での700～500℃の間の滞在時間t1(秒)とが式(A)及び式(B)を満たすようにする。

$$t1 - t0 > 0 \quad (A)$$

$$t1 / t0 \leq 3.0 \quad (B)$$

さらに、仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での500℃以上の温度域における加熱帯、均熱帯及び冷却帯から選択される1箇所以上において、水素分圧 P_{H_2} (atm)に対する水蒸気分圧 P_{H_2O} (atm)の比を0.05よりも高くする、又は、酸素濃度を0.010%よりも高くする。

さらに、冷却過程での冷延鋼板の長手方向での温度勾配CGを20℃/m以下とする。

発明の効果

[0012] 本開示の無方向性電磁鋼板では、高強度及び優れた磁気特性が得られ、か

つ、打抜き加工後の寸法精度に優れる。本開示のロータコア、及び、本開示のモータは、本開示の無方向性電磁鋼板を素材として製造される。本開示の無方向性電磁鋼板の製造方法は、上述の本開示の無方向性電磁鋼板を製造できる。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]図1は、応力-ひずみ曲線の一例を示す模式図である。

[図2]図2は、図1と異なる応力-ひずみ曲線の一例を示す模式図である。

[図3]図3は、応力-ひずみ曲線において上降伏点が明瞭でない場合の降伏伸びの求め方を説明するための模式図である。

[図4]図4は、本実施形態のロータコアの一例を示す平面図である。

[図5]図5は、本実施形態のステータコアの一例を示す平面図である。

[図6]図6は、実施例の打抜き加工後の寸法精度評価試験における、打抜き平坦度の定義を説明するための模式図である。

発明を実施するための形態

[0014] 本発明者らは、高い強度及び優れた磁気特性を有する無方向性電磁鋼板を打抜き加工したときに、打抜き加工品（ロータコア素材等）の寸法精度が低下する原因及び磁気特性が劣化する原因について調査及び検討を行った。その結果、本発明者らは次の知見を得た。

[0015] 打抜き加工において、無方向性電磁鋼板が打抜きポンチによりダイに押し込まれるとき、鋼板のうち、ポンチによって押し込まれる鋼板表面付近の部分では、板厚方向に押し込まれて加工される。一方、鋼板のうち、ダイに接している部分では、切り屑側に引っ張られる。このように、打抜き加工時に鋼板に付与される応力方向は複雑に変化する。そのため、打抜き加工で鋼板が破断した後、応力が除荷されたときのスプリングバックの程度が、鋼板の板厚方向で異なる。その結果、打抜き加工品の端面（打抜き端面）に凹凸が発生し、打抜き加工品の寸法精度が低下する。このような寸法精度の低下は、鋼板の引張強さが570MPaよりも高い場合に特に顕著となる。

[0016] 打抜き加工により鋼板が変形するとき、鋼板に複数の転位が導入される。

変形により導入された転位同士が絡み合って加工硬化が進むと、打抜き加工で鋼板が破断した後に応力が除荷されたときのスプリングバックの量がさらに増加する。その結果、打抜き加工後の打抜き加工品の端面（打抜き端面）に凹凸が発生し、打抜き加工品の寸法精度が低下する。

[0017] さらに、無方向性電磁鋼板では、打抜き加工時に付与されるせん断ひずみにより、転位が導入される。導入された転位により、磁気特性が劣化する。加工硬化が進むことは即ち転位同士が絡み合って鋼板に残存することを意味する。そのため、加工硬化に従って鋼板の鉄損がより劣化する。

[0018] 以上のメカニズムを考慮して、本発明者らは、加工硬化量を低減できれば、打抜き加工後の打抜き加工品の寸法精度が高まり、さらに鉄損劣化を抑制できると考えた。さらに検討した結果、本発明者らは式（3）で定義される加工硬化量WHを15MPa未満とすれば、打抜き加工後の優れた寸法精度と優れた磁気特性とが得られることを知見した。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

[0019] 本発明者らはさらに、加工硬化量WHを15MPa未満とする手段を検討した。その結果、本発明者らは、次の知見を得た。

[0020] シリコン（Si）は転位が移動可能なすべり系を制限する。鋼板中のSi含有量を高めれば、転位が移動可能なすべり系が制限される。そのため、交差すべりの発生による転位の絡み合いが抑制される。その結果、転位密度の増加が抑制される。

[0021] さらに、鋼板中の固溶C及び固溶Nは、転位に固着しやすい。固溶C又は固溶Nが固着した転位は動きにくい。そのため、固溶C又は固溶Nが固着した転位は、移動中の転位と絡み合いやすくなる。その結果、鋼板内で転位密度のばらつきが生じる。このような固溶C又は固溶Nが固着した転位を減少させるためには、鋼板中の固溶C及び固溶Nを低減することが有効である。

[0022] 鋼板中の固溶C及び固溶Nを低減するためには、C及び／又はNと親和力の高い元素を鋼板に含有し、析出物としてC及びNを固定すればよい。Si、Ti及びZrは、C及びNとの親和力が高い。Nb、V、Mo及びCrは

、Cとの親和力が高い。Al、La及びCeは、Nとの親和力が高い。したがって、これらの元素群のいずれか1種以上を含有すれば、鋼板中の固溶C及び固溶Nを低減することができる。

[0023] 以上の考察に基づいて、本発明者らは、化学組成の観点から検討を行った。その結果、本発明者らは、質量%で、Si：3.1～4.5%、C：0.0025%以下、N：0.0025%以下、O：0.0400%以下、P：0.100%以下、S：0.0050%以下、Ti：0.0100%以下、Mn：2.0%以下、Al：1.500%以下、Zr：0～0.0100%、Nb：0～0.0100%、V：0～0.0100%、Mo：0～0.100%、Cr：0～2.000%、La：0～0.0100%、Ce：0～0.0100%、B：0～0.0010%、Zn：0～0.0050%、Ga：0～0.0050%、Ge：0～0.0050%、As：0～0.0100%、Ni：0～0.500%、Cu：0～0.500%、Sn：0～0.200%、Sb：0～0.100%、Ca：0～0.0050%、Nd：0～0.0010%、Mg：0～0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、さらに、式（1）及び式（2）を満たす化学組成を有する無方向性電磁鋼板であれば、570MPaよりも高い引張強さTSを実現しつつ、優れた磁気特性が得られ、打抜き加工後の寸法精度も高まると考えた。

$$\text{Si}/28 + \text{Ti}/48 + \text{Nb}/93 + \text{V}/51 + \text{Zr}/91 + \text{Mo}/96 + \text{Cr}/52 > \text{C}/12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si}/28 + \text{Al}/27 + \text{Ti}/48 + \text{Zr}/91 + \text{La}/139 + \text{Ce}/140 > \text{N}/14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式（1）及び式（2）中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0024] しかしながら、上述の特徴を満たす無方向性電磁鋼板であっても、高い強度及び優れた磁気特性を有するものの、依然として、打抜き加工後に十分な寸法精度が得られない場合があった。そこで、本発明者らはさらに検討を行

い、次の知見を得た。

[0025] 打抜き加工において、加工硬化が進むとスプリングバックの量が増える。しかしながら、加工硬化せずに変形が進む降伏伸びの割合を増やせば、板厚方向での変形の不均一性が低減し、その結果、寸法精度が向上する。降伏伸びが0.5%以上であれば、打抜き加工後の寸法精度がさらに高まる。

[0026] 一方で、Si含有量を増加すれば、降伏伸びが減少する傾向が見られた。この原因は次のとおりと考えられる。上述のとおり、Siは転位の絡み合いを抑制して加工硬化の抑制に寄与すると考えられる。しかしながら、加工硬化は転位のパイルアップによっても生じる。Si含有量を増加すれば、すべり系が制限されるため、転位発生源が限定される。その結果、降伏伸びが減少すると考えられる。

[0027] 以上の知見に基づいて、本発明者らは、降伏伸びを増やすには、転位発生源を増やして転位発生源を分散させることが有効と考えた。そして、さらに検討した結果、転位発生源である結晶粒界を増やすために結晶粒径を小さくすれば、降伏伸びが増えることが判明した。具体的には、平均結晶粒径Dが式(4)を満たせば、降伏伸びが0.5%以上となりやすくなり、打抜き加工後の打抜き加工品の寸法精度が向上することを本発明者らは見出した。

$$D < 80 - Si \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中のSiには、無方向性電磁鋼板の質量%でのSi含有量が代入される。

[0028] 本実施形態の無方向性電磁鋼板は、以上の技術思想により完成したものであり、その要旨は、次のとおりである。

[0029] 第1の構成の無方向性電磁鋼板は、質量%で、Si:3.1~4.5%、C:0.0025%以下、N:0.0025%以下、O:0.0400%以下、P:0.100%以下、S:0.0050%以下、Ti:0.0100%以下、Mn:2.0%以下、Al:1.500%以下、Zr:0~0.0100%、Nb:0~0.0100%、V:0~0.0100%、Mo:0~0.100%、Cr:0~2.000%、La:0~0.0100%、C

e : 0~0.0100%、B : 0~0.0010%、Zn : 0~0.0050%、Ga : 0~0.0050%、Ge : 0~0.0050%、As : 0~0.0100%、Ni : 0~0.500%、Cu : 0~0.500%、Sn : 0~0.200%、Sb : 0~0.100%、Ca : 0~0.0050%、Nd : 0~0.0010%、Mg : 0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

無方向性電磁鋼板ではさらに、引張強さTSが570MPaよりも高い。

無方向性電磁鋼板ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

第1の構成の無方向性電磁鋼板ではさらに、平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0030] 第2の構成の無方向性電磁鋼板は、第1の構成の無方向性電磁鋼板であって、質量%で、Zr : 0.0001~0.0100%、Nb : 0.0001~0.0100%、V : 0.0001~0.0100%、Mo : 0.001~0.100%、Cr : 0.001~2.000%、La : 0.0001~

0.0100%、Ce:0.0001~0.0100%、B:0.0001~0.0010%、Zn:0.0001~0.0050%、Ga:0.0001~0.0050%、Ge:0.0001~0.0050%、As:0.0001~0.0100%、Ni:0.001~0.500%、Cu:0.001~0.500%、Sn:0.001~0.200%、Sb:0.001~0.100%、Ca:0.0001~0.0050%、Nd:0.0001~0.0010%、及び、Mg:0.0001~0.0030%、からなる群から選択される1種以上を含有する。

[0031] 第1の構成のロータコアは、互いに積層された複数のロータコア素材を備える。

ロータコア素材は、質量%で、Si:3.1~4.5%、C:0.0025%以下、N:0.0025%以下、O:0.0400%以下、P:0.100%以下、S:0.0050%以下、Ti:0.0100%以下、Mn:2.0%以下、Al:1.500%以下、Zr:0~0.0100%、Nb:0~0.0100%、V:0~0.0100%、Mo:0~0.100%、Cr:0~2.000%、La:0~0.0100%、Ce:0~0.0100%、B:0~0.0010%、Zn:0~0.0050%、Ga:0~0.0050%、Ge:0~0.0050%、As:0~0.0100%、Ni:0~0.500%、Cu:0~0.500%、Sn:0~0.200%、Sb:0~0.100%、Ca:0~0.0050%、Nd:0~0.0010%、Mg:0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si}/28 + \text{Ti}/48 + \text{Nb}/93 + \text{V}/51 + \text{Zr}/91 + \text{Mo}/96 + \text{Cr}/52 > \text{C}/12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si}/28 + \text{Al}/27 + \text{Ti}/48 + \text{Zr}/91 + \text{La}/139 + \text{Ce}/140 > \text{N}/14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号

には「0」が代入される。

ロータコア素材ではさらに、引張強さTSが570MPaよりも高い。

ロータコア素材ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

ロータコア素材ではさらに、平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - Si \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0032] 第2の構成のロータコアは、第1の構成のロータコアであって、ロータコア素材は、質量%で、Zr:0.0001~0.0100%、Nb:0.0001~0.0100%、V:0.0001~0.0100%、Mo:0.0001~0.100%、Cr:0.001~2.000%、La:0.0001~0.0100%、Ce:0.0001~0.0100%、B:0.0001~0.0010%、Zn:0.0001~0.0050%、Ga:0.0001~0.0050%、Ge:0.0001~0.0050%、As:0.0001~0.0100%、Ni:0.001~0.500%、Cu:0.001~0.500%、Sn:0.001~0.200%、Sb:0.001~0.100%、Ca:0.0001~0.0050%、Nd:0.0001~0.0010%、及び、Mg:0.0001~0.0030%、からなる群から選択される1種以上を含有する。

[0033] 本実施形態のモータは、第1又は第2の構成のロータコアを備える。

[0034] 本実施形態の無方向性電磁鋼板の製造方法は、第1又は第2の構成の無方向性電磁鋼板の製造方法であって、熱間圧延工程と、冷間圧延工程と、仕上げ焼鈍工程とを備える。

熱間圧延工程では、スラブに対して熱間圧延を実施して熱延鋼板を製造する。

冷間圧延工程では、熱延鋼板を冷間圧延して冷延鋼板を製造する。

仕上げ焼鈍工程では、冷延鋼板に対して仕上げ焼鈍炉で仕上げ焼鈍を実施する。

仕上げ焼鈍工程ではさらに、 950°C 以下の最高到達温度 T_1 で冷延鋼板を焼鈍する。さらに、最高到達温度 T_1 で冷延鋼板に付与する張力 T_E を $2.0 \sim 10.0 \text{ MPa}$ とする。さらに、仕上げ焼鈍炉の加熱帯、均熱帯及び冷却帯での焼鈍温度 $T_1 \sim 700^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 t_0 （秒）と、冷却帯での $700 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 t_1 （秒）とが式（A）及び式（B）を満たすようにする。

$$t_1 - t_0 > 0 \quad (\text{A})$$

$$t_1 / t_0 \leq 3.0 \quad (\text{B})$$

さらに、仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での 500°C 以上の温度域における加熱帯、均熱帯及び冷却帯から選択される1箇所以上において、水素分圧 P_{H_2} （atm）に対する水蒸気分圧 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ （atm）の比を 0.05 よりも高くする、又は、酸素濃度を 0.010% よりも高くする。

