

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号  
特許第7231133号  
(P7231133)

(45)発行日 令和5年3月1日(2023.3.1)

(24)登録日 令和5年2月20日(2023.2.20)

(51)国際特許分類	F I	
C 2 2 C 38/00 (2006.01)	C 2 2 C 38/00	3 0 3 U
C 2 2 C 38/06 (2006.01)	C 2 2 C 38/06	
C 2 2 C 38/60 (2006.01)	C 2 2 C 38/60	
C 2 1 D 8/12 (2006.01)	C 2 1 D 8/12	A
C 2 1 D 9/46 (2006.01)	C 2 1 D 9/46	5 0 1 A
請求項の数 6 (全25頁) 最終頁に続く		

(21)出願番号	特願2022-568988(P2022-568988)	(73)特許権者	000001258
(86)(22)出願日	令和4年10月26日(2022.10.26)		J F E スチール株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/040033		東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号
審査請求日	令和4年11月11日(2022.11.11)	(74)代理人	100147485
早期審査対象出願			弁理士 杉村 憲司
		(74)代理人	230118913
			弁護士 杉村 光嗣
		(74)代理人	100165696
			弁理士 川原 敬祐
		(74)代理人	100119079
			弁理士 伊藤 佐保子
		(72)発明者	田中 孝明
			東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号
			J F E スチール株式会社内
		(72)発明者	大久保 智幸
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 無方向性電磁鋼板およびその製造方法、ならびにモータコア

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

無方向性電磁鋼板であって、  
質量%で、  
C : 0.01% 以下、  
Si : 2.0% 以上 4.5% 未満、  
Mn : 0.05% 以上 5.00% 以下、  
P : 0.1% 以下、  
S : 0.01% 以下、  
Al : 3.0% 以下および  
N : 0.0050% 以下

を含み、Si + Alが4.5% 未満であり、残部がFeおよび不可避免的不純物である成分組成を有し、

鋼板中の結晶粒について、平均結晶粒径  $X_1$  が50  $\mu\text{m}$  以下であり、結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が次式 (1) :

$$S_1 / X_1 < 0.75 \dots (1)$$

を満たし、かつ、結晶粒径分布の尖度  $K_1$  が20.0以下であることを特徴とする、無方向性電磁鋼板。

【請求項 2】

前記成分組成は、下記 A 群、 B 群、 C 群、 D 群および E 群のうちの少なくとも一群をさ

らに含有する請求項 1 に記載の無方向性電磁鋼板。

A 群：質量%で、

Co：0.0005%以上0.0050%以下

B 群：質量%で、

Cr：0.05%以上5.00%以下

C 群：質量%で、

Ca：0.001%以上0.100%以下、

Mg：0.001%以上0.100%以下および

REM：0.001%以上0.100%以下

のいずれか 1 種または 2 種以上

10

D 群：質量%で、

Sn：0.001%以上0.200%以下および

Sb：0.001%以上0.200%以下

のいずれか 1 種または 2 種

E 群：質量%で、

Cu：0%以上0.5%以下、

Ni：0%以上0.5%以下、

Ti：0%以上0.005%以下、

Nb：0%以上0.005%以下、

V：0%以上0.010%以下、

Ta：0%以上0.002%以下、

B：0%以上0.002%以下、

Ga：0%以上0.005%以下、

Pb：0%以上0.002%以下、

Zn：0%以上0.005%以下、

Mo：0%以上0.05%以下、

W：0%以上0.05%以下、

Ge：0%以上0.05%以下および

As：0%以上0.05%以下

のいずれか 1 種または 2 種以上

20

【請求項 3】

無方向性電磁鋼板であって、

請求項 1 または 2 に記載の成分組成を有し、

鋼板中の結晶粒について、平均結晶粒径  $X_2$  が  $80 \mu\text{m}$  以上であり、結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  が次式 (2)：

$$S_2 / X_2 < 0.75 \quad \dots (2)$$

を満たし、かつ、結晶粒径分布の尖度  $K_2$  が 3.00 以下であることを特徴とする、無方向性電磁鋼板。

【請求項 4】

請求項 1 または 2 に記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

請求項 1 または 2 に記載の成分組成を有する鋼素材に、熱間圧延を施して熱延板を得る熱間圧延工程と、

前記熱延板に酸洗を施す酸洗工程と、

前記酸洗が施された前記熱延板に、最終パスのワークロール径  $D$  が  $150\text{mm}$  以上、最終パスの圧下率  $r$  が 15% 以上、および最終パスのひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  が  $100 \text{ s}^{-1}$  以上  $1300 \text{ s}^{-1}$  以下の条件にて冷間圧延を施して冷延板を得る冷間圧延工程と、

前記冷延板を、 $500$  から  $700$  の平均昇温速度  $V_1$  が  $10$  /  $\text{s}$  以上の条件にて、 $700$

以上  $850$  以下の焼鈍温度  $T_2$  まで加熱したのち、冷却して、無方向性電磁鋼板である

冷延焼鈍板を得る焼鈍工程と、

を備える、無方向性電磁鋼板の製造方法。

40

50

## 【請求項 5】

請求項 3 に記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、請求項 1 または 2 に記載の無方向性電磁鋼板を、750 以上 900 以下の熱処理温度  $T_3$  で加熱する熱処理工程を備える、無方向性電磁鋼板の製造方法。

## 【請求項 6】

請求項 1 または 2 に記載の無方向性電磁鋼板の積層体であるロータコアと、請求項 3 に記載の無方向性電磁鋼板の積層体であるステータコアとからなる、モータコア。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、無方向性電磁鋼板およびその製造方法、ならびに該無方向性電磁鋼板を用いるモータコアに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、電気機器に対する省エネルギー化への要求が世界的に高まっている。これに伴い、回転機の鉄心に使用される無方向性電磁鋼板に対しても、より優れた磁気特性が要求されるようになってきている。また、最近では、HEV（ハイブリッド車）やEV（電気自動車）の駆動モータ等において、小型化・高出力化のニーズが強く、かかるニーズに応じるため、モータの回転数を上昇させることが検討されている。

## 【0003】

モータコアは、ステータコアとロータコアとに分けられるが、HEV 駆動モータのロータコアには、その外径が大きいため、大きな遠心力が働く。また、ロータコアは、構造上、ロータコアブリッジ部と呼ばれる非常に狭い部分（幅：1～2mm）が存在し、該部分は、モータ駆動中には特に高応力状態となる。さらに、モータが回転と停止とを繰り返すことで、ロータコアには遠心力による大きな繰り返し応力が働くことから、ロータコアに用いられる電磁鋼板は、優れた疲労特性を有する必要がある。