さらに、冷却過程での冷延鋼板の長手方向での温度勾配 CG を $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下とする。

[0035] 以下、本実施形態の無方向性電磁鋼板について詳述する。

[0036] [本実施形態の無方向性電磁鋼板の特徴]

本実施形態の無方向性電磁鋼板は、次の特徴1～特徴5を満たす。

（特徴1）

化学組成が、質量%で、 $\text{Si} : 3.1 \sim 4.5\%$ 、 $\text{C} : 0.0025\%$ 以下、 $\text{N} : 0.0025\%$ 以下、 $\text{O} : 0.0400\%$ 以下、 $\text{P} : 0.100\%$ 以下、 $\text{S} : 0.0050\%$ 以下、 $\text{Ti} : 0.0100\%$ 以下、 $\text{Mn} : 2.0\%$ 以下、 $\text{Al} : 1.500\%$ 以下、 $\text{Zr} : 0 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Nb} : 0 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{V} : 0 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Mo} : 0 \sim 0.100\%$ 、 Cr

: 0~2.000%、La: 0~0.0100%、Ce: 0~0.0100%、B: 0~0.0010%、Zn: 0~0.0050%、Ga: 0~0.0050%、Ge: 0~0.0050%、As: 0~0.0100%、Ni: 0~0.500%、Cu: 0~0.500%、Sn: 0~0.200%、Sb: 0~0.100%、Ca: 0~0.0050%、Nd: 0~0.0010%、Mg: 0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなる。

(特徴2)

上記化学組成がさらに、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

(特徴3)

引張強さTSが570MPaよりも高い。

(特徴4)

2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

(特徴5)

平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入

される。

以下、特徴 1 ～特徴 5 について説明する。

[0037] 〔（特徴 1）化学組成について〕

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成は、次の元素を含有する。なお、無方向性電磁鋼板及びロータコア素材の化学組成中の元素含有量に関する「％」は、特に断りがない限り、質量％を意味する。また、無方向性電磁鋼板を単に「鋼板」ともいう。

[0038] Si : 3.1 ～ 4.5 ％

シリコン（Si）は、鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。Si はさらに、鋼板に固溶して無方向性電磁鋼板の強度を高める。Si はさらに、転位が移動できるすべり系を制限する。これにより、転位の絡み合いを抑制でき、転位密度の増加を抑制できる。そのため、打抜き加工後の寸法精度を高めることができる。Si 含有量が 3.1 ％未満であれば、上記効果が十分に得られない。

一方、Si 含有量が 4.5 ％を超えれば、無方向性電磁鋼板の打抜き加工性が低下する。

したがって、Si 含有量は 3.1 ～ 4.5 ％である。

Si 含有量の好ましい下限は 3.2 ％であり、さらに好ましくは 3.3 ％であり、さらに好ましくは 3.4 ％である。

Si 含有量の好ましい上限は 4.4 ％であり、さらに好ましくは 4.3 ％であり、さらに好ましくは 4.2 ％である。

[0039] C : 0.0025 ％以下

炭素（C）は不可避に含有される。つまり、C 含有量は 0 ％超である。C は、鋼板の強度を高める。

しかしながら、C 含有量が 0.0025 ％を超えれば、鋼板中の固溶 C が過剰に多くなる。この場合、打抜き加工時において転位に固着し、転位の移動を制限する。固溶 C が固着した転位が多ければ、互いに絡み合う転位の密度も増加する。その結果、打抜き加工後の打抜き加工品に凹凸が生じやすく

なり、打抜き加工後の寸法精度が低下する。C含有量が0.0025%を超えればさらに、炭化物及び／又は炭窒化物が過剰に多く生成する。その結果、鉄損が劣化する。

したがって、C含有量は0.0025%以下である。

C含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0012%であり、さらに好ましくは0.0014%であり、さらに好ましくは0.0016%である。

C含有量の好ましい上限は0.0024%であり、さらに好ましくは0.0023%であり、さらに好ましくは0.0022%であり、さらに好ましくは0.0021%である。

[0040] N : 0.0025%以下

窒素(N)は不可避に含有される。つまり、N含有量は0%超である。Nは鋼板の強度を高める。Nが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、N含有量が0.0025%を超えれば、鋼板中の固溶Nが過剰に多くなる。この場合、打抜き加工時において固溶Nが転位に固着し、転位の移動を制限する。固溶Nが固着した転位が多ければ、互いに絡み合う転位の密度も増加する。その結果、打抜き加工後の打抜き加工品に凹凸が生じやすくなり、打抜き加工後の寸法精度が低下する。N含有量が0.0025%を超えればさらに、窒化物及び／又は炭窒化物が過剰に多く生成する。その結果、鉄損が劣化する。

したがって、N含有量は0.0025%以下である。

N含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0012%であり、さらに好ましくは0.0014%であり、さらに好ましくは0.0016%である。

N含有量の好ましい上限は0.0024%であり、さらに好ましくは0.

0.023%であり、さらに好ましくは0.022%であり、さらに好ましくは0.021%である。

[0041] O : 0.0400%以下

酸素(O)は不可避に含有される。つまり、O含有量は0%超である。Oは酸化物を形成して鋼板の磁気特性を低下させる。

したがって、O含有量は0.0400%以下である。

O含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、O含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、O含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0020%である。

O含有量の好ましい上限は0.0370%であり、さらに好ましくは0.0350%であり、さらに好ましくは0.0300%であり、さらに好ましくは0.0200%である。

[0042] P : 0.100%以下

リン(P)は不可避に含有される。つまり、P含有量は0%超である。Pは鋼板の強度を高める。Pが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、P含有量が0.100%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下し、冷間圧延時に鋼板に割れが発生する場合がある。

したがって、P含有量は0.100%以下である。

P含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.007%である。

P含有量の好ましい上限は0.090%であり、さらに好ましくは0.080%であり、さらに好ましくは0.070%である。

[0043] S : 0.0050%以下

硫黄(S)は不可避に含有される不純物である。つまり、S含有量は0%超である。Sは、MnSを生成して鉄損を劣化させる。

したがって、S含有量は0.0050%以下である。

S含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、S含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、S含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

S含有量の好ましい上限は0.0047%であり、さらに好ましくは0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%である。

[0044] [固溶C及び／又は固溶Nを低減する元素について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Ti: 0.0100%以下、Mn: 2.0%以下、Al: 1.500%以下、Zr: 0~0.0100%、Nb: 0~0.0100%、V: 0~0.0100%、Mo: 0~0.100%、Cr: 0~2.000%、La: 0~0.0100%、及び、Ce: 0~0.0100%、を含有する。これらの元素はいずれも、鋼板中の固溶C及び／又は固溶Nを固定して、炭化物、炭窒化物又は窒化物等の析出物を形成する。その結果、これらの元素は、打抜き加工後における寸法精度の低下の要因となる固溶C及び固溶Nを低減する。

[0045] Ti: 0.0100%以下

チタン(Ti)は不可避に含有される。つまり、Ti含有量は0%超である。TiはC及び／又はNと結合して析出物を形成し、固溶C及び固溶Nを低減する。これにより、打抜き加工後の寸法精度を高める。Tiはさらに、析出物の生成により、鋼板の強度を高める。Tiが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ti含有量が0.0100%を超えれば、析出物が過剰に生成して、磁気特性が劣化する。

したがって、Ti含有量は0.0100%以下である。

Ti含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

Ti含有量の好ましい上限は0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%であり、さらに好ましくは0.0060%であり、さらに好ましくは0.0055%である。

[0046] Mn：2.0%以下

マンガン(Mn)は不可避に含有される。つまり、Mn含有量は0%超である。MnはCと結合して炭化物を形成し、固溶Cを低減する。Mnはさらに、鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。Mnが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Mn含有量が2.0%を超えれば、鋼板の磁束密度が低下する。

したがって、Mn含有量は2.0%以下である。

Mn含有量の好ましい下限は0.1%であり、さらに好ましくは0.2%であり、さらに好ましくは0.5%である。

Mn含有量の好ましい上限は1.8%であり、さらに好ましくは1.6%であり、さらに好ましくは1.4%である。

[0047] Al：1.500%以下

アルミニウム(Al)は不可避に含有される。つまり、Al含有量は0%超である。AlはNと結合して窒化物を形成し、固溶Nを低減する。これにより、打抜き加工後の寸法精度が高まる。Alはさらに、窒化物の生成により、鋼板の強度を高める。Alが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Al含有量が1.500%を超えれば、鋼板中に酸化物が過剰に生成して、磁気特性が劣化する。

したがって、Al含有量は1.500%以下である。

Al含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.004%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.100%である。

Al含有量の好ましい上限は1.450%であり、さらに好ましくは1.400%であり、さらに好ましくは1.300%であり、さらに好ましくは1.100%であり、さらに好ましくは0.900%である。

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。

[0048] Zr: 0~0.0100%

ジルコニウム（Zr）は含有されなくてもよい。つまり、Zr含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Zr含有量が0%超である場合、ZrはC及び／又はNと結合して析出物を形成し、固溶C及び固溶Nを低減する。これにより、Zrは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Zrはさらに、析出物の生成により、鋼板の強度を高める。Zrが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Zr含有量が0.0100%を超えれば、析出物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、Zr含有量は0~0.0100%である。

Zr含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

Zr含有量の好ましい上限は0.0095%であり、さらに好ましくは0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%である。

[0049] Nb: 0~0.0100%

ニオブ（Nb）は含有されなくてもよい。つまり、Nb含有量は0%であってもよい。

含有される場合、NbはCと結合して炭化物を形成し、固溶Cを低減する。これにより、Nbは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Nbはさらに、炭化物の生成により、鋼板の強度を高める。Nbが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Nb含有量が0.0100%を超えれば、炭化物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、Nb含有量は0~0.0100%である。

Nb含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

Nb含有量の好ましい上限は0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%であり、さらに好ましくは0.0050%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0050] V : 0~0.0100%

バナジウム(V)は含有されなくてもよい。つまり、V含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、V含有量が0%超である場合、VはCと結合して炭化物を形成し、固溶Cを低減する。これにより、Vは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Vはさらに、炭化物の生成により、鋼板の強度を高める。Vが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、V含有量が0.0100%を超えれば、炭化物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、V含有量は0~0.0100%である。

V含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

V含有量の好ましい上限は0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%であり、さらに好ましくは0.0050%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0051] Mo : 0~0.100%

モリブデン（Mo）は含有されなくてもよい。つまり、Mo含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Mo含有量が0%超である場合、MoはCと結合して炭化物を形成し、固溶Cを低減する。これにより、Moは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Moはさらに、炭化物の生成により、鋼板の強度を高める。Moが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Mo含有量が0.100%を超えれば、炭化物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、Mo含有量は0~0.100%である。

Mo含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.030%である。

Mo含有量の好ましい上限は0.090%であり、さらに好ましくは0.080%であり、さらに好ましくは0.070%である。

[0052] Cr: 0~2.000%

クロム（Cr）は含有されなくてもよい。つまり、Cr含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Cr含有量が0%超である場合、CrはCと結合して炭化物を形成し、固溶Cを低減する。これにより、Crは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Crはさらに、鋼板の強度を高める。Crが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Cr含有量が2.000%を超えれば、炭化物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、Cr含有量は0~2.000%である。

Cr含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.050%である。

Cr含有量の好ましい上限は1.800%であり、さらに好ましくは1.