一方、ステータコアに用いられる電磁鋼板は、モータの小型化・高出力化を達成するため、高磁束密度かつ低鉄損であることが望ましい。すなわち、モータコアに使用される電磁鋼板に求められる特性として、ロータコア用の電磁鋼板は優れた疲労特性を有すること、また、ステータコア用の電磁鋼板は高磁束密度かつ低鉄損であることが理想的である。

## 【0004】

このように、同じモータコアに使用される電磁鋼板であっても、ロータコアとステータコアとでは、要求される特性が大きく異なる。しかし、モータコアの製造においては、材料歩留りおよび生産性を高めるため、同一の素材鋼板からロータコア材とステータコア材を打ち抜き加工により同時に採取し、その後、それぞれの鋼板を積層してロータコアまたはステータコアに組み立てることが望ましい。

## 【0005】

モータコア用の高強度で低鉄損の無方向性電磁鋼板を製造する技術として、例えば、特許文献 1 には、高強度の無方向性電磁鋼板を製造し、該鋼板から打抜き加工でロータコア材とステータコア材とを採取して積層し、ロータコアおよびステータコアを組み立てた後、ステータコアのみに歪取り焼鈍を施すといった、高強度のロータコアと低鉄損のステータコアとを同一素材から製造する技術が開示されている。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0006】

【文献】特開 2008 - 50686 号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0007】

しかしながら、上記特許文献 1 に開示の技術では、本発明者らの検討によると、高強度

10

20

30

40

50

の無方向性電磁鋼板を使用することにより降伏応力は向上するが、最も重要な特性である疲労強度は必ずしも向上するとは限らない点が懸念される。さらに、特許文献 1 に開示の技術では、歪取り焼鈍後の鉄損値は必ずしも産業上要求されるレベルを安定的に達成することができない点に問題がある。

【 0 0 0 8 】

本発明は、上記従来技術が抱える問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、ロータコアに適した良好な疲労特性を有する高強度無方向性電磁鋼板と、ステータコアに適した優れた磁気特性を有する無方向性電磁鋼板とを提供するとともに、該無方向性電磁鋼板を安価に製造する方法について提案することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

本発明者らが上記課題の解決に関し鋭意検討したところ、結晶粒径分布を制御することによって、疲労強度の高い無方向性電磁鋼板が得られること、および、この無方向性電磁鋼板を歪取り焼鈍（熱処理）により粒成長させた場合に優れた低鉄損を安定して実現できること、を知見するに至った。さらに、冷間圧延の最終パスにおける圧延条件の適正化を図ることにより、結晶粒径分布を制御できることも見出した。

本発明はかかる知見に基づきなされたものであり、以下の構成を有する。

【 0 0 1 0 】

[ 1 ] 無方向性電磁鋼板であって、

質量%で、

C : 0.01% 以下、

Si : 2.0% 以上 4.5% 未満、

Mn : 0.05% 以上 5.00% 以下、

P : 0.1% 以下、

S : 0.01% 以下、

Al : 3.0% 以下および

N : 0.0050% 以下

を含み、Si + Al が 4.5% 未満であり、残部が Fe および不可避的不純物である成分組成を有し、

鋼板中の結晶粒について、平均結晶粒径  $X_1$  が  $50 \mu\text{m}$  以下であり、結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が次式 ( 1 ) :

$$S_1 / X_1 < 0.75 \quad \dots ( 1 )$$

を満たし、かつ、結晶粒径分布の尖度  $K_1$  が 20.0 以下であることを特徴とする、無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 1 】

[ 2 ] 前記成分組成は、さらに質量%で、

Co : 0.0005% 以上 0.0050% 以下

を含む、前記 [ 1 ] に記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 2 】

[ 3 ] 前記成分組成は、さらに質量%で、

Cr : 0.05% 以上 5.00% 以下

を含む、前記 [ 1 ] または [ 2 ] に記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 3 】

[ 4 ] 前記成分組成は、さらに質量%で、

Ca : 0.001% 以上 0.100% 以下、

Mg : 0.001% 以上 0.100% 以下および

REM : 0.001% 以上 0.100% 以下

のいずれか 1 種または 2 種以上を含む、前記 [ 1 ] から [ 3 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 4 】

10

20

30

40

50

[ 5 ] 前記成分組成は、さらに質量%で、  
 Sn : 0.001% 以上0.200% 以下および  
 Sb : 0.001% 以上0.200% 以下

のいずれか 1 種または 2 種を含む、前記 [ 1 ] から [ 4 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 5 】

[ 6 ] 前記成分組成は、さらに質量%で、

Cu : 0% 以上0.5% 以下、

Ni : 0% 以上0.5% 以下、

Ti : 0% 以上0.005% 以下、

Nb : 0% 以上0.005% 以下、

V : 0% 以上0.010% 以下、

Ta : 0% 以上0.002% 以下、

B : 0% 以上0.002% 以下、

Ga : 0% 以上0.005% 以下、

Pb : 0% 以上0.002% 以下、

Zn : 0% 以上0.005% 以下、

Mo : 0% 以上0.05% 以下、

W : 0% 以上0.05% 以下、

Ge : 0% 以上0.05% 以下および

As : 0% 以上0.05% 以下

のいずれか 1 種または 2 種以上を含む、前記 [ 1 ] から [ 5 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 6 】

[ 7 ] 無方向性電磁鋼板であって、

前記 [ 1 ] から [ 6 ] のいずれかに記載の成分組成を有し、

鋼板中の結晶粒について、平均結晶粒径  $X_2$  が  $80 \mu\text{m}$  以上であり、結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  が次式 ( 2 ) :

$$S_2 / X_2 < 0.75 \quad \dots ( 2 )$$

を満たし、かつ、結晶粒径分布の尖度  $K_2$  が 3.00 以下であることを特徴とする無方向性電磁鋼板。

【 0 0 1 7 】

[ 8 ] 前記 [ 1 ] から [ 6 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、

前記 [ 1 ] から [ 6 ] のいずれかに記載の成分組成を有する鋼素材に、熱間圧延を施して熱延板を得る熱間圧延工程と、

前記熱延板に酸洗を施す酸洗工程と、

前記酸洗が施された前記熱延板に、最終パスのワークロール径  $D$  が  $150\text{mm}$  以上、最終パスの圧下率  $r$  が 15% 以上、および最終パスのひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  が  $100 \text{ s}^{-1}$  以上  $1300 \text{ s}^{-1}$  以下の条件にて冷間圧延を施して冷延板を得る冷間圧延工程と、