500%であり、さらに好ましくは1.400%であり、さらに好ましくは1.000%である。

[0053] La : 0~0.0100%

ランタン (La) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、La含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、La含有量が0%超である場合、LaはNと結合して窒化物を形成し、固溶Nを低減する。これにより、Laは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Laはさらに、窒化物の生成により、鋼板の強度を高める。Laが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、La含有量が0.0100%を超えれば、鋼板中に窒化物が過剰に生成する。この場合、磁気特性が劣化する。

したがって、La含有量は0~0.0100%である。

La含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0020%である。

La含有量の好ましい上限は0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0075%であり、さらに好ましくは0.0070%である。

[0054] Ce : 0~0.0100%

セリウム (Ce) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ce含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ce含有量が0%超である場合、CeはNと結合して窒化物を形成し、固溶Nを低減する。これにより、Ceは、打抜き加工後の寸法精度を高める。Ceはさらに、窒化物の生成により、鋼板の強度を高める。Ceが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ce含有量が0.0100%を超えれば、鋼板中に窒化物が過剰に生成して、磁気特性が劣化する。

したがって、Ce含有量は0~0.0100%である。

Ce含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

Ce含有量の好ましい上限は0.0090%であり、さらに好ましくは0.0080%であり、さらに好ましくは0.0070%である。

[0055] 本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成の残部は、Fe及び不純物からなる。ここで、不純物とは、無方向性電磁鋼板を工業的に製造する際に、原料としての鉱石、スクラップ、または製造環境などから混入されるものである。これらの不純物の含有量は、本実施形態の無方向性電磁鋼板に悪影響を与えない範囲で許容される。

[0056] 本実施形態の無方向性電磁鋼板はさらに、B:0~0.0010%、Zn:0~0.0050%、Ga:0~0.0050%、Ge:0~0.0050%、As:0~0.0100%、Ni:0~0.500%、Cu:0~0.500%、Sn:0~0.200%、Sb:0~0.100%、Ca:0~0.0050%、Nd:0~0.0010%、及び、Mg:0~0.0030%、を含有してもよい。これらの元素はいずれも任意元素であり、含有されなくてもよい。以下、各元素について説明する。

[0057] [B、Zn、Ga、Ge及びAs]

B、Zn、Ga、Ge及びAsは本実施形態の無方向性電磁鋼板において不純物である。

[0058] B:0~0.0010%

ボロン(B)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、B含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、B含有量が0%超である場合、Bは窒化物を生成する。B窒化物は、仕上げ焼鈍時において、再結晶を阻害する。

したがって、B含有量は0~0.0010%である。

B含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、B含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好まし

くは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

B含有量の好ましい上限は0.0009%であり、さらに好ましくは0.0008%であり、さらに好ましくは0.0007%である。

[0059] Zn : 0~0.0050%

亜鉛 (Zn) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Zn含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Zn含有量が0%超である場合、Zn含有量は0.0050%以下であれば特段の問題が生じない。

したがって、Zn含有量は0~0.0050%である。

Zn含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、Zn含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

Zn含有量の好ましい上限は0.0020%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

[0060] Ga : 0~0.0050%

ガリウム (Ga) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ga含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ga含有量が0%超である場合、Ga含有量は0.0050%以下であれば特段の問題が生じない。

したがって、Ga含有量は0~0.0050%である。

Ga含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、Ga含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

Ga含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0035%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

[0061] Ge : 0~0.0050%

ゲルマニウム（Ge）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ge含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ge含有量が0%超である場合、Ge含有量は0.0050%以下であれば特段の問題が生じない。

したがって、Ge含有量は0～0.0050%である。

Ge含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、Ge含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

Ge含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0035%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

[0062] As：0～0.0100%

ヒ素（As）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、As含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、As含有量が0%超である場合、As含有量は0.0100%以下であれば特段の問題が生じない。

したがって、As含有量は0～0.0100%である。

As含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、As含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

As含有量の好ましい上限は0.0070%であり、さらに好ましくは0.0060%であり、さらに好ましくは0.0050%であり、さらに好ましくは0.0030%である。

[0063] [Ni及びCu]

Ni及びCuは任意元素である。Ni及びCuはいずれも、無方向性電磁

鋼板の強度を高める。

[0064] Ni : 0 ~ 0.500%

ニッケル (Ni) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ni 含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ni 含有量が0%超である場合、Ni は、無方向性電磁鋼板の強度を高める。Ni が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ni 含有量が0.500%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Ni 含有量は0 ~ 0.500%である。

Ni 含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.020%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.100%である。

Ni 含有量の好ましい上限は0.450%であり、さらに好ましくは0.400%であり、さらに好ましくは0.350%であり、さらに好ましくは0.300%であり、さらに好ましくは0.250%である。

[0065] Cu : 0 ~ 0.500%

銅 (Cu) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Cu 含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Cu 含有量が0%超である場合、Cu は、無方向性電磁鋼板の強度を高める。Cu が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Cu 含有量が0.500%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Cu 含有量は0 ~ 0.500%である。

Cu 含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは

0.030%であり、さらに好ましくは0.050%であり、さらに好ましくは0.100%である。

Cu含有量の好ましい上限は0.450%であり、さらに好ましくは0.400%であり、さらに好ましくは0.350%であり、さらに好ましくは0.250%であり、さらに好ましくは0.150%である。

[0066] [Sn及びSb]

Sn及びSbは任意元素である。Sn及びSbはいずれも、無方向性電磁鋼板の鉄損を低下する。

[0067] Sn : 0~0.200%

すず(Sn)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Sn含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Sn含有量が0%超である場合、Snは、鋼板の表面に偏析して仕上げ焼鈍中の酸化及び窒化を抑制する。Snはさらに、鋼板の集合組織を改善して磁束密度を高める。これにより、無方向性電磁鋼板の鉄損が低下する。Snが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Sn含有量が0.200%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Sn含有量は0~0.200%である。

Sn含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.003%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.030%であり、さらに好ましくは0.050%である。

Sn含有量の好ましい上限は0.180%であり、さらに好ましくは0.160%であり、さらに好ましくは0.150%であり、さらに好ましくは0.120%である。

[0068] Sb : 0~0.100%

アンチモン(Sb)任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、S

b含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、S b含有量が0%超である場合、S bは、S n同様に鋼板の表面に偏析して仕上げ焼鈍中の酸化及び窒化を抑制する。S bはさらに、鋼板の集合組織を改善して磁束密度を高める。これにより、無方向性電磁鋼板の鉄損が低下する。S bが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、S b含有量が0.100%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、S b含有量は0~0.100%である。

S b含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.030%である。

S b含有量の好ましい上限は0.080%であり、さらに好ましくは0.070%であり、さらに好ましくは0.060%であり、さらに好ましくは0.050%である。

[0069] [C a、N d及びM g]

C a、N d及びM gは任意元素である。C a、N d及びM gはいずれも、仕上げ焼鈍時の結晶粒の成長を促進して、無方向性電磁鋼板の磁気特性を高める。

[0070] C a : 0~0.0050%

カルシウム (C a) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、C a含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、C a含有量が0%超である場合、C aは溶鋼の casting 時にSと結合して粗大硫化物及び／又は粗大酸硫化物である粗大析出物を生成する。粗大析出物の粒径は1~2 μm程度である。粗大析出物は、 casting 工程以降の製造工程で鋼板に生成する粒径が100 nm程度の微細なM n S、T i N、A l N等のインヒビターを吸着する。これにより、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、

仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長を促進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。Caが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ca含有量が0.0050%を超えれば、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長が阻害される。

したがって、Ca含有量は0~0.0050%である。

Ca含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

Ca含有量の好ましい上限は0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0035%である。

[0071] Nd : 0~0.0010%

ネオジム (Nd) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Nd含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Nd含有量が0%超である場合、NdはCaと同様に粗大析出物を生成し、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長が促進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。Ndが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Nd含有量が0.0010%を超えれば、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長が阻害される。

したがって、Nd含有量は0~0.0010%である。

Nd含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

Nd含有量の好ましい上限は0.0008%であり、さらに好ましくは0.0006%であり、さらに好ましくは0.0004%である。

[0072] Mg : 0~0.0030%

マグネシウム (Mg) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Mg 含有量は 0 % であってもよい。

含有される場合、つまり、Mg 含有量が 0 % 超である場合、Mg は Ca と同様に粗大析出物を生成し、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長が促進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。Mg が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Mg 含有量が 0.0030 % を超えれば、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長が阻害される。

したがって、Mg 含有量は 0 ~ 0.0030 % である。

Mg 含有量の好ましい下限は 0.0001 % であり、さらに好ましくは 0.0002 % であり、さらに好ましくは 0.0003 % である。

Mg 含有量の好ましい上限は 0.0025 % であり、さらに好ましくは 0.0020 % であり、さらに好ましくは 0.0015 % であり、さらに好ましくは 0.0010 % である。

[0073] [無方向性電磁鋼板の化学組成の測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成は、JIS G0321:2017 に準拠した周知の成分分析法で測定できる。具体的には、ドリルを用いて、鋼板から切粉を採取する。採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得る。溶液に対して、ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry) を実施して、化学組成の元素分析を実施する。C 含有量及び S 含有量については、周知の高周波燃焼法 (燃焼 - 赤外線吸収法) により求める。N 含有量については、周知の不活性ガス溶融 - 熱伝導度法を用いて求める。O 含有量については、周知の不活性ガス溶融 - 赤外線吸収法を用いて求める。

[0074] なお、各元素含有量は、本実施形態で規定された有効数字に基づいて、測

定された数値の端数を四捨五入して、本実施形態で規定された各元素含有量の最小桁までの数値とする。例えば、本実施形態の鋼板のS i 含有量は小数第一位までの数値で規定される。したがって、S i 含有量は、測定された数値の小数第二位を四捨五入して得られた小数第一位までの数値とする。

[0075] 本実施形態の鋼板のS i 含有量以外の他の元素含有量も同様に、測定された値に対して、本実施形態で規定された最小桁までの数値の端数を四捨五入して得られた値を、当該元素含有量とする。

[0076] なお、四捨五入とは、端数が5未満であれば切り捨て、端数が5以上であれば切り上げることを意味する。

[0077] [(特徴2) 式(1) 及び式(2) について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板はさらに、式(1) 及び式(2) を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1) 及び式(2) 中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0078] [式(1) について]

式(1) は、炭化物又は炭窒化物を形成することにより、鋼板中の固溶Cを十分に低減するための式である。式(1) 中の左辺は、Cと結合して炭化物又は炭窒化物を形成する元素で構成される。式(1) を満たす場合、炭化物又は炭窒化物が十分に形成されることにより、固溶Cが十分に低減する。

[0079] [式(2) について]

式(2) は、窒化物又は炭窒化物を形成することにより、固溶Nを十分に低減するための式である。式(2) 中の左辺は、Nと結合して窒化物又は炭窒化物を形成する元素で構成される。式(2) を満たす場合、窒化物又は炭

窒化物が十分に形成されることにより、固溶Nが十分に低減する。

[0080] [(特徴3) 引張強さTS]

本実施形態の無方向性電磁鋼板では、引張強さTSが570MPaよりも高い。つまり、本実施形態の無方向性電磁鋼板は高強度を有する。

本実施形態の無方向性電磁鋼板の引張強さTSの好ましい下限は575MPaであり、さらに好ましくは580MPaである。

引張強さのTSの上限は特に限定されない。しかしながら、特徴1及び特徴2を満たす場合、引張強さTSの上限は例えば750MPaである。

[0081] [応力-ひずみ曲線測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の引張強さTSは次の方法で測定する。無方向性電磁鋼板から、JIS Z 2241:2011に規定されたJIS 5号引張試験片を採取する。採取した引張試験片を用いて、JIS Z 2241:2011に準拠して、常温、大気中で引張試験を実施して、応力-ひずみ曲線を得る。得られた応力-ひずみ曲線から、引張強さTS (MPa) を求める。

[0082] [(特徴4) 加工硬化量WHについて]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa) とし、降伏応力をYS (MPa) としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$WH = Y_{2.0} - YS \quad (3)$$

[0083] 打抜き加工時に転位が過剰に増殖すれば、固溶C又は固溶Nが固着する転位が増加する可能性が高まる。固溶C又は固溶Nが固着した転位が増加すれば、互いに絡み合う転位の密度が高い領域が局所的に形成される。この場合、打抜き加工後の打抜き加工品に凹凸が生じやすくなり、十分な寸法精度が得られない。

[0084] 加工硬化量WHは、転位密度と相関する。加工硬化量WHが15MPa未満であれば、打抜き加工時において転位密度が十分に抑えられている。そのため、固溶C又は固溶Nが固着した転位の発生を十分に抑制できる。そのた

め、打抜き加工後の打抜き加工品において打抜き加工に起因した凹凸の発生が抑制され、十分な寸法精度が得られる。

[0085] 加工硬化量WHの好ましい上限は14MPaであり、さらに好ましくは13MPaであり、さらに好ましくは12MPaであり、さらに好ましくは11MPaであり、さらに好ましくは10MPaである。

加工硬化量WHはなるべく低い方が好ましい。工業生産性を考慮すれば、加工硬化量WHの好ましい下限は2MPaであり、さらに好ましくは1MPaであり、最も好ましくは0MPaである。

[0086] [加工硬化量WH評価試験]

加工硬化量WHは次の方法で求めることができる。上述の「応力-ひずみ曲線測定方法」に記載の引張試験を実施して、応力-ひずみ曲線を得る。

図1は、応力-ひずみ曲線の一例の模式図である。図1を参照して、ひずみが0から0.2%塑性ひずみまでの範囲内において、応力の最大値を、「降伏強度YS」(MPa)と定義する。

図1では、ひずみが0から0.2%塑性ひずみの範囲内において、応力-ひずみ曲線に上降伏点POが発生している。したがって、応力-ひずみ曲線が図1のような上降伏点を有する曲線である場合、上降伏点POの応力を、降伏強度YS(MPa)とする。

[0087] 一方、図2に示す応力-ひずみ曲線のように、上降伏点POが発生しない応力-ひずみ曲線である場合、ひずみが0から0.2%塑性ひずみの範囲内において、0.2%塑性ひずみの位置での応力が最大値となる。そこで、この場合は、0.2%耐力を降伏強度YS(MPa)とする。

[0088] また、図1及び図2を参照して、応力-ひずみ曲線において、2.0%ひずみ時の応力を、 $Y_{2.0}$ (MPa)とする。

[0089] 得られた降伏強度YS(MPa)及び応力 $Y_{2.0}$ (MPa)を用いて、式(3)により、加工硬化量WH(MPa)を求める。なお、 $YS > Y_{2.0}$ の場合、WHは0(MPa)と定義する。

[0090] [(特徴5)平均結晶粒径Dについて]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、平均結晶粒径 D (μm) が式 (4) を満たし、降伏伸びが 0.5 % 以上である。

$$D < 80 - S_i \times 10 \quad (4)$$

ここで、式 (4) 中の S_i には、無方向性電磁鋼板の化学組成における、質量 % での S_i 含有量が代入される。

[0091] F_n を次のとおり定義する。

$$F_n = 80 - S_i \times 10$$

平均結晶粒径 D (μm) が F_n 未満であれば、変形時の転位発生源を増やして転位発生源を分散させることができる。この場合、打抜き加工での鋼板の変形時に転位が局所的に発生せずに、分散して発生する。そのため、転位の絡み合いが抑制される。そのため、降伏伸びが 0.5 % 以上となりやすく、打抜き加工時に板厚方向での変形の不均一性を低減できる。その結果、打抜き加工後の寸法精度を高めることができる。