前記冷延板を、 $500$  から  $700$  の平均昇温速度  $V_1$  が  $10$  /  $\text{s}$  以上の条件にて、 $700$  以上  $850$  以下の焼鈍温度  $T_2$  まで加熱したのち、冷却して、無方向性電磁鋼板である冷延焼鈍板を得る焼鈍工程と、

を備える無方向性電磁鋼板の製造方法。

【 0 0 1 8 】

[ 9 ] 前記 [ 7 ] に記載の無方向性電磁鋼板を製造する方法であって、前記 [ 1 ] から [ 6 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板を、 $750$  以上  $900$  以下の熱処理温度  $T_3$  で加熱する熱処理工程を備える無方向性電磁鋼板の製造方法。

【 0 0 1 9 】

[ 10 ] 前記 [ 1 ] から [ 6 ] のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板の積層体であるロー

10

20

30

40

50

タコアと、前記 [ 7 ] に記載の無方向性電磁鋼板の積層体であるステータコアとからなる、モータコア。

【発明の効果】

【 0 0 2 0 】

本発明によれば、ロータコアに適した良好な疲労強度を有する無方向性電磁鋼板と、ステータコアに適した優れた磁気特性（低鉄損）を有する無方向性電磁鋼板とを提供することができる。しかも、これらの無方向性電磁鋼板は、同一の鋼板から提供することができる。従って、本発明の無方向性電磁鋼板を用いることにより、高性能なモータコアを材料歩留りよく安価に提供することができる。本発明の無方向性電磁鋼板は、小型かつ高出力なモータにも好適に使用できる。

10

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 1 】

以下、本発明の詳細をその限定理由とともに説明する。

【 0 0 2 2 】

< 無方向性電磁鋼板の成分組成 >

本発明の無方向性電磁鋼板およびモータコアが有する好適な成分組成について説明する。成分組成における元素の含有量の単位はいずれも「質量%」であるが、以下、特に断らない限り単に「%」で示す。

【 0 0 2 3 】

なお、本発明の無方向性電磁鋼板としては、主にロータコアに適した第1の無方向性電磁鋼板と、主にステータコアに適した第2の無方向性電磁鋼板とが挙げられる。ただし、これらの無方向性電磁鋼板は、同一の鋼板から得られるものであるため、好適な成分組成は、第1の無方向性電磁鋼板と第2の無方向性電磁鋼板とで、共通する。

20

【 0 0 2 4 】

C : 0.01% 以下

C は、モータの使用中に炭化物を形成して磁気時効を起こし、鉄損特性を劣化させる有害元素である。磁気時効を回避するためには、鋼板におけるC含有量は0.01%以下とする。好ましくは、C含有量は0.004%以下である。なお、C含有量の下限は、特に規定しないが、過度にCを低減した鋼板は非常に高価であることから、C含有量は0.0001%以上であることが好ましい。

30

【 0 0 2 5 】

Si : 2.0% 以上 4.5% 未満

Si は、鋼の固有抵抗を高め、鉄損を低減する効果があり、また、固溶強化により鋼の強度を高める効果がある。このような効果を得るためには、Si含有量を2.0%以上とする。一方、Si含有量が4.5%以上になると、飽和磁束密度の低下に伴い磁束密度が顕著に低下するため、Si含有量は4.5%未満とした。従って、Si含有量は2.0%以上4.5%未満の範囲とする。Si含有量は、好ましくは2.5%以上4.5%未満であり、より好ましくは3.0%以上4.5%未満である。

【 0 0 2 6 】

Mn : 0.05% 以上 5.00% 以下

Mn は、Siと同様、鋼の固有抵抗および強度を高めるのに有用な元素である。このような効果を得るためには、Mn含有量を0.05%以上とする必要がある。一方、Mn含有量が5.00%を超えると、MnCの析出を促進して磁気特性を劣化させる場合があるため、Mn含有量の上限は5.00%とした。従って、Mn含有量は0.05%以上5.00%以下とする。Mn含有量は、好ましくは0.10%以上であり、また、好ましくは3.00%以下である。

40

【 0 0 2 7 】

P : 0.1% 以下

P は、鋼の強度（硬さ）の調整に用いられる有用な元素である。しかし、P含有量が0.1%を超えると、靱性が低下し、加工時に割れを生じやすいため、P含有量は0.1%以下とする。なお、P含有量の下限は、特に規定しないが、過度にPを低減した鋼板は非常に高

50

価であることから、P含有量は0.001%以上であることが好ましい。P含有量は、好ましくは0.003%以上であり、また、好ましくは0.08%以下である。

**【0028】**

S：0.01%以下

Sは、微細析出物を形成して鉄損特性に悪影響を及ぼす元素である。特に、S含有量が0.01%を超えると、その悪影響が顕著になるため、S含有量は0.01%以下とする。なお、S含有量の下限は、特に規定しないが、過度にSを低減した鋼板は非常に高価であることから、S含有量は0.0001%以上であることが好ましい。S含有量は、好ましくは0.0003%以上であり、また、好ましくは0.0080%以下であり、より好ましくは0.0050%以下である。

10

**【0029】**

Al：3.0%以下

Alは、Siと同様、鋼の固有抵抗を高め、鉄損を低減する効果がある有用な元素である。このような効果を得るためには、Al含有量を0.005%以上とすることが好ましい。Al含有量は、より好ましくは0.010%以上であり、さらに好ましくは0.015%以上である。一方、Al含有量が3.0%を超えると、鋼板表面の窒化を助長し、磁気特性を劣化させることがあるため、Al含有量の上限は3.0%とした。Al含有量は、好ましくは2.0%以下である。

**【0030】**

N：0.0050%以下

Nは、微細析出物を形成して鉄損特性に悪影響を及ぼす元素である。特に、N含有量が0.0050%を超えると、その悪影響が顕著になるため、N含有量は0.0050%以下とする。N含有量は、好ましくは0.0030%以下である。なお、N含有量の下限は特に規定しないが、過度にNを低減した鋼板は非常に高価であることから、N含有量は0.0005%以上であることが好ましい。N含有量は、好ましくは0.0008%以上であり、また、好ましくは0.0030%以下である。