[0092] 平均結晶粒径 D の好ましい下限は $10 \mu\text{m}$ であり、さらに好ましくは $15 \mu\text{m}$ であり、さらに好ましくは $20 \mu\text{m}$ である。

平均結晶粒径 D の好ましい上限は $75 - S_i \times 10$ (μm) であり、さらに好ましくは $70 - S_i \times 10$ (μm) であり、さらに好ましくは $65 - S_i \times 10$ (μm) である。

[0093] 降伏伸びの好ましい下限は 0.6 % であり、さらに好ましくは 0.7 % であり、さらに好ましくは 1.0 % であり、さらに好ましくは 1.5 % である。

降伏伸びの上限は特に限定されないが、7.0 % 程度が上限である。

[0094] [平均結晶粒径 D の測定方法]

平均結晶粒径 D は次の方法で求める。無方向性電磁鋼板の圧延方向に平行な断面 (L 断面) を観察面とする。観察面を鏡面研磨した後、鏡面研磨された観察面に対して、ナイトル液を用いてエッチングを実施する。エッチングされた観察面を、光学顕微鏡を用いて倍率 100 倍で観察し、観察視野の写真画像を生成する。写真画像を用いて、JIS G0551:2013「鋼

「結晶粒度の顕微鏡試験方法」に準拠して、後述する矩形領域内の結晶粒数を算出する方法で平均結晶粒径 D (μm) を求める。

[0095] 具体的には、 L 断面において、未再結晶領域を除く再結晶粒のみからなる領域で板厚方向と板面方向（圧延方向）に平行な線分で囲まれた矩形領域を描く。当該矩形領域を観察視野とする。矩形領域の面積 A を 0.5 mm^2 以上とする。1つの矩形の面積で 0.5 mm^2 以上を確保できない場合、複数の矩形領域を描いて、矩形領域の合計面積 A を 0.5 mm^2 以上となるようにする。

[0096] 矩形領域の結晶粒数をカウントする。具体的には、矩形領域の内部に存在し、矩形領域の各辺に接しない結晶粒数を N_1 とする。矩形領域の各辺の四隅（矩形の4つの頂点）を除く4辺のいずれかと交差する結晶粒数を N_2 とする。 0.5 mm^2 以上の面積を確保のために描画した全ての矩形領域の数を N_3 とする。矩形領域の合計面積 A (mm^2)、及び、結晶粒数 $N_1 \sim N_3$ を用いて、式 (1) により平均結晶粒径 D (μm) を求める。

[数1]

$$\text{平均結晶粒径 } D = \left\{ \frac{A}{\left(N_1 - \frac{N_2}{2} + N_3 \right)} \right\}^{0.5} \times 1000 \quad (1)$$

[0097] [降伏伸びの測定方法]

降伏伸びは次の方法で求める。無方向性電磁鋼板から引張試験片を採取する。JIS Z 2241:2011に準拠して、常温、大気中で引張試験を実施し、降伏伸び (%) を求める。引張試験片はJIS 5号引張試験片を用いる。

[0098] なお、上降伏点が明瞭に表れない場合、次の方法で降伏伸び (%) を求める。図3を参照して、引張試験により得られた応力-ひずみ曲線において、上述の「加工硬化量 WH 評価試験」に記載の方法に基づいて、降伏強度 Y_S (MPa) を決定する。決定した降伏強度 Y_S でのひずみ値を ε_1 とする。ひずみ値 ε_1 以降の応力-ひずみ曲線において、ひずみの増加に伴い応力が降伏応力 $Y_S \pm 1.0\%$ の範囲内で維持されている領域での最大のひずみ値

$\varepsilon 2$ を特定する。 $\varepsilon 1$ 及び $\varepsilon 2$ を用いて、次式により降伏伸びを求める。

$$\text{降伏伸び (\%)} = \varepsilon 2 - \varepsilon 1$$

[0099] [本実施形態の無方向性電磁鋼板の効果について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板は特徴 1 ～特徴 5 を満たす。そのため、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、高強度であり、十分な磁気特性が得られるにも関わらず、打抜き加工後に優れた寸法精度が得られる。

[0100] [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の製造方法の一例を説明する。本実施形態の無方向性電磁鋼板の製造方法は、次の工程を含む。

(工程 1) 熱間圧延工程

(工程 2) 熱延板焼鈍工程

(工程 3) 冷間圧延工程

(工程 4) 仕上げ焼鈍工程

上記工程 1 ～工程 4 のうち、工程 2 は任意の工程である。つまり、工程 2 は実施しなくてもよい。以下、各工程について説明する。

[0101] [(工程 1) 熱間圧延工程]

熱間圧延工程では、スラブに対して熱間圧延を実施して熱延鋼板を製造する。スラブは周知の方法で製造される。例えば、連続鋳造法によりスラブを製造する。

[0102] 準備されたスラブに対して、熱間圧延を実施する。熱間圧延における各種条件は、特に限定されない。スラブ加熱温度は例えば、 $1100 \sim 1200$ °C である。仕上げ圧延温度は例えば、 $800 \sim 1100$ °C である。巻取温度は例えば、 $700 \sim 800$ °C である。以上の工程により、熱延鋼板を製造する。

[0103] [(工程 2) 熱延板焼鈍工程]

熱延板焼鈍工程は任意の工程である。つまり、熱延板焼鈍工程は実施してもよいし、実施しなくてもよい。実施する場合、熱延板焼鈍工程では、熱延鋼板に対して焼鈍を実施する。熱延板焼鈍は、箱焼鈍であってもよいし、連

続焼鈍であってもよい。熱延板焼鈍工程での焼鈍条件は特に限定されない。箱焼鈍の場合、焼鈍温度は例えば、 $750^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ であり、焼鈍温度での保持時間は例えば、1時間～30時間である。連続焼鈍の場合、焼鈍温度は例えば、 $900^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ であり、焼鈍温度での保持時間は、1秒～100秒である。なお、必要に応じて、熱延板焼鈍工程での焼鈍を実施する前の熱延鋼板、及び／又は、焼鈍を実施した後の熱延鋼板に対して、周知の酸洗処理を実施してもよい。

[0104] 〔（工程3）冷間圧延工程〕

冷間圧延工程では、熱間圧延工程で製造された熱延鋼板、又は、熱延板焼鈍工程後の熱延鋼板に対して、冷間圧延を実施して冷延鋼板を製造する。冷間圧延は1回実施してもよいし、複数回実施してもよい。冷間圧延を複数回実施する場合、冷間圧延後、次の冷間圧延を実施する前に、中間焼鈍を実施してもよい。

[0105] 〔（工程4）仕上げ焼鈍工程〕

冷間圧延工程を実施して製造された冷延鋼板に対して、仕上げ焼鈍炉で仕上げ焼鈍を実施する。仕上げ焼鈍では、最終の板厚に仕上げられた冷延鋼板を焼鈍して再結晶させ、結晶粒を成長させる。仕上げ焼鈍工程では、次の条件1～条件5を満たす。

（条件1）

950°C 以下の最高到達温度 T_1 （ $^{\circ}\text{C}$ ）で焼鈍する。

（条件2）

最高到達温度 T_1 （ $^{\circ}\text{C}$ ）で冷延鋼板に付与する張力 T_E を $2.0 \sim 10.0 \text{ MPa}$ とする。

（条件3）

仕上げ焼鈍炉の加熱帯、均熱帯及び冷却帯での焼鈍温度 $T_1 \sim 700^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 t_0 （秒）と、冷却帯での $700 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 t_1 （秒）とが、式（A）及び式（B）を満たす。

$$t_1 - t_0 > 0 \quad (\text{A})$$

$$t_1 / t_0 \leq 3.0 \quad (B)$$

(条件4)

仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での500℃以上の温度域における加熱帯、均熱帯、及び、冷却帯から選択される1箇所以上において、水素分圧 P_{H_2} (atm) に対する水蒸気分圧 P_{H_2O} (atm) の比を0.05よりも高くする、又は、酸素濃度を体積%で0.010%よりも高くする。

(条件5)

冷却過程での冷延鋼板の長手方向での温度勾配CGを20℃/m以下とする。

以下、条件1～条件5について説明する。

[0106] [(条件1) 最高到達温度 T_1 について]

最高到達温度 T_1 を950℃以下とする。最高到達温度 T_1 が950℃を超えれば、鋼板内において、炭化物及び窒化物の溶体化が生じてしまう。その結果、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa以上となる。したがって、最高到達温度 T_1 は950℃以下である。最高到達温度 T_1 の下限は周知の温度で足りる。最高到達温度 T_1 の下限は例えば、800℃である。

[0107] [(条件2) 最高到達温度 T_1 での張力TEについて]

最高到達温度 T_1 で冷延鋼板に付与する張力TEを2.0～10.0MPaとする。具体的には、冷延鋼板の圧延方向(長手方向)に張力TEを付与する。

張力TEが2.0MPa未満である場合、鋼板中に転位発生源が十分に得られない。この場合、無方向性電磁鋼板において式(4)を満たしても、降伏伸びが0.5%未満となる。

一方、張力TEが10.0MPaを超えれば、鋼板内に残留ひずみが発生する。この場合、加工硬化量WHが15MPa以上となる。

[0108] [(条件3) 滞在時間 t_0 及び t_1 について]

仕上げ焼鈍では、仕上げ焼鈍炉の加熱帯、均熱帯及び冷却帯での焼鈍温度

$T1 \sim 700^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 $t0$ (秒) と、冷却帯での $700 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の間の滞在時間 $t1$ (秒) とが、式 (A) 及び式 (B) を満たす。

$$t1 - t0 > 0 \quad (\text{A})$$

$$t1 / t0 \leq 3.0 \quad (\text{B})$$

ここで、滞在時間 $t0$ は、加熱帯、均熱帯及び冷却帯において、昇温過程で 700°C から最高到達温度 $T1$ に至るまでの時間、最高到達温度 $T1$ での保持時間、及び、冷却過程で最高到達温度 $T1$ から 700°C に至るまでの時間を含む。滞在時間 $t1$ は、冷却帯での $700 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の時間に相当し、昇温過程（加熱帯）での $500 \sim 700^{\circ}\text{C}$ に至るまでの時間は含まない。

[0109] 焼鈍温度 $T1 \sim 700^{\circ}\text{C}$ の温度域では、炭化物及び窒化物が固溶しやすく、固溶C及び固溶Nが形成されやすい。一方、 $700 \sim 500^{\circ}\text{C}$ の温度域では、炭化物、炭窒化物及び窒化物が生成しやすい温度域である。固溶C及び固溶Nは転位に固着して、転位の移動を阻害する。移動が阻害された転位が増えれば、転位の絡み合いが増加する。そこで、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、固溶C及び固溶Nをなるべく低減する。

[0110] FA を次のとおり定義する。

$$FA = t1 - t0$$

FA は式 (A) の左辺に相当する。 FA が0よりも大きい場合、つまり、滞在時間 $t1$ が滞在時間 $t0$ よりも長い場合、仕上げ焼鈍前に生成していた炭化物及び窒化物が溶体化することを抑制しながら、固溶してしまった炭素及び窒素を、炭化物、炭窒化物及び窒化物として再び固定化することができる。そのため、鋼板中の固溶C及び固溶Nを低減することができる。その結果、加工硬化量 WH を15 MPa未満にすることができる。

[0111] FB を次のとおり定義する。

$$FB = t1 / t0$$

FB は式 (B) の左辺に相当する。 FB が3.0を超えれば、析出物として析出することなく鋼板中に残存する固溶C及び固溶Nが転位に固着する。この場合、転位がパイルアップしやすくなるため、加工硬化量 WH が増加す

る。FBが3.0以下であれば、加工硬化量WHを十分に抑制できる。

[0112] [(条件4) 酸素ポテンシャルについて]

仕上げ焼鈍ではさらに、仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での500℃以上の温度域における加熱帯、均熱帯、及び、冷却帯から選択される1箇所以上において、水素分圧 P_{H_2} (atm) に対する水蒸気分圧 P_{H_2O} (atm) の比を0.05よりも高くする、又は、酸素濃度を0.010%よりも高くする。

[0113] 仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での水素分圧 P_{H_2} (atm) に対する水蒸気分圧 P_{H_2O} (atm) の比を酸素ポテンシャルと定義する。仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での500℃以上の温度域における加熱帯、均熱帯、及び、冷却帯から選択される1箇所以上において、酸素ポテンシャルが0.05よりも高い場合、又は、酸素濃度が0.010%よりも高い場合、仕上げ焼鈍中の鋼板での脱炭が促進される。この場合、鋼板中の固溶Cを十分に低減することができる。その結果、加工硬化量WHを15MPa未満にすることができる。

[0114] [(特徴5) 冷却過程での冷延鋼板の長手方向での温度勾配CGについて]

冷却過程において、最高到達温度T1から500℃に至るまでの冷延鋼板の長手方向（圧延方向）での温度勾配をCG (℃/m) と定義する。温度勾配CGは、冷延鋼板の温度が最高到達温度T1から500℃に至るまでの通板距離と、最高到達温度T1から500℃を差し引いた温度差とに基づいて求める。

冷却過程での温度勾配CGが20℃/mを超えれば、熱ひずみにより鋼板内に残留ひずみが発生する。この場合、加工硬化量WHが15MPa以上となる。したがって、温度勾配CGを20℃/m以下とする。

[0115] [その他の工程]

上述の製造方法において、仕上げ焼鈍工程後にコーティング工程を実施してもよい。コーティング工程では、仕上げ焼鈍後の無方向性電磁鋼板の表面に、絶縁コーティングを施す。絶縁コーティングの種類は特に限定されない。絶縁コーティングは有機成分であってもよいし、無機成分であってもよい。