20

**【0031】**

Si + Al：4.5%未満

Si + Al (SiおよびAlの合計含有量)を4.5%未満とし、さらに適切な条件で冷間圧延を施すことにより、冷延焼鈍板の結晶粒径分布の尖度を下げる効果がある。これにより、疲労強度が上昇するとともに、歪取り焼鈍(熱処理)により粒成長させる場合に優れた低鉄損特性が期待できる。従って、Si + Alの値は4.5%未満とする。なお、Si + Alの値を4.5%未満とし、さらに適切な冷間圧延を組み合わせることにより結晶粒径分布の尖度が低下する理由は不明である。ただしこの点に関し、本発明者らは、冷間圧延時に活動する、 $\gamma$ 系のバランスが変化し、冷間圧延中のせん断ひずみ分布が最適化されることによって生じた効果であると推測している。

30

**【0032】**

一実施形態の電磁鋼板の成分組成において、上記成分以外の残部は、Feおよび不可避免的不純物である。ただし、別の実施形態の電磁鋼板の成分組成は、さらに要求特性に応じて、上記成分(元素)に加えて、後述する元素のうちから選ばれる1種または2種以上を所定量で含有することができる。

40

**【0033】**

Co：0.0005%以上0.0050%以下

Coには、Si + Alおよび冷間圧延条件の適切な制御により焼鈍板の結晶粒径分布の尖度が低下する作用を補強する効果がある。すなわち、Coの微量添加により、結晶粒径分布の尖度を安定的に低下させることができる。このような効果を得るためには、Co含有量を0.0005%以上とすればよい。一方、Coは、含有量が0.0050%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、Coを添加する場合には、Co含有量の上限を0.0050%とした。従って、上記成分組成は、さらに、Co：0.0005%以上0.0050%以下を含むことが好ましい。

**【0034】**

50

Cr : 0.05%以上5.00%以下

Crは、鋼の固有抵抗を高め、鉄損を低減する効果がある。このような効果を得るためには、Cr含有量を0.05%以上とすればよい。一方、Crは、含有量が5.00%を超えると、飽和磁束密度の低下に伴い磁束密度が顕著に低下するため、Crを添加する場合には、Cr含有量の上限を5.00%とした。従って、上記成分組成は、さらに、Cr : 0.05%以上5.00%以下を含むことが好ましい。

【0035】

Ca : 0.001%以上0.100%以下

Caは、硫化物としてSを固定し、鉄損低減に寄与する元素である。このような効果を得るためには、Ca含有量を0.001%以上とすればよい。一方、Caは、含有量が0.100%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、Caを添加する場合には、Ca含有量の上限を0.100%とした。

【0036】

Mg : 0.001%以上0.100%以下

Mgは、硫化物としてSを固定し、鉄損低減に寄与する元素である。このような効果を得るためには、Mg含有量を0.001%以上とすればよい。一方、Mgは、含有量が0.100%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、Mgを添加する場合には、Mg含有量の上限を0.100%とした。

【0037】

REM : 0.001%以上0.100%以下

REMは、硫化物としてSを固定し、鉄損低減に寄与する元素群である。このような効果を得るためには、REM含有量を0.001%以上とすればよい。一方、REMは、含有量が0.100%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、REMを添加する場合には、REM含有量の上限を0.100%とした。

【0038】

同様の観点で、上記成分組成は、さらに、Ca : 0.001%以上0.100%以下、Mg : 0.001%以上0.100%以下およびREM : 0.001%以上0.100%以下のいずれか1種または2種以上を含むことが好ましい。

【0039】

Sn : 0.001%以上0.200%以下

Snは、集合組織改善により磁束密度向上および鉄損低減に効果的な元素である。このような効果を得るためには、Snの含有量を0.001%以上とすればよい。一方、Snは、含有量が0.200%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、Snを添加する場合には、Sn含有量の上限を0.200%とした。

【0040】

Sb : 0.001%以上0.200%以下

Sbは、集合組織改善により磁束密度向上および鉄損低減に効果的な元素である。このような効果を得るためには、Sbの含有量を0.001%以上とすればよい。一方、Sbは、含有量が0.200%を超えると効果が飽和し、いたずらにコストの上昇を招くため、Sbを添加する場合には、Sb含有量の上限を0.200%とした。

【0041】

同様の観点で、上記成分組成は、さらに、Sn : 0.001%以上0.200%以下およびSb : 0.001%以上0.200%以下のいずれか1種または2種を含むことが好ましい。

【0042】

Cu : 0%以上0.5%以下

Cuは、鋼の靱性を向上させる元素であり、適宜、添加することができる。しかし、Cuは、含有量が0.5%を超えると効果が飽和するため、Cuを添加する場合には、Cu含有量の上限を0.5%とした。Cuを添加する場合には、Cu含有量は、より好ましくは0.01%以上であり、また、より好ましくは0.1%以下である。なお、Cu含有量は、0%であってもよい。

【0043】

10

20

30

40

50

Ni : 0%以上0.5%以下

Niは、鋼の靱性を向上させる元素であり、適宜、添加することができる。しかし、Niは、含有量が0.5%を超えると効果が飽和するため、Niを添加する場合には、Ni含有量の上限を0.5%とした。Niを添加する場合には、Ni含有量は、より好ましくは0.01%以上であり、また、より好ましくは0.1%以下である。なお、Ni含有量は、0%であってもよい。

【0044】

Ti : 0%以上0.005%以下

Tiは、微細な炭窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Tiは、含有量が0.005%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Tiを添加する場合には、Ti含有量の上限を0.005%とした。Ti含有量は、より好ましくは0.002%以下である。なお、Ti含有量は、0%であってもよい。

10

【0045】

Nb : 0%以上0.005%以下

Nbは、微細な炭窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Nbは、含有量が0.005%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Nbを添加する場合には、Nb含有量の上限を0.005%とした。Nb含有量は、より好ましくは0.002%以下である。なお、Nb含有量は、0%であってもよい。

20

【0046】

V : 0%以上0.010%以下

Vは、微細な炭窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Vは、含有量が0.010%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Vを添加する場合には、V含有量の上限を0.010%とした。V含有量は、より好ましくは0.005%以下である。なお、V含有量は、0%であってもよい。

【0047】

Ta : 0%以上0.002%以下

Taは、微細な炭窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Taは、含有量が0.002%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Taを添加する場合には、Ta含有量の上限を0.0020%とした。Ta含有量は、より好ましくは0.001%以下である。なお、Ta含有量は、0%であってもよい。

30

【0048】

B : 0%以上0.002%以下

Bは、微細な窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Bは、含有量が0.002%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Bを添加する場合には、B含有量の上限を0.002%とした。B含有量は、より好ましくは0.001%以下である。なお、B含有量は、0%であってもよい。

40

【0049】

Ga : 0%以上0.005%以下

Gaは、微細な窒化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Gaは、含有量が0.005%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Gaを添加する場合には、Ga含有量の上限を0.005%とした。Ga含有量は、より好ましくは0.002%以下である。なお、Ga含有量は、0%であってもよい。