。

[0116] 以上の製造方法により、本実施形態の無方向性電磁鋼板が製造できる。なお、本実施形態の無方向性電磁鋼板は、特徴1～特徴5を満たせば、製造方法は特に限定されない。

[0117] [ロータコアについて]

本実施形態のロータコアは、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として製造される。

図4は、ロータコア1の一例を示す平面図である。図4を参照して、ロータコア1は、複数のロータコア素材2を備える。ロータコア素材2は板状である。より具体的には、ロータコア素材2は円板状である。ロータコア1は、複数のロータコア素材2が積層されて構成されている。

[0118] ロータコア素材2の形状は、板状であれば特に限定されない。図4では一例として、永久磁石同期モータのロータコア素材2を示す。しかしながらロータコア素材2は、板状であれば、他の形状であってもよい。例えば、モータがリラクタンスモータである場合、ロータコア素材2は複数の突極を有する板状であってもよいし、フラックスバリアとなる複数の貫通孔を有する板状であってもよい。また、モータが誘電モータである場合、ロータコア素材2は銅又はアルミダイカスト等による誘導電流経路が設置される複数の貫通孔を有してもよい。

[0119] 上述のとおり、ロータコア素材2は、本実施形態の無方向性電磁鋼板を打抜き加工して製造される、打抜き加工品である。したがって、ロータコア素材2は、上述の特徴1～特徴5を満たす。

具体的には、ロータコア素材2は、質量%で、Si : 3.1～4.5%、C : 0.0025%以下、N : 0.0025%以下、O : 0.0400%以下、P : 0.100%以下、S : 0.0050%以下、Ti : 0.0100%以下、Mn : 2.0%以下、Al : 1.500%以下、Zr : 0～0.0100%、Nb : 0～0.0100%、V : 0～0.0100%、Mo : 0～0.100%、Cr : 0～2.000%、La : 0～0.0100%、C

e : 0 ~ 0.0100%、B : 0 ~ 0.0010%、Zn : 0 ~ 0.0050%、Ga : 0 ~ 0.0050%、Ge : 0 ~ 0.0050%、As : 0 ~ 0.0100%、Ni : 0 ~ 0.500%、Cu : 0 ~ 0.500%、Sn : 0 ~ 0.200%、Sb : 0 ~ 0.100%、Ca : 0 ~ 0.0050%、Nd : 0 ~ 0.0010%、Mg : 0 ~ 0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

ロータコア素材2ではさらに、引張強さTSが570MPaよりも高い。

ロータコア素材2ではさらに、2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満である。

$$\text{WH} = Y_{2.0} - \text{YS} \quad (3)$$

ロータコア素材2ではさらに、平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である。

$$D < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0120] [ステータコアについて]

なお、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として、ステータコアを製造してもよい。図5は、ステータコア3の平面図である。図5を参照して、ステータコア3は、複数のステータコア素材4を備える。ステータコア素材4

は、円環の板状である。ステータコア3は、複数のステータコア素材4が積層されて構成されている。

[0121] ステータコア素材4は、複数のティース部41を含む。複数のティース部41は、各々がステータコア素材4の周方向に隙間を設けて配列されている。各ティース部41は、ステータコア素材4の径方向に延びている。

[0122] ステータコア素材4は、本実施形態の無方向性電磁鋼板を打抜き加工した後、ひずみ取り焼鈍を実施して製造される。そのため、ステータコア素材4は、上述の特徴1及び特徴2を満たす。

[0123] 具体的には、ステータコア素材4は、質量%で、Si: 3.1~4.5%、C: 0.0025%以下、N: 0.0025%以下、O: 0.0400%以下、P: 0.100%以下、S: 0.0050%以下、Ti: 0.0100%以下、Mn: 2.0%以下、Al: 1.500%以下、Zr: 0~0.0100%、Nb: 0~0.0100%、V: 0~0.0100%、Mo: 0~0.100%、Cr: 0~2.000%、La: 0~0.0100%、Ce: 0~0.0100%、B: 0~0.0010%、Zn: 0~0.0050%、Ga: 0~0.0050%、Ge: 0~0.0050%、As: 0~0.0100%、Ni: 0~0.500%、Cu: 0~0.500%、Sn: 0~0.200%、Sb: 0~0.100%、Ca: 0~0.0050%、Nd: 0~0.0010%、Mg: 0~0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たす。

$$\text{Si}/28 + \text{Ti}/48 + \text{Nb}/93 + \text{V}/51 + \text{Zr}/91 + \text{Mo}/96 + \text{Cr}/52 > \text{C}/12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si}/28 + \text{Al}/27 + \text{Ti}/48 + \text{Zr}/91 + \text{La}/139 + \text{Ce}/140 > \text{N}/14 \times 1000 \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[0124] [ロータコア素材2及びステータコア素材4での化学組成の測定方法]

上述の〔無方向性電磁鋼板の化学組成の測定方法〕に記載の方法に基づいて、ロータコア素材2及びステータコア素材4の化学組成を測定できる。具体的には、ドリルを用いて、ロータコア素材2又はステータコア素材4から切粉を採取する。採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得る。溶液に対して、ICP-AESを実施して、化学組成の元素分析を実施する。C含有量及びS含有量については、周知の高周波燃焼法（燃焼－赤外線吸収法）により求める。N含有量については、周知の不活性ガス溶融－熱伝導度法を用いて求める。O含有量については、周知の不活性ガス溶融－赤外線吸収法を用いて求める。

[0125] 〔ロータコア素材2の応力－ひずみ曲線測定方法〕

ロータコア素材2の引張強さTSは次の方法で測定する。ロータコア素材2から、JIS Z 2241：2011に規定されたJIS 5号引張試験片を採取する。ロータコア素材2のサイズが小さいために、JIS 5号引張試験片を採取できない場合、ロータコア素材2から、JIS 5号引張試験片の縮尺試験片を採取する。

採取した引張試験片を用いて、JIS Z 2241：2011に準拠して、常温、大気中で引張試験を実施して、応力－ひずみ曲線を得る。得られた応力－ひずみ曲線から、引張強さTS（MPa）を求める。なお、縮尺試験片を用いて引張試験を実施する場合、上記規格の付属書JBに規定のひずみ速度に基づいて試験を実施する。

[0126] 〔ロータコア素材2の加工硬化量WH評価試験〕

ロータコア素材2の加工硬化量WHは、上述の〔加工硬化量WH評価試験〕に記載の方法により求める。このとき、応力－ひずみ曲線は、上述の〔ロータコア素材2の応力－ひずみ曲線測定方法〕で得られた応力－ひずみ曲線を用いる。

[0127] 〔ロータコア素材2の平均結晶粒径Dの測定方法〕

ロータコア素材2の平均結晶粒径Dは、上述の〔平均結晶粒径Dの測定方法〕に記載の方法により求める。なお、ロータコア素材2における、圧延方

向に平行な断面（L断面）を観察面とする。

[0128] [ロータコア素材2の降伏伸びの測定方法]

ロータコア素材2の降伏伸びは、次の方法で求める。具体的には、ロータコア素材2からJIS5号引張試験片を採取する。JIS Z2241:2011に準拠して、常温、大気中で引張試験を実施し、降伏伸び（％）を求める。なお、ロータコア素材2のサイズが小さいために、JIS5号引張試験片を採取できない場合、ロータコア素材2から、JIS5号引張試験片の縮尺試験片を採取する。縮尺試験片を用いて引張試験を実施する場合、上記規格の付属書JBに規定のひずみ速度に基づいて試験を実施する。

[0129] なお、上降伏点が明瞭に表れない場合、次の方法で降伏伸び（％）を求める。図3を参照して、引張試験により得られた応力－ひずみ曲線において、上述の[ロータコア素材2の加工硬化量WH評価試験]に記載の方法に基づいて、降伏強度YS（MPa）を決定する。決定した降伏強度YSでのひずみ値を ε_1 とする。ひずみ値 ε_1 以降の応力－ひずみ曲線において、ひずみの増加に伴い応力が降伏応力 $YS \pm 1.0\%$ の範囲内で維持されている領域での最大のひずみ値 ε_2 を特定する。 ε_1 及び ε_2 を用いて、次式により降伏伸びを求める。

$$\text{降伏伸び（％）} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

[0130] [ロータコア1の製造方法]

ロータコア1は次の方法で製造する。

本実施形態の無方向性電磁鋼板から、ロータコア素材2を打抜き加工で製造する。具体的には、打抜き加工によりロータコア素材2を打ち抜く。打ち抜かれたロータコア素材2を積層して、ロータコア1を製造する。

[0131] [モータについて]

本実施形態のモータは、上述のロータコア1を備える。モータはさらに、周知のステータコアを備える。本実施形態のモータは、本実施形態のロータコアを備えるため、ロータコアにおいて高い強度と十分な磁気特性とが得られる。

[0132] なお、モータコアに含まれるステータコアとして、上述のステータコア 3 を採用してもよい。ステータコア 3 は次の方法で製造される。本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として、打抜き加工によりステータコア素材 4 を製造する。複数のステータコア素材 4 を積層して、ステータコア 3 を製造する。

[0133] 本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として打抜き加工により製造されるステータコア素材 4 の寸法精度は高い。そのため、従前の引張強さが 570 MPa を超える無方向性電磁鋼板を素材として製造されるステータコアと比較して、寸法精度の点で優位である。本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として製造されるステータコア 3 は、ステータコア素材 4 を積層した後、ひずみ取り焼鈍を実施する。これにより、ステータコア 3 を組み込んだモータが、より高効率となる。

実施例 1

[0134] 表 1（表 1 A～表 1 C）に示す化学組成を有する無方向性電磁鋼板を、次の方法で製造した。

[0135]

[表1A]

試験 番号	化学組成（単位は質量%、残部はFe及び不純物）								
	Si	C	N	O	P	S	Ti	Mn	Al
1	3.3	0.0018	0.0013	0.0155	0.011	0.0012	0.0011	1.1	0.700
2	3.5	0.0017	0.0018	0.0210	0.007	0.0008	0.0013	0.6	0.300
3	4.2	0.0011	0.0011	0.0131	0.011	0.0003	0.0052	0.5	0.004
4	3.6	0.0010	0.0012	0.0171	0.033	0.0027	0.0016	0.3	0.300
5	3.8	0.0018	0.0017	0.0022	0.010	0.0022	0.0013	0.2	0.355
6	3.4	0.0017	0.0018	0.0136	0.034	0.0047	0.0021	0.4	0.409
7	3.9	0.0022	0.0010	0.0367	0.011	0.0009	0.0017	0.2	0.848
8	4.0	0.0024	0.0021	0.0091	0.007	0.0039	0.0008	0.5	0.246
9	3.3	0.0012	0.0012	0.0194	0.061	0.0012	0.0016	0.6	1.450
10	3.5	0.0011	0.0018	0.0268	0.033	0.0013	0.0013	0.8	0.393
11	3.6	0.0010	0.0012	0.0250	0.015	0.0007	0.0014	0.2	0.307
12	4.1	0.0011	0.0010	0.0045	0.007	0.0007	0.0011	0.2	0.402
13	4.3	0.0010	0.0019	0.0143	0.039	0.0027	0.0009	0.5	0.203
14	3.6	0.0017	0.0013	0.0065	0.050	0.0005	0.0013	0.4	0.577
15	3.3	0.0019	0.0017	0.0055	0.026	0.0014	0.0021	1.1	0.307
16	3.5	0.0015	0.0012	0.0134	0.007	0.0017	0.0023	0.2	0.724
17	3.2	0.0018	0.0014	0.0068	0.010	0.0007	0.0011	0.4	1.113
18	3.4	0.0015	0.0022	0.0243	0.016	0.0029	0.0016	0.3	1.239
19	3.8	0.0011	0.0018	0.0181	0.043	0.0008	0.0025	0.2	0.310
20	3.6	0.0019	0.0013	0.0152	0.007	0.0037	0.0017	0.8	0.681
21	3.3	0.0016	0.0019	0.0110	0.013	0.0005	0.0011	1.3	0.551
22	3.5	0.0017	0.0021	0.0348	0.011	0.0014	0.0013	0.3	0.939
23	3.2	0.0018	0.0015	0.0083	0.012	0.0007	0.0014	0.6	0.827
24	3.4	0.0016	0.0016	0.0107	0.026	0.0021	0.0011	0.6	0.517
25	3.6	0.0019	0.0019	0.0208	0.013	0.0023	0.0016	0.4	0.447
26	3.3	0.0011	0.0017	0.0301	0.046	0.0013	0.0023	1.1	0.483
27	3.5	0.0017	0.0018	0.0200	0.011	0.0015	0.0006	0.4	0.570
28	3.8	0.0020	0.0021	0.0048	0.017	0.0011	0.0014	0.4	0.446
29	3.3	0.0017	0.0018	0.0357	0.072	0.0006	0.0020	0.7	0.639
30	3.6	0.0018	0.0022	0.0051	0.017	0.0016	0.0018	0.7	1.180
31	3.2	0.0019	0.0018	0.0077	0.083	0.0029	0.0007	1.6	0.410
32	3.7	0.0024	0.0010	0.0184	0.012	0.0013	0.0014	0.4	0.308
33	3.9	0.0012	0.0024	0.0301	0.014	0.0026	0.0006	1.2	0.314
34	3.8	0.0011	0.0023	0.0143	0.022	0.0003	0.0007	1.5	0.287
35	3.0	0.0014	0.0019	0.0360	0.008	0.0015	0.0022	0.3	0.789
36	2.9	0.0012	0.0017	0.0049	0.011	0.0020	0.0005	0.2	0.521
37	3.0	0.0016	0.0016	0.0025	0.013	0.0018	0.0013	1.5	1.214
38	3.0	0.0013	0.0017	0.0021	0.011	0.0014	0.0008	1.2	1.113
39	3.7	0.0021	0.0020	0.0084	0.014	0.0007	0.0021	1.1	0.433
40	3.9	0.0021	0.0017	0.0163	0.013	0.0006	0.0010	0.2	0.885
41	3.3	0.0015	0.0016	0.0024	0.010	0.0011	0.0008	0.5	0.311
42	3.5	0.0017	0.0015	0.0031	0.009	0.0013	0.0016	0.4	0.231
43	3.3	0.0018	0.0013	0.0022	0.013	0.0013	0.0011	0.5	0.224
44	3.4	0.0015	0.0017	0.0026	0.014	0.0015	0.0013	0.3	0.343
45	4.0	0.0022	0.0019	0.0381	0.011	0.0034	0.0006	0.2	0.301
46	3.6	0.0020	0.0016	0.0248	0.021	0.0004	0.0009	0.2	0.398
47	3.4	0.0017	0.0018	0.0023	0.011	0.0011	0.0017	0.5	0.413
48	3.6	0.0016	0.0016	0.0019	0.009	0.0016	0.0019	0.4	0.526
49	3.4	0.0018	0.0019	0.0192	0.016	0.0007	0.0006	0.7	0.462
50	3.8	0.0016	0.0020	0.0283	0.015	0.0007	0.0007	1.4	0.324
51	3.3	0.0017	0.0017	0.0016	0.001	0.0009	0.0013	0.3	0.379
52	3.5	0.0019	0.0018	0.0027	0.014	0.0007	0.0007	0.5	0.351