【0050】

Pb : 0%以上0.002%以下

Pbは、微細なPb粒子を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度

50

を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Pbは、含有量が0.002%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Pbを添加する場合には、Pb含有量の上限を0.002%とした。Pb含有量は、より好ましくは0.001%以下である。なお、Pb含有量は、0%であってもよい。

【0051】

Zn：0%以上0.005%以下

Znは、微細介在物を増加させ鉄損を増加させる元素であり、特に、含有量が0.005%を超えると悪影響が顕著になる。よって、Znを添加する場合には、Zn含有量の上限を0.005%とした。Zn含有量は、より好ましくは0.003%以下である。なお、Zn含有量は、0%であってもよい。

10

【0052】

Mo：0%以上0.05%以下

Moは、微細炭化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Moは、含有量が0.05%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Moを添加する場合には、Mo含有量の上限を0.05%とした。Mo含有量は、より好ましくは0.02%以下である。なお、Mo含有量は、0%であってもよい。

【0053】

W：0%以上0.05%以下

Wは、微細炭化物を形成し、析出強化により鋼板強度を高めることを介して疲労強度を向上させるため、適宜、添加することができる。一方、Wは、含有量が0.05%を超えると、熱処理工程における粒成長性を劣化させ、鉄損の増加を招く。よって、Wを添加する場合には、W含有量の上限を0.05%とした。W含有量は、より好ましくは0.02%以下である。なお、W含有量は、0%であってもよい。

20

【0054】

Ge：0%以上0.05%以下

Geは、集合組織の改善により磁束密度の向上および鉄損低減に効果的な元素であるため、適宜、添加することができる。一方、Geは、含有量が0.05%を超えると効果が飽和するため、Geを添加する場合には、Ge含有量の上限を0.05%とした。Ge含有量は、より好ましくは0.002%以上であり、また、より好ましくは0.01%以下である。なお、Ge含有量は、0%であってもよい。

30

【0055】

As：0%以上0.05%以下

Asは、集合組織の改善により磁束密度の向上および鉄損低減に効果的な元素であるため、適宜、添加することができる。一方、Asは、含有量が0.05%を超えると効果が飽和するため、Asを添加する場合には、As含有量の上限を0.05%とした。As含有量は、より好ましくは0.002%以上であり、また、より好ましくは0.01%以下である。なお、As含有量は、0%であってもよい。

【0056】

以上の成分組成において、上記した成分以外の残部は、Feおよび不可避的不純物である。

40

【0057】

<第1の無方向性電磁鋼板のミクロ組織>

次に、本発明の第1の無方向性電磁鋼板におけるミクロ組織（結晶粒の態様）について説明する。かかる第1の無方向性電磁鋼板は、とりわけロータコアに適した材料である。

【0058】

（平均結晶粒径 $X_1$ ：50 $\mu\text{m}$ 以下）

本発明者らの検討によると、鋼板中の結晶粒が微細であることで疲労強度が向上することが判明した。すなわち、平均結晶粒径 $X_1$ が50 $\mu\text{m}$ 以下であれば、疲労強度がHEVまたはEVに適用するモータ（以下、HEV/EVモータという）のロータ用材料で必要とされる値を満足し得るため、第1の無方向性電磁鋼板においては、平均結晶粒径 $X_1$ を50

50

$\mu\text{m}$ 以下とした。ここで、疲労強度について、ロータ用材料で必要とされる値とは、500 MPa以上である。一方、平均結晶粒径 $X_1$ の下限は、特に規定しないが、過度に結晶粒径が微細であると鋼板の延性が低下し加工が難しくなることから、平均結晶粒径 $X_1$ は、1  $\mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。

【0059】

(結晶粒径分布の標準偏差 $S_1$ :式(1)を満足)

結晶粒径分布の標準偏差の値が平均結晶粒径に対して大きい場合には、繰り返し応力負荷時の応力集中が助長されるため、疲労強度が低下する。そこで、第1の無方向性電磁鋼板においては、疲労限がHEV/EVモータのロータ用材料で必要とされる上記値以上を満足するために、結晶粒径分布の標準偏差 $S_1$ が次式(1)：

$$S_1 / X_1 < 0.75 \dots (1)$$

を満たすようにした。また、第1の無方向性電磁鋼板は、結晶粒径分布の標準偏差 $S_1$ が次式(1')：

$$S_1 / X_1 < 0.70 \dots (1')$$

を満たすことが好ましい。

【0060】

(結晶粒径分布の尖度 $K_1$ :20.0以下)

本発明者らは、結晶粒径分布の尖度を制御することにより、疲労強度に優れた無方向性電磁鋼板となり、かつ歪取り焼鈍(熱処理)により粒成長させた場合に優れた低鉄損を実現できることを見出した。結晶粒径分布の尖度を、前述した結晶粒径分布の標準偏差 $S_1$ と同時に制御することによって、このような効果を得られる。

ここで、尖度とは、JIS Z 8101-1:2015における(標本)とがりに相当し、分布の裾の重さに関連する。JIS Z 8101-1:2015はISO 3534-1:2006に対応する。尖度が高い場合には、同じ標準偏差を有する分布であっても分布形状が正規分布である場合と比較して、極端に平均から外れた値が高確率で存在する分布であることを意味する。すなわち、本件明細書において尖度は、結晶粒径分布のばらつきに対して極端に粗大な結晶粒および/または極端に微細な結晶粒が存在する頻度についての指標となる。尖度が高い場合には極端に粗大な結晶粒および/または極端に微細な結晶粒の存在頻度が高い。極端に粗大な結晶粒や極端に微細な結晶粒が混在すると繰り返し応力負荷時に過度の応力集中とそれに起因する局所的な繰り返しひずみが生じ易いために、疲労特性を劣化させる。具体的には、結晶粒径分布の尖度 $K_1$ が20.0以下であれば、極端に粗大な結晶粒や極端に微細な結晶粒の存在頻度が十分小さく、打抜き疲労限がHEV/EVモータのロータ用材料で必要とされる上記値を満足するとともに、歪取り焼鈍後の低鉄損を実現できる。このため、第1の無方向性電磁鋼板においては、結晶粒径分布の尖度 $K_1$ を20.0以下とした。第1の無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の尖度 $K_1$ は、好ましくは15.0以下である。なお、上記尖度 $K_1$ の下限は、特に限定する必要はないが、本発明の手法を駆使して製造した場合においても通常0以上である。

なお、尖度 $K_1$ は、後述の実施例に記載する手順に従って求めることができ、正規分布の値を0に調整した公式を用いて算出した値である。

【0061】

<第2の無方向性電磁鋼板のミクロ組織>

上述のミクロ組織(結晶粒の態様)を有する第1の無方向性電磁鋼板は、後述の通り、熱処理を施して粒成長させた場合に、第2の無方向性電磁鋼板となり得る。そこで、次に、本発明の第2の無方向性電磁鋼板におけるミクロ組織(結晶粒の態様)について説明する。かかる第2の無方向性電磁鋼板はとりわけステータコアに適した無方向性電磁鋼板となる。

【0062】

(平均結晶粒径 $X_2$ :80  $\mu\text{m}$ 以上)

無方向性電磁鋼板の鉄損は平均結晶粒径に依存して変化する。ステータコアに適した第2の無方向性電磁鋼板においては、平均結晶粒径 $X_2$ を80  $\mu\text{m}$ 以上とした。これにより、

10

20

30

40

50

目標の鉄損特性 ( $W_{10/400} = 13.0$  (W/kg)) を達成できる。

【0063】

(結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  : 式(2) を満足)

結晶粒径分布の標準偏差の値が平均結晶粒径に対して大きい場合には、鉄損の低減に不利な過度に微細な結晶粒や過度に粗大な結晶粒が多数存在するため、鉄損が上昇する。そこで、第2の無方向性電磁鋼板においては、鉄損がHEV/EVモータのステータ用材料で必要とされる上記の目標値を示すために、結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  が次式(2) :

$$S_2 / X_2 < 0.75 \quad \dots (2)$$

を満たすようにすることとした。また、第2の無方向性電磁鋼板は、結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  が次式(2') :

$$S_2 / X_2 < 0.70 \quad \dots (2')$$

を満たすことが好ましい。

【0064】

(結晶粒径分布の尖度  $K_2$  : 3.00以下)

本発明者らは結晶粒径分布の尖度を制御することで、優れた低鉄損を実現できることを見出した。結晶粒径の尖度を、前述した結晶粒径分布の標準偏差  $S_2$  と同時に制御することによって、このような効果を得られる。上述の通り、本件明細書において尖度が高い場合には極端に粗大な結晶粒および/または極端に微細な結晶粒の存在頻度が高い。極端に粗大な結晶粒や極端に微細な結晶粒は渦電流損の増加を誘発し、鋼板全体としての鉄損特性を劣化させる。具体的には、結晶粒径分布の尖度  $K_2$  が3.00以下であれば、極端に粗大な結晶粒や極端に微細な結晶粒の存在頻度が十分小さく、鉄損がHEV/EVモータのステータ用材料で必要とされる良好値を示す。このため、第2の無方向性電磁鋼板においては、結晶粒径分布の尖度  $K_2$  を3.00以下とした。第2の無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の尖度  $K_2$  は、好ましくは2.50以下であり、より好ましくは2.00以下である。一方、上記尖度  $K_2$  の下限は、特に規定する必要はないが、本発明の手法を駆使して製造した場合においても通常0以上である。

なお、尖度  $K_2$  は、後述の実施例に記載する手順に従って求めることができ、正規分布の値を0に調整した公式を用いて算出した値である。

【0065】

<モータコア>

本発明のモータコアは、上記の第1の無方向性電磁鋼板、すなわち、平均結晶粒径  $X_1$  が50  $\mu\text{m}$ 以下であり、標準偏差  $S_1$  が  $[S_1 / X_1 < 0.75]$  を満たし、尖度  $K_1$  が20.0以下である無方向性電磁鋼板の積層体である、ロータコアと、上記の第2の無方向性電磁鋼板、すなわち、平均結晶粒径  $X_2$  が80  $\mu\text{m}$ 以上、標準偏差  $S_2$  が  $[S_2 / X_2 < 0.75]$  を満たし、尖度  $K_2$  が3.00以下である無方向性電磁鋼板の積層体である、ステータコアとからなる。該モータコアは、ロータコアは疲労強度が高く、かつステータコアは磁気特性に優れていることから、小型化かつ高出力化を容易に実現することができる。

【0066】

<無方向性電磁鋼板の製造方法>

次に、本発明の無方向性電磁鋼板の製造方法について説明する。

概略的には、上記成分組成を有する鋼素材を出発素材として、熱間圧延工程、任意の熱延板焼鈍工程、酸洗工程、冷間圧延工程、焼鈍工程を順次行う方法であり、これにより、上述した本発明の第1の無方向性電磁鋼板を得ることができる。また、前記第1の無方向性電磁鋼板に熱処理を施すことにより、上述した本発明の第2の無方向性電磁鋼板を得ることができる。本発明においては、鋼素材の成分組成、冷間圧延工程、および焼鈍工程の条件、ならびに熱処理工程の条件が所定の範囲内であれば、それ以外の条件は特に限定されない。なお、モータコアの製造方法に関しては、特に限定されず、通常公知の手法を用いることができる。

【0067】

(鋼素材

鋼素材は、無方向性電磁鋼板について既述した成分組成を有する鋼素材であれば、特に限定されない。

鋼素材の溶製方法としては、特に限定されず、転炉または電気炉等を用いた公知の溶製方法を採用できる。生産性等の問題から、溶製後に、連続鑄造法によりスラブ（鋼素材）とすることが好ましいが、造塊 - 分塊圧延法または薄スラブ連鑄法等の公知の鑄造方法によりスラブとしてもよい。

#### 【0068】

##### （熱間圧延工程）

熱間圧延工程は、上記成分組成を有する鋼素材に、熱間圧延を施すことにより、熱延板を得る工程である。熱間圧延工程は、上記成分組成を有する鋼素材を加熱し、熱間圧延を施して、所定寸法の熱延板が得られる工程であれば、特に限定されず、常用の熱間圧延工程を適用できる。

10

#### 【0069】

常用の熱間圧延工程としては、例えば、鋼素材を1000 以上1200 以下の温度に加熱し、加熱した鋼素材に、800 以上950 以下の仕上げ圧延出側温度で熱間圧延を施し、熱間圧延が終了した後、適正な圧延後冷却（例えば、450 以上950 以下の温度域を、20 / s 以上100 / s 以下の平均冷却速度で冷却する）を施して、400 以上700 以下の巻取温度で巻き取り、所定寸法形状の熱延板とする、熱間圧延工程が挙げられる。