[0136]

[表1B]

試験 番号	化学組成 (単位は質量%、残部はFe及び不純物)									
	Zr	Nb	V	Mo	Cr	La	Ce	B	Zn	Ga
1	-	-	-	-	0.023	-	-	-	-	-
2	-	-	-	0.020	0.041	-	-	-	0.0001	-
3	0.0092	0.0014	-	0.010	0.023	0.0054	0.0056	-	-	-
4	0.0095	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	0.0021	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	0.0023	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	0.084	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	1.433	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	0.0073	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	0.0064	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	0.0007	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	0.052	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	0.013	-	-	-	-	0.0016	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0032
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0.0013	-	-	-	0.031	-	-	0.0002	-	-
25	-	-	-	-	-	0.0023	0.0021	-	0.0003	0.0013
26	0.0034	0.0014	0.0011	0.015	0.043	-	0.0034	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	0.0032	0.0013	-	0.024	0.130	-	-	-	-	-
29	-	-	-	0.013	0.032	-	-	0.0002	-	-
30	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0007	0.0005
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	0.0013	-	-	0.012	0.037	-	-	-	-	0.0014
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	-	-	-	0.011	0.023	-	-	-	-	-
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	0.0026	0.0024	-	-	-
41	-	-	-	0.005	0.036	-	-	-	-	-
42	-	-	-	-	0.036	-	-	-	-	-
43	-	-	-	0.007	-	-	-	-	-	-
44	-	-	-	0.011	0.031	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	-	0.0011	-	0.012	-	-	-	-	0.0008	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	0.041	-	-	-	-	-
49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	0.0013	-	-	-	-	0.0005	-	0.0011
51	-	-	-	0.007	0.038	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	0.029	-	-	-	-	-

[0137]

[表1C]

TABLE1C

試験 番号	化学組成（単位は質量%、残部はFe及び不純物）										式(1)	式(2)
	Ge	As	Ni	Cu	Sn	Sb	Ca	Nd	Mg			
1	-	-	-	-	0.011	-	-	-	-		T	T
2	-	0.0030	0.020	0.060	0.007	-	0.0005	-	0.0008		T	T
3	-	0.0010	0.020	0.060	0.013	-	0.0005	-	0.0006		T	T
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
13	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0024		T	T
14	-	-	-	-	-	-	0.0035	-	-		T	T
15	-	-	0.236	-	-	-	-	-	-		T	T
16	-	-	-	0.142	-	-	-	-	-		T	T
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
19	0.0035	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
20	-	0.0059	-	-	-	-	-	-	-		T	T
21	-	-	-	-	0.110	-	-	-	-		T	T
22	-	-	-	-	-	0.063	-	-	-		T	T
23	-	-	-	-	-	-	-	0.0006	-		T	T
24	-	0.0023	-	0.031	0.011	-	-	-	-		T	T
25	0.0011	0.0024	0.031	0.043	0.021	-	0.0011	0.0008	0.0005		T	T
26	-	-	-	-	-	-	-	0.0005	-		T	T
27	-	-	-	-	-	0.013	-	-	-		T	T
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
29	-	0.0027	-	0.036	0.013	-	0.0023	-	-		T	T
30	-	-	0.026	-	-	-	-	-	0.0008		T	T
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-		F	T
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-		F	T
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	F
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	F
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
36	-	0.0026	-	-	0.014	-	-	-	-		T	T
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
38	-	-	0.027	0.043	0.012	-	0.0014	-	-		T	T
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
40	-	-	-	-	0.023	-	0.0013	-	-		T	T
41	-	-	-	0.036	-	-	-	-	-		T	T
42	-	0.0026	-	-	0.021	-	-	-	-		T	T
43	-	-	-	0.034	0.022	-	-	-	0.0007		T	T
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
46	0.0014	0.0021	0.041	-	-	-	-	0.0008	0.0008		T	T
47	-	-	-	-	0.026	-	-	-	-		T	T
48	-	0.0023	-	0.039	-	-	-	-	0.0005		T	T
49	-	-	-	-	-	-	-	-	-		T	T
50	-	-	-	0.037	0.023	0.011	-	-	-		T	T
51	-	-	-	0.028	0.027	-	-	-	-		T	T
52	-	0.0027	-	-	-	-	-	-	0.0006		T	T

[0138] なお、表1C中の「式(1)」欄の「T」は、式(1)を満たすことを意味し、「F」は、式(1)を満たさないことを意味する。「式(2)」欄の「T」は、式(2)を満たすことを意味し、「F」は、式(2)を満たさない

いことを意味する。

[0139] スラブ（鋼片）に対して熱間圧延を実施して、板厚 2.0 mm の熱延鋼板を製造した。スラブ加熱温度は 1100～1200℃であった。仕上げ圧延温度は 800～1100℃であった。巻取り温度は 700～800℃であった。熱延鋼板に対して、連続焼鈍により 1000℃で 60 秒均熱する熱延板焼鈍を実施した。熱延板焼鈍後の鋼板に対して、冷間圧延を実施して、板厚 0.25 mm の冷延鋼板を製造した。

[0140] 製造された冷延鋼板に対して、仕上げ焼鈍を実施した。仕上げ焼鈍での最高到達温度 T_1 (℃)、張力 T_E (MPa)、滞在時間 t_0 (秒) 及び滞在時間 t_1 (秒)、 F_A 、 F_B 、酸素ポテンシャル P_{H_2O}/P_{H_2} 、酸素濃度 (%) 及び、温度勾配 CG (℃/m) を表 2 に示す。以上の製造工程により、各試験番号の無方向性電磁鋼板を製造した。

[0141]

[表2]

TABLE2									
試験 番号	仕上げ焼鈍工程								
	条件1	条件 2	条件3				条件4		条件5
	最高到達温度T1 (℃)	TE(MPa)	滞在時間t0 (秒)	滞在時間t1 (秒)	FA (t1-t0)	FB (t1/t0)	PH2O/PH2	酸素濃度(%)	温度勾配CG (℃/m)
1	820	2.5	48	50	2	1.0	5.12	0.001	13
2	820	2.5	17	27	10	1.6	0.32	0.001	15
3	850	2.5	43	51	8	1.2	0.01	0.015	10
4	820	2.5	23	26	3	1.1	0.13	0.001	11
5	830	2.5	27	29	2	1.1	0.09	0.001	12
6	860	2.5	21	24	3	1.1	0.11	0.001	14
7	850	2.5	19	26	7	1.4	0.13	0.001	9
8	870	2.5	23	27	4	1.2	0.15	0.001	10
9	830	2.5	24	27	3	1.1	0.16	0.001	16
10	810	2.5	37	47	10	1.3	0.30	0.001	13
11	780	7.0	32	43	11	1.3	0.20	0.001	11
12	890	3.0	24	29	5	1.2	0.25	0.001	14
13	890	3.0	23	27	4	1.2	0.16	0.001	10
14	880	3.0	25	56	31	2.2	0.13	0.001	11
15	810	3.0	21	28	7	1.3	0.09	0.001	13
16	800	3.0	44	51	7	1.2	0.24	0.001	11
17	790	3.0	27	29	2	1.1	0.01	0.016	11
18	830	3.0	25	27	2	1.1	0.13	0.001	13
19	850	3.0	26	53	27	2.0	0.20	0.001	9
20	840	3.0	22	26	4	1.2	0.46	0.001	10
21	780	8.0	15	29	14	1.9	0.01	0.017	10
22	920	3.0	26	29	3	1.1	0.16	0.001	13
23	800	2.5	18	27	9	1.5	0.06	0.023	11
24	810	2.5	17	28	11	1.6	0.13	0.001	10
25	830	2.5	21	26	5	1.2	0.25	0.001	18
26	840	2.5	18	29	11	1.6	0.09	0.001	13
27	810	2.5	48	53	5	1.1	0.24	0.001	11
28	910	2.5	24	26	2	1.1	0.17	0.001	10
29	790	2.5	27	29	2	1.1	0.11	0.001	11
30	870	2.5	17	27	10	1.6	0.26	0.001	9
31	830	2.5	19	26	7	1.4	0.36	0.001	9
32	850	3.0	23	27	4	1.2	0.25	0.001	11
33	860	3.0	22	26	4	1.2	0.68	0.001	10
34	820	3.0	24	28	4	1.2	0.82	0.001	11
35	830	3.0	23	27	4	1.2	0.11	0.001	10
36	890	3.0	22	26	4	1.2	0.13	0.001	13
37	860	3.0	24	28	4	1.2	0.25	0.001	12
38	870	3.0	13	27	14	2.1	0.09	0.001	13
39	960	2.5	26	27	1	1.0	0.16	0.001	11
40	970	2.5	21	29	8	1.4	0.20	0.001	10
41	800	1.5	24	27	3	1.1	0.18	0.001	9
42	820	1.5	21	29	8	1.4	0.16	0.001	11
43	780	11.0	19	23	4	1.2	0.24	0.001	13
44	830	11.0	23	26	3	1.1	0.22	0.001	12
45	860	2.5	29	18	-11	0.6	0.30	0.001	11
46	830	2.5	32	28	-4	0.9	0.24	0.001	10
47	820	2.5	26	81	55	3.1	0.17	0.001	9
48	850	2.5	19	61	42	3.2	0.24	0.001	13
49	820	3.0	22	30	8	1.4	0.00	0.001	8
50	840	3.0	17	29	12	1.7	0.00	0.001	10
51	790	3.0	23	34	11	1.5	0.26	0.001	21
52	810	3.0	22	32	10	1.5	0.36	0.001	23

[0142] [評価試験]

各試験番号の無方向性電磁鋼板に対して、次の評価試験を実施した。

- (試験 1) 化学組成測定試験
- (試験 2) 引張強さ T S 測定試験
- (試験 3) 加工硬化量 W H 評価試験
- (試験 4) 平均結晶粒径 D の測定試験
- (試験 5) 降伏伸び測定試験
- (試験 6) 磁気特性評価試験

(試験 7) 打抜き加工後の寸法精度評価試験

以下、試験 1 ～試験 7 について説明する。

[0143] 〔(試験 1) 化学組成測定試験〕

上述の〔無方向性電磁鋼板の化学組成の測定方法〕に記載の方法に準拠して、各試験番号の無方向性電磁鋼板の化学組成を求めた。その結果、各試験番号の無方向性電磁鋼板の化学組成は、表 1 (表 1 A ～表 1 C) に示すとおりであった。

[0144] 〔(試験 2) 引張強さ T S 測定試験〕

上述の〔応力－ひずみ曲線測定方法〕に記載の方法に準拠して、各試験番号の無方向性電磁鋼板の引張強さ T S (MP a) を求めた。得られた引張強さ T S (MP a) を表 3 に示す。

[0145]

[表3]