#### 【0070】

##### （熱延板焼鈍工程）

熱延板焼鈍工程は、上記熱延板を加熱し高温保持することにより、熱延板を焼鈍する工程である。熱延板焼鈍工程は、特に限定されず、常用の熱延板焼鈍工程を適用できる。なお、この熱延板焼鈍工程は必須ではなく、省略することもできる。

20

#### 【0071】

##### （酸洗工程）

酸洗工程は、上記熱間圧延工程または任意の上記熱延板焼鈍工程の後の熱延板に、酸洗を施す工程である。酸洗工程は、酸洗後の鋼板に冷間圧延を施すことができる程度に酸洗できる工程であれば、特に限定されず、例えば塩酸または硫酸等を使用する常用の酸洗工程を適用できる。この酸洗工程は、上記熱延板焼鈍工程を行う場合には、当該熱延板焼鈍工程と同一ライン内で連続して実施してもよいし、別ラインで実施してもよい。

30

#### 【0072】

##### （冷間圧延工程）

冷間圧延工程は、上記酸洗が施された熱延板（酸洗板）に、冷間圧延を施す工程である。より詳細には、冷間圧延工程では、上記酸洗が施された熱延板に、最終パスのワークロール径  $D$  が150mm 以上、最終パスの圧下率  $r$  が15%以上、および最終パスのひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  が  $100 \text{ s}^{-1}$  以上  $1300 \text{ s}^{-1}$  以下の条件で冷間圧延を施して、冷延板を得る。なお、冷間圧延工程では、上記の冷間圧延条件を満たしている限り、必要に応じて中間焼鈍をほさんだ2回以上の冷間圧延により所定寸法の冷延板としてもよい。この場合の中間焼鈍の条件としては、特に限定されず、常用の中間焼鈍を適用できる。

#### 【0073】

##### [最終パスのワークロール径 $D$ : 150mm 以上]

冷間圧延工程において、最終パスのワークロール径  $D$  は150mm 以上とする。最終パスのワークロール径  $D$  を150mm 以上とした理由は、得られる第1の無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の尖度  $K_1$  を20.0以下とし、所望の鋼板組織を形成するためである。

40

最終パスのワークロール径  $D$  が150mm より小さい場合には、平面圧縮の状態から遠く隔たることになるため、ワークロール径が大きい場合に比較して結晶粒単位でのせん断ひずみの不均一性が増強される。このせん断ひずみの不均一性に起因して、続く焼鈍工程での再結晶核の核生成頻度が非常に高い領域と非常に低い領域とが一定量生成するため、焼鈍板の結晶粒径分布の尖度が大きくなる。

50

一方、最終パスのワークロール径  $D$  が  $150\text{mm}$  以上である場合には、後述する焼鈍工程後において結晶粒径分布の尖度  $K_1$  は  $20.0$  以下となる。その結果、所望の鋼板組織が得られる。

【0074】

最終パスのワークロール径  $D$  は、好ましくは  $170\text{mm}$  以上であり、より好ましくは  $200\text{mm}$  以上である。なお、最終パスのワークロール径  $D$  の上限は、特に限定されないが、過度にロール径が大きい場合には圧延荷重が増大するため、 $700\text{mm}$  以下であることが好ましい。

【0075】

[最終パスの圧下率  $r$  :  $15\%$  以上]

冷間圧延工程において、最終パスの圧下率  $r$  は  $15\%$  以上とする。最終パスの圧下率  $r$  を  $15\%$  以上とした理由は、一連の冷間圧延制御の効果を得て、所望の鋼板組織を形成するためである。

最終パスの圧下率  $r$  が  $15\%$  未満の場合には、圧下率が低すぎるために、焼鈍後の組織を制御するのが難しくなる。一方、最終パスの圧下率  $r$  が  $15\%$  以上である場合には、一連の冷間圧延制御の効果が発揮される。その結果、所望の鋼板組織が得られる。

【0076】

最終パスの圧下率  $r$  は、好ましくは  $20\%$  以上である。なお、最終パスの圧下率  $r$  の上限は、特に限定されないが、高すぎる圧下率は多大な装置能力を要求し、また冷延板の形状制御も難しくなることから、最終パスの圧下率  $r$  は通常  $50\%$  以下である。

【0077】

[最終パスのひずみ速度  $m$  :  $100\text{s}^{-1}$  以上  $1300\text{s}^{-1}$  以下]

冷間圧延工程において、最終パスのひずみ速度  $m$  は  $100\text{s}^{-1}$  以上  $1300\text{s}^{-1}$  以下とする。最終パスのひずみ速度  $m$  を  $100\text{s}^{-1}$  以上  $1300\text{s}^{-1}$  以下とした理由は、圧延中の破断を抑制しつつ、得られる第1の無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の尖度  $K_1$  を  $20.0$  以下とし、所望の鋼板組織を形成するためである。

最終パスのひずみ速度  $m$  が  $100\text{s}^{-1}$  未満である場合には、冷延板の結晶粒単位でのせん断ひずみの不均一性が增強され、続く焼鈍工程における核生成および粒成長の場所依存性が強調されるため、焼鈍板の結晶粒径分布の尖度  $K_1$  が大きくなる。この理由は必ずしも明確ではないが、発明者らはひずみ速度  $m$  が低いことにより流動応力が低下し、変形しやすい結晶方位の結晶粒にひずみが集中し易くなり、ひずみ分布が不均一化されるためと推測している。一方、最終パスのひずみ速度  $m$  が  $1300\text{s}^{-1}$  超である場合には、流動応力が過度に増大し、圧延中の脆性破断が生じ易くなる。

最終パスのひずみ速度  $m$  が  $100\text{s}^{-1}$  以上  $1300\text{s}^{-1}$  以下である場合には、圧延中の破断を抑制しつつ、後述する焼鈍工程後において結晶粒径分布の尖度  $K_1$  が  $20.0$  以下になる。その結果、所望の鋼板組織が得られる。

【0078】

最終パスのひずみ速度  $m$  は、好ましくは  $150\text{s}^{-1}$  以上であり、また、好ましくは  $1000\text{s}^{-1}$  以下である。

【0079】

なお、冷間圧延時の各パスにおけるひずみ速度  $m$  は、下記のEkelundの近似式を用いて導出した。

【数1】

$$\epsilon_m = \frac{v_R}{\sqrt{R'h_1}} \frac{2}{2-r} \cdot \sqrt{r}$$

ここで、 $v_R$  はロール周速度 ( $\text{mm/s}$ )、 $R'$  はロール半径 ( $\text{mm}$ )、 $h_1$  はロール入側板厚 ( $\text{mm}$ )、 $r$  は圧下率 (%) である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 8 0 】

## ( 焼鈍工程 )

焼鈍工程は、冷間圧延工程を経た冷延板に、焼鈍を施す工程である。より詳細には、焼鈍工程では、冷間圧延工程を経た冷延板を、500 から700 の平均昇温速度  $V_1$  が10 / s 以上の条件にて、700 以上850 以下の焼鈍温度  $T_2$  まで加熱したのち、冷却して、冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）を得る。なお、焼鈍工程の後には、表面に絶縁コーティングを施すことができる。コーティングの方法およびコーティングの種類としては、特に限定されず、常用の絶縁コーティング工程を適用できる。

## 【 0 0 8 1 】

[ 500 から700 の平均昇温速度  $V_1$  : 10 / s 以上 ]

焼鈍工程において500 から700 の平均昇温速度  $V_1$  は10 / s 以上とする。平均昇温速度  $V_1$  を10 / s 以上とした理由は、得られる無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が上記の式(1)を満たすようにし、所望の鋼板組織を形成するためである。

平均昇温速度  $V_1$  が10 / s 未満である場合には、過度の回復により再結晶核の生成頻度が低下し、再結晶核数の場所依存性が大きくなる。その結果、微細な結晶粒と粗大な結晶粒が混在することになり、結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が大きくなり、上記式(1)を満たさなくなる。

一方、平均昇温速度  $V_1$  が10 / s 以上である場合には、再結晶核の生成頻度が高く、再結晶核数の場所依存性が小さくなる。その結果、結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が小さくなり、上記式(1)を満たすようになる。

## 【 0 0 8 2 】

500 から700 の平均昇温速度  $V_1$  は、好ましくは20 / s 以上であり、より好ましくは50 / s 以上である。なお、平均昇温速度  $V_1$  の上限は、特に限定されないが、過度に昇温速度が高いと温度ムラを生じ易いことから平均昇温速度  $V_1$  は500 / s 以下であることが好ましい。

## 【 0 0 8 3 】

[ 焼鈍温度  $T_2$  : 700 以上850 以下 ]

焼鈍工程において、焼鈍温度  $T_2$  は700 以上850 以下とする。焼鈍温度  $T_2$  を700 以上850 以下とした理由は、次の通りである。

焼鈍温度  $T_2$  が700 未満である場合には、粒成長が抑制されることから再結晶核数の場所依存性が強調され、初期の不均一性を引きずった組織となる。このため、結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が大きくなる。一方、焼鈍温度  $T_2$  が700 以上である場合には、十分な粒成長が生じ結晶粒径分布の標準偏差  $S_1$  が上記の式(1)を満たすようにすることができ、所望の鋼板組織が得られる。焼鈍温度  $T_2$  は、好ましくは750 以上である。

一方、焼鈍温度  $T_2$  が850 超である場合には、再結晶粒が過度に成長し、平均結晶粒径  $X_1$  を50  $\mu\text{m}$  以下とすることができない。従って、焼鈍温度  $T_2$  は850 以下とする。焼鈍温度  $T_2$  は、好ましくは825 以下である。

## 【 0 0 8 4 】

焼鈍工程では、上記の焼鈍温度  $T_2$  まで加熱したのち冷却する。この冷却は、冷却ムラ防止の観点から、50 / s 以下の冷却速度にて行うことが好ましい。

## 【 0 0 8 5 】

## ( 熱処理工程 )

熱処理工程は、上記焼鈍工程を経た冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）に、熱処理を施す工程である。より詳細には、熱処理工程では、上記焼鈍工程を経た冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）を、750 以上900 以下の熱処理温度  $T_3$  まで加熱する。加熱後、冷却することにより、熱処理板（第2の無方向性電磁鋼板）を得ることができる。なお、熱処理工程は、通常は上記無方向性電磁鋼板を積層してなるステータコアに対して施すが、積層前の上記無方向性電磁鋼板に施した場合においても、同様の効果が得られる。

## 【 0 0 8 6 】

10

20

30

40

50

[ 熱処理温度  $T_3$  : 750 以上900 以下 ]

熱処理工程において熱処理温度  $T_3$  は750 以上900 以下とする。熱処理温度  $T_3$  を750 以上900 以下とした理由は、次の通りである。

熱処理温度  $T_3$  が750 未満である場合には、結晶粒成長が不十分となり、得られる第2の無方向性電磁鋼板における平均結晶粒径  $X_2$  を80  $\mu\text{m}$ 以上とすることができない。従って、熱処理温度  $T_3$  は750 以上とする。熱処理温度  $T_3$  は、好ましくは775 以上である。

一方、熱処理温度が900 超である場合には、粒成長の選択性が強調され、結晶粒径分布の歪度が過度に大きくなる。その結果として、得られる第2の無方向性電磁鋼板における結晶粒径分布の尖度  $K_2$  が3.00以下とならない。このため、熱処理温度  $T_3$  は900 以下とする。熱処理温度  $T_3$  は、好ましくは、875 以下である。

10

【0087】

以上の熱処理工程を施すことによって、上記の第2の無方向性電磁鋼板のミクロ組織、すなわち、平均結晶粒径  $X_2$  が80  $\mu\text{m}$ 以上であり、標準偏差  $S_2$  が[  $S_2 / X_2 < 0.75$  ]を満たし、尖度  $K_2$  が3.00以下である鋼板のミクロ組織となる。この組織変化は、該熱処理工程前の鋼板のミクロ組織に影響を受ける。つまり、熱処理工程を施して、標準偏差  $S_2$  が[  $S_2 / X_2 < 0.75$  ]を満たし、尖度  $K_2$  が3.00以下であるミクロ組織を得るには、該熱処理工程前の鋼板は、標準偏差  $S_1$  が[  $S_1 / X_1 < 0.75$  ]を満たし、尖度  $K_1$  が20.0以下である必要がある。

【実施例】

20

【0088】

以下に実施例を挙げて本発明を具体的に説明する。ただし、本発明はこれらに限定されない。

【0089】

< 冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）の製造 >

表1に示す成分組成を有する溶鋼を、通常公知の手法により溶製し、連続鑄造して厚み230mmのスラブ（鋼素材）とした。

【0090】

得られたスラブに、熱間圧延を施すことにより、板厚2.0mmの熱延板を得た。得られた熱延板に、公知の手法により熱延板焼鈍および酸洗を施し、次いで、表2に示す板厚まで冷間圧延を施し、冷延板を得た。

30

【0091】

得られた冷延板に、表2に示す条件で焼鈍を施し、次いで公知の手法によりコーティングを施し、冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）を得た。

【0092】

< 