TABLE3												
試験 番号	引張強さ TS (MPa)	加工 硬化量WH (MPa)	平均 結晶粒径 D (μm)	80-Si $\times$ 10	式(4)	降伏伸び (%)	磁気特性				打抜き 平坦度 (μm)	備考
							磁束密度 B ₅₀ (T)	鉄損 W _{5/1000} (W/kg)		鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ (W/kg)		
								シアー切断	放電加工			
1	613	1	20	47	T	2.5	1.67	16.6	16.3	0.3	12	本発明例
2	598	0	22	45	T	4.5	1.68	16.4	16.3	0.1	11	本発明例
3	649	7	27	38	T	1.0	1.67	16.2	15.0	1.2	19	本発明例
4	605	1	24	44	T	2.1	1.68	16.2	15.9	0.3	12	本発明例
5	619	2	25	42	T	1.6	1.68	16.0	15.6	0.4	13	本発明例
6	581	3	29	46	T	1.5	1.68	16.0	15.4	0.6	14	本発明例
7	651	3	27	41	T	1.5	1.66	15.3	14.8	0.5	16	本発明例
8	626	5	34	40	T	1.1	1.60	15.2	14.4	0.8	17	本発明例
9	644	2	23	47	T	2.1	1.65	15.7	15.3	0.4	13	本発明例
10	618	0	21	45	T	2.4	1.68	16.4	16.3	0.1	11	本発明例
11	610	0	20	44	T	2.1	1.69	17.0	16.9	0.1	10	本発明例
12	635	10	37	39	T	0.7	1.66	15.6	14.1	1.5	19	本発明例
13	664	7	36	37	T	1.0	1.65	15.0	13.9	1.1	18	本発明例
14	601	9	41	44	T	0.7	1.67	15.5	14.2	1.3	18	本発明例
15	595	2	21	47	T	2.1	1.68	16.9	16.4	0.5	13	本発明例
16	616	1	20	45	T	2.2	1.68	16.8	16.6	0.2	13	本発明例
17	612	0	18	48	T	2.5	1.67	17.0	16.9	0.1	11	本発明例
18	629	1	22	46	T	2.1	1.66	16.0	15.8	0.2	12	本発明例
19	622	3	27	42	T	1.7	1.68	15.9	15.4	0.5	14	本発明例
20	627	2	24	44	T	1.8	1.66	15.7	15.4	0.3	14	本発明例
21	616	0	18	47	T	2.8	1.67	16.9	16.8	0.1	13	本発明例
22	591	12	43	45	T	0.7	1.66	15.6	13.9	1.7	16	本発明例
23	594	1	21	48	T	1.9	1.68	16.6	16.3	0.3	12	本発明例
24	603	1	22	46	T	1.9	1.68	16.5	16.2	0.3	12	本発明例
25	606	2	25	44	T	1.8	1.68	16.0	15.6	0.4	14	本発明例
26	595	3	27	47	T	1.6	1.67	15.8	15.2	0.4	16	本発明例
27	607	1	23	45	T	1.9	1.68	16.3	16.0	0.3	12	本発明例
28	607	10	40	42	T	0.8	1.66	15.6	14.1	1.5	16	本発明例
29	618	1	20	47	T	1.9	1.68	16.8	16.5	0.3	12	本発明例
30	636	7	33	44	T	1.5	1.65	15.0	14.0	1.0	17	本発明例
31	604	16	26	48	T	0.4	1.67	17.7	15.2	2.5	29	比較例
32	610	17	25	43	T	0.3	1.68	18.4	15.6	2.8	31	比較例
33	645	17	28	41	T	0.3	1.66	17.2	14.7	2.5	35	比較例
34	654	18	22	42	T	0.3	1.66	18.5	15.6	2.9	40	比較例
35	558	17	23	50	T	2.0	1.69	19.2	16.3	2.9	13	比較例
36	513	16	34	51	T	1.5	1.70	18.4	15.8	2.6	19	比較例
37	595	17	28	50	T	1.2	1.65	17.2	14.6	2.6	31	比較例
38	581	16	30	50	T	1.2	1.66	17.1	14.7	2.4	30	比較例
39	590	17	67	43	F	0.1	1.65	15.3	13.0	2.3	34	比較例
40	611	18	77	41	F	0.0	1.64	15.1	12.8	2.3	28	比較例
41	576	13	22	47	T	0.3	1.69	19.3	16.6	2.7	27	比較例
42	585	10	25	45	T	0.4	1.69	18.8	16.0	2.8	28	比較例
43	579	17	19	47	T	1.1	1.70	20.1	17.2	2.8	33	比較例
44	575	17	26	46	T	0.9	1.69	18.6	15.9	2.8	32	比較例
45	634	17	28	40	T	1.0	1.67	17.7	15.1	2.6	34	比較例
46	601	16	26	44	T	1.1	1.68	18.3	15.7	2.6	36	比較例
47	585	16	25	46	T	1.2	1.68	18.5	15.9	2.6	34	比較例
48	600	17	30	44	T	1.1	1.67	17.6	15.0	2.6	35	比較例
49	598	17	23	46	T	1.0	1.68	18.9	16.1	2.8	28	比較例
50	638	17	28	42	T	1.0	1.66	17.1	14.6	2.5	30	比較例
51	576	16	21	47	T	1.2	1.69	19.7	16.9	2.8	26	比較例
52	598	18	23	45	T	1.3	1.68	19.0	16.1	3.0	30	比較例

[0146] [（試験3）加工硬化量WH評価試験]

上述の〔加工硬化量WH評価試験〕に記載の方法に準拠して、各試験番号の無方向性電磁鋼板の加工硬化量WH（MPa）を求めた。得られた加工硬化量WH（MPa）を表3に示す。

[0147] [（試験4）平均結晶粒径Dの測定試験]

上述の〔平均結晶粒径Dの測定方法〕に記載の方法に準拠して、各試験番号の無方向性電磁鋼板の平均結晶粒径D（ μm ）を求めた。得られた平均結晶粒径Dを表3に示す。

[0148] [（試験5）降伏伸び測定試験]

上述の「降伏伸びの測定方法」に記載の方法に準拠して、各試験番号の無方向性電磁鋼板の降伏伸び（％）を求めた。得られた降伏伸び（％）を表3に示す。なお、表3中の「80-Si×10」には F_n 値を示す。また、表3中の「式（4）」欄の「T」は式（4）を満たしていることを意味し、「F」は式（4）を満たしていないことを示す。

[0149] 〔試験6）磁気特性評価試験〕

次の方法により、磁束密度 B_{50} （T）及び鉄損 $W_{5/1000}$ （W/kg）を求めた。

〔磁束密度 B_{50} 評価試験〕

各試験番号の無方向性電磁鋼板において、圧延方向（L方向）の磁束密度 $B_{50(L)}$ 、及び、圧延方向に直交する方向（C方向）の磁束密度 $B_{50(C)}$ を測定した。具体的には、各試験番号の無方向性電磁鋼板から、JIS C 2550-1：2011に準拠して、L方向及びC方向にエプスタイン試験片を切り出した。切り出したエプスタイン試験片に対して、JIS C 2550-1：2011及び2550-3：2011に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、L方向及びC方向の5000A/mにおける磁束密度 $B_{50(L)}$ （T）及び $B_{50(C)}$ （T）を測定した。L方向の磁束密度 $B_{50(L)}$ （T）及びC方向の磁束密度 $B_{50(C)}$ の算術平均値を、磁束密度 B_{50} （T）とした。得られた磁束密度 B_{50} （T）を表3に示す。

[0150] 〔鉄損 $W_{5/1000}$ 評価試験〕

上述の磁束密度 B_{50} 評価試験と同様に、エプスタイン試験片を準備した。なお、エプスタイン試験片の切り出しはクリアランスを20 μ mに設定したシャー切断と、放電加工との2通りで準備した。つまり、打抜き加工を想定したシャー切断により切り出したエプスタイン試験片と、放電加工により切り出したエプスタイン試験片の2種類の試験片を、各試験番号ごとに準備した。各エプスタイン試験片に対して、JIS C 2550-1：2011及び2550-3：2011に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、L方向（圧延方向）及びC方向（圧延方向に直交する方向）の、1000Hz、

0.5 Tにおける鉄損 $W_{5/1000(L)}$ (W/kg) 及び鉄損 $W_{5/1000(C)}$ (W/kg) を測定した。L方向（圧延方向）の鉄損 $W_{5/1000(L)}$ 及びC方向（圧延方向に直交する方向）の鉄損 $W_{5/1000(C)}$ (W/kg) の算術平均値を鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) とした。シャー切断によるエプスタイン試験片での鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を、表3中の「鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg)」の「シャー切断」欄に示す。放電加工によるエプスタイン試験片での鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を、表3中の「鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg)」の「放電加工」欄に示す。シャー切断での鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) から放電加工での鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を差し引いた値を、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ (W/kg) とした。鉄損劣化量 Δ 鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を表3に示す。

[0151] 〔試験7）打抜き加工後の寸法精度評価試験〕

各試験番号の無方向性電磁鋼板の打抜き加工後の寸法精度評価試験を、次の試験で評価した。各試験番号の無方向性電磁鋼板から、内径90mm、外径100mmのリング状サンプル（打抜き加工品）を、クリアランスを板厚の8%とした金型で打ち抜いて作製した。さらに、作製したリング状サンプルを、無方向性電磁鋼板の圧延方向から無方向性電磁鋼板の法線周りに45°刻みで切断して、8個の試験片とした。各試験片を樹脂埋めし、切断時の変形影響を取り除くために、切断面を1mm以上研磨した。研磨後、倍率100倍の光学顕微鏡により、内周面側の打抜き端面近傍の切断面及び外周面側の打抜き端面近傍の切断面を観察した。図6に示すとおり、ダレ面10から打抜き端面11に切り替わる点P1と、打抜き端面11のカエリ先端P2とを結ぶ線分20を引く。線分20と平行であって、線分20からはみ出た打抜き端面11と接する線分21を引く。線分20と線分21との間の距離dを求める。8個の試験片において求めた距離d（内周面側の打抜き端面近傍の切断面にて8個、外周面側の打抜き端面近傍の切断面で8個、内周面側及び外周面側の合計16個）の算術平均値を、打抜き平坦度（ μm ）と定義した。得られた打抜き平坦度を、表3中の「打抜き平坦度（ μm ）」に示す。

[0152] [評価結果]

表 1 ～表 3 を参照して、試験番号 1 ～30 では、特徴 1 ～特徴 5 を満たした。そのため、これらの試験番号の無方向性電磁鋼板では、磁束密度 B_{50} が 1.60 T 以上であり、かつ、放電加工での鉄損 $W_{5/1000}$ からシャー切断での鉄損 $W_{5/1000}$ を差し引いた鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が 2.0 以下であり、優れた磁気特性（磁束密度及び鉄損）が得られた。さらに、打抜き平坦度が $25 \mu\text{m}$ 以下であり、打抜き加工後の寸法精度に優れた。

[0153] 一方、試験番号 31 ～34 では、式 (1) 又は式 (2) を満たさなかった。そのため、打抜き平坦度が $25 \mu\text{m}$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が 2.0 超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0154] 試験番号 35 及び 36 では、Si 含有量が低すぎた。そのため、引張強さ TS が低すぎた。さらに、加工硬化量 WH が 15 MPa 以上となった。その結果、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が 2.0 超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0155] 試験番号 37 及び 38 では、Si 含有量が低すぎた。そのため、加工硬化量 WH が 15 MPa 以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25 \mu\text{m}$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が 2.0 超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0156] 試験番号 39 及び 40 では、仕上げ焼鈍工程での条件 1 を満たさなかった。そのため、加工硬化量 WH が 15 MPa 以上となった。さらに、式 (4) を満たさず、降伏伸びも 0.5 % 未満であった。その結果、打抜き平坦度が $25 \mu\text{m}$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が 2.0 超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0157] 試験番号 41 及び 42 では、最高到達温度 T_1 での張力 TE が低すぎた。そのため、降伏伸びが 0.5 % 未満であった。その結果、打抜き平坦度が $25 \mu\text{m}$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、

鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0158] 試験番号43及び44では、最高到達温度 T_1 での張力 T_E が高すぎた。そのため、加工硬化量 WH が15MPa以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25\mu m$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0159] 試験番号45及び46では、仕上げ焼鈍工程で FA が式(A)を満たさなかった。そのため、加工硬化量 WH が15MPa以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25\mu m$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0160] 試験番号47及び48では、 FB が式(B)を満たさなかった。そのため、加工硬化量 WH が15MPa以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25\mu m$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0161] 試験番号49及び50では、仕上げ焼鈍工程での条件4を満たさなかった。そのため、加工硬化量 WH が15MPa以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25\mu m$ を超え、打抜き加工時に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

[0162] 試験番号51及び52では、温度勾配 CG が大きすぎた。そのため、加工硬化量 WH が15MPa以上となった。その結果、打抜き平坦度が $25\mu m$ を超え、打抜き加工後に十分な寸法精度が得られなかった。さらに、鉄損劣化量 $\Delta W_{5/1000}$ が2.0超であり、優れた磁気特性が得られなかった。

実施例 2

[0163] 実施例1の試験番号1～30の無方向性電磁鋼板を用いて、図4に示す形

状のロータコアを製造した。

具体的には、各試験番号の無方向性電磁鋼板に対して、打抜き加工を実施した。打抜き加工では、クリアランスを板厚の8%とした金型で打ち抜いてロータコア素材を作製した。複数のロータコア素材を積層してロータコアとした。ロータコア素材の直径は70mmであった。

[0164] 各試験番号のロータコアに対して、次の評価試験を実施した。

(試験1) 引張強さTS測定試験

(試験2) 加工硬化量WH評価試験

(試験3) 平均結晶粒径Dの測定試験

(試験4) 降伏伸び測定試験

(試験5) 磁気特性評価試験

(試験6) 打抜き加工後の寸法精度評価試験

以下、試験1～試験6について説明する。

[0165] [(試験1) 引張強さTS測定試験]

ロータコアからロータコア素材を分離した。上述の[ロータコア素材2の応力-ひずみ曲線測定方法]に記載の方法に準拠して、ロータコア素材の引張強さTS(MPa)を求めた。なお、ロータコア素材から採取した引張試験片のサイズは、平行部幅が2.50mm、標点距離が5.00mm、厚さが0.25mm、全長が25mmであった。ロータコア素材の引張強さTS(MPa)を表4に示す。

[0166] [(試験2) 加工硬化量WH評価試験]

上述の[ロータコア素材2の加工硬化量WH評価試験]に記載の方法に準拠して、ロータコア素材の加工硬化量WHを求めた。得られたロータコア素材の加工硬化量WH(MPa)を表4に示す。

[0167] [(試験3) 平均結晶粒径Dの測定試験]

ロータコアからロータコア素材を分離した。上述の[ロータコア素材2の平均結晶粒径Dの測定方法]に記載の方法に準拠して、ロータコア素材の平均結晶粒径D(μm)を求めた。得られたロータコア素材の平均結晶粒径D

(μm) を表 4 に示す。

[0168] 〔（試験 4）降伏伸び測定試験〕

ロータコアからロータコア素材を分離した。上述の〔ロータコア素材 2 の降伏伸びの測定方法〕に記載の方法に準拠して、ロータコア素材の降伏伸び（％）を求めた。なお、ロータコア素材から採取した引張試験片のサイズは、平行部幅が 2.50 mm、標点距離が 5.00 mm、厚さが 0.25 mm、全長が 25 mm であった。ロータコア素材の降伏伸び（％）を表 4 に示す。

[0169] 〔（試験 5）磁気特性評価試験〕

ロータコアからロータコア素材を分離した。分離したロータコア素材から、採取可能な寸法の単板磁気測定用の小型試験片を放電加工により作製した。小型試験片のサイズは 10 mm × 20 mm × 板厚であった。

小型試験片及び単板試験器を用いて、JIS C 2556:2015 に記載の単板磁気特性試験法（Single Sheet Tester: SST）に準拠して、ロータコア素材の磁束密度 B_{50} (T) 及び鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を求めた。

得られたロータコア素材の磁束密度 B_{50} (T) 及び鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を表 4 に示す。

[0170] 〔（試験 6）打抜き加工後の寸法精度評価試験〕

打抜き加工後のロータコア素材を、ロータコア素材の中心軸周りに 45° 刻みで切断して、打抜き加工時のロータコア素材の外周面側を含む 8 個の試験片とした。各試験片を樹脂埋めし、切断時の変形影響を取り除くために、切断面を 1 mm 以上研磨した。研磨後、倍率 100 倍の光学顕微鏡により、ロータコア素材の外周面近傍部分の切断面を観察した。図 6 に示すとおり、ダレ面 10 から打抜き端面 11 に切り替わる点 P1 と、打抜き端面 11 のカエリ先端 P2 とを結ぶ線分 20 を引く。線分 20 と平行であって、線分 20 からはみ出た打抜き端面 11 と接する線分 21 を引く。線分 20 と線分 21 との間の距離 d を求める。8 個の試験片において求めた距離 d （合計 8 個）

の算術平均値を、打抜き平坦度 (μm) とした。得られたロータコア素材の打抜き平坦度 (μm) を表4に示す。なお、ロータコア素材の内周面側については、シャフト挿入時の加工等により打抜き加工時の打抜き端面が維持されていない場合もある。そこで、上述のとおり、ロータコア素材の外周面近傍部分の打抜き端面で寸法精度を評価した。

[0171] [表4]

試験 番号	引張強さ TS (MPa)	加工 硬化量WH (MPa)	平均 結晶粒径 D (μm)	80-Si $\times$ 10	式(4)	降伏伸び (%)	磁気特性		打抜き 平坦度 (μm)	備考
							磁束密度 B ₅₀ (T)	鉄損 W _{5/1000} (W/kg)		
1	610	1	19	47	T	2.2	1.66	16.5	11	本発明例
2	591	0	22	45	T	4.3	1.67	16.5	12	本発明例
3	640	6	27	38	T	1.0	1.66	15.4	18	本発明例
4	600	2	25	44	T	1.9	1.68	16.1	13	本発明例
5	615	2	25	42	T	1.5	1.67	15.7	12	本発明例
6	573	2	28	46	T	1.3	1.68	15.6	12	本発明例
7	645	3	27	41	T	1.5	1.65	15.0	15	本発明例
8	620	4	32	40	T	1.1	1.60	14.6	18	本発明例
9	640	2	25	47	T	2.0	1.64	15.6	13	本発明例
10	610	1	21	45	T	2.2	1.67	16.4	11	本発明例
11	603	0	20	44	T	2.2	1.68	16.9	11	本発明例
12	622	9	36	39	T	0.6	1.65	14.5	18	本発明例
13	650	6	36	37	T	1.0	1.65	14.2	19	本発明例
14	591	8	41	44	T	0.7	1.66	14.5	18	本発明例
15	590	2	20	47	T	2.0	1.67	16.7	13	本発明例
16	610	2	20	45	T	2.1	1.67	16.7	12	本発明例
17	603	1	19	48	T	2.4	1.67	16.9	10	本発明例
18	615	2	22	46	T	2.0	1.65	15.8	12	本発明例
19	613	4	26	42	T	1.7	1.67	15.5	13	本発明例
20	615	2	25	44	T	1.8	1.66	15.6	12	本発明例
21	610	1	19	47	T	2.6	1.67	16.8	15	本発明例
22	580	11	42	45	T	0.7	1.65	14.3	16	本発明例
23	580	2	20	48	T	1.7	1.67	16.4	12	本発明例
24	691	1	21	46	T	1.8	1.67	16.2	11	本発明例
25	600	1	26	44	T	1.7	1.67	15.8	14	本発明例
26	590	2	26	47	T	1.6	1.67	15.4	15	本発明例
27	600	2	24	45	T	1.8	1.67	16.2	11	本発明例
28	597	8	39	42	T	0.9	1.65	14.8	16	本発明例
29	610	2	20	47	T	1.8	1.67	16.6	12	本発明例
30	621	6	33	44	T	1.5	1.64	14.3	16	本発明例

[0172] [評価結果]

表4に示すとおり、ロータコアにおいて、試験番号1～30のロータコア素材では、特徴1～特徴5を満たした。そのため、これらの試験番号のロータコア素材では、打抜き平坦度が25 μm 以下であり、打抜き加工後の寸法精度に優れた。なお、ロータコア素材では、磁束密度B₅₀が1.60 T以上であり、かつ、鉄損W_{5/1000}が16.9 W/kg以下であり、高強度及び優れた磁気特性が得られた。

[0173] 以上、本開示の無方向性電磁鋼板の好適な実施例について説明したが、本開示の無方向性電磁鋼板はかかる例に限定されない。当業者であれば、特許

請求の範囲に記載された思想の範疇内において、各種の変更例または修正例に想到し得ることは明らかであり、それらについても当然に本開示の無方向性電磁鋼板の技術的範囲に属するものと了解される。

請求の範囲

[請求項1] 無方向性電磁鋼板であって、
質量%で、
S i : 3. 1 ~ 4. 5 %、
C : 0. 0 0 2 5 %以下、
N : 0. 0 0 2 5 %以下、
O : 0. 0 4 0 0 %以下、
P : 0. 1 0 0 %以下、
S : 0. 0 0 5 0 %以下、
T i : 0. 0 1 0 0 %以下、
M n : 2. 0 %以下、
A l : 1. 5 0 0 %以下、
Z r : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
N b : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
V : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
M o : 0 ~ 0. 1 0 0 %、
C r : 0 ~ 2. 0 0 0 %、
L a : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
C e : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
B : 0 ~ 0. 0 0 1 0 %、
Z n : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、
G a : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、
G e : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、
A s : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
N i : 0 ~ 0. 5 0 0 %、
C u : 0 ~ 0. 5 0 0 %、
S n : 0 ~ 0. 2 0 0 %、
S b : 0 ~ 0. 1 0 0 %、

Ca : 0 ~ 0.0050 %、

Nd : 0 ~ 0.0010 %、

Mg : 0 ~ 0.0030 %、及び、

残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たし、引張強さTSが570MPaよりも高く、

2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満であり、

平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である、

無方向性電磁鋼板。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

$$\text{WH} = Y_{2.0} - \text{YS} \quad (3)$$

$$D < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式(1)、式(2)及び式(4)中の元素記号には、対応する元素含有量が質量%で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「0」が代入される。

[請求項2]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、質量%で、

Zr : 0.0001 ~ 0.0100 %、

Nb : 0.0001 ~ 0.0100 %、

V : 0.0001 ~ 0.0100 %、

Mo : 0.001 ~ 0.100 %、

Cr : 0.001 ~ 2.000 %、

La : 0.0001 ~ 0.0100 %、

Ce : 0.0001~0.0100%、
B : 0.0001~0.0010%、
Zn : 0.0001~0.0050%、
Ga : 0.0001~0.0050%、
Ge : 0.0001~0.0050%、
As : 0.0001~0.0100%、
Ni : 0.001~0.500%、
Cu : 0.001~0.500%、
Sn : 0.001~0.200%、
Sb : 0.001~0.100%、
Ca : 0.0001~0.0050%、
Nd : 0.0001~0.0010%、及び、
Mg : 0.0001~0.0030%、からなる群から選択される

1種以上を含有する、

無方向性電磁鋼板。

[請求項3]

互いに積層された複数のロータコア素材を備え、

前記ロータコア素材は、

質量%で、

Si : 3.1~4.5%、

C : 0.0025%以下、

N : 0.0025%以下、

O : 0.0400%以下、

P : 0.100%以下、

S : 0.0050%以下、

Ti : 0.0100%以下、

Mn : 2.0%以下、

Al : 1.500%以下、

Zr : 0~0.0100%、

Nb : 0 ~ 0.0100%、

V : 0 ~ 0.0100%、

Mo : 0 ~ 0.100%、

Cr : 0 ~ 2.000%、

La : 0 ~ 0.0100%、

Ce : 0 ~ 0.0100%、

B : 0 ~ 0.0010%、

Zn : 0 ~ 0.0050%、

Ga : 0 ~ 0.0050%、

Ge : 0 ~ 0.0050%、

As : 0 ~ 0.0100%、

Ni : 0 ~ 0.500%、

Cu : 0 ~ 0.500%、

Sn : 0 ~ 0.200%、

Sb : 0 ~ 0.100%、

Ca : 0 ~ 0.0050%、

Nd : 0 ~ 0.0010%、

Mg : 0 ~ 0.0030%、及び、

残部はFe及び不純物からなり、式(1)及び式(2)を満たし、引張強さTSが570MPaよりも高く、

2.0%ひずみ時の応力を $Y_{2.0}$ (MPa)とし、降伏応力をYS (MPa)としたとき、式(3)で定義される加工硬化量WHが15MPa未満であり、

平均結晶粒径D (μm) が式(4)を満たし、降伏伸びが0.5%以上である、

ロータコア。

$$\text{Si} / 28 + \text{Ti} / 48 + \text{Nb} / 93 + \text{V} / 51 + \text{Zr} / 91 + \text{Mo} / 96 + \text{Cr} / 52 > \text{C} / 12 \times 750 \quad (1)$$

$$\text{Si} / 28 + \text{Al} / 27 + \text{Ti} / 48 + \text{Zr} / 91 + \text{La} / 139 \\ + \text{Ce} / 140 > \text{N} / 14 \times 1000 \quad (2)$$

$$\text{WH} = \text{Y}_{2.0} - \text{YS} \quad (3)$$

$$\text{D} < 80 - \text{Si} \times 10 \quad (4)$$

ここで、式（１）、式（２）及び式（４）中の元素記号には、対応する元素含有量が質量％で代入される。対応する元素が含有されていない場合、その元素記号には「０」が代入される。

[請求項４]

請求項３に記載のロータコアであって、

前記ロータコア素材は、

質量％で、

Zr : 0.0001～0.0100％、

Nb : 0.0001～0.0100％、

V : 0.0001～0.0100％、

Mo : 0.001～0.100％、

Cr : 0.001～2.000％、

La : 0.0001～0.0100％、

Ce : 0.0001～0.0100％、

B : 0.0001～0.0010％、

Zn : 0.0001～0.0050％、

Ga : 0.0001～0.0050％、

Ge : 0.0001～0.0050％、

As : 0.0001～0.0100％、

Ni : 0.001～0.500％、

Cu : 0.001～0.500％、

Sn : 0.001～0.200％、

Sb : 0.001～0.100％、

Ca : 0.0001～0.0050％、

Nd : 0.0001～0.0010％、及び、

Mg : 0.0001 ~ 0.0030%、からなる群から選択される
1種以上を含有する、

ロータコア。

[請求項5] 請求項3又は請求項4に記載のロータコアを備える、
モータ。

[請求項6] 請求項1又は請求項2に記載の無方向性電磁鋼板の製造方法であっ
て、

スラブに対して熱間圧延を実施して熱延鋼板を製造する熱間圧延工
程と、

前記熱延鋼板を冷間圧延して冷延鋼板を製造する冷間圧延工程と、

前記冷延鋼板に対して仕上げ焼鈍炉で仕上げ焼鈍を実施する仕上げ
焼鈍工程とを備え、

前記仕上げ焼鈍工程では、

950℃以下の最高到達温度T1で前記冷延鋼板を焼鈍し、

前記最高到達温度T1で前記冷延鋼板に付与する張力TEを2.0
~ 10.0MPaとし、

前記仕上げ焼鈍炉の加熱帯、均熱帯及び冷却帯での焼鈍温度T1 ~
700℃の間の滞在時間t0（秒）と、前記冷却帯での700 ~ 50
0℃の間の滞在時間t1（秒）とが式（A）及び式（B）を満たすよ
うにし、

前記仕上げ焼鈍炉の炉内雰囲気での500℃以上の温度域における
前記加熱帯、前記均熱帯及び前記冷却帯から選択される1箇所以上に
おいて、水素分圧 P_{H_2} （atm）に対する水蒸気分圧 P_{H_2O} （atm）
の比を0.05よりも高くする、又は、酸素濃度を0.010%よ
りも高くし、

冷却過程での前記冷延鋼板の長手方向での温度勾配CGを20℃/
m以下とする、

無方向性電磁鋼板の製造方法。

$$t_1 - t_0 > 0 \quad (A)$$

$$t_1 / t_0 \leq 3.0 \quad (B)$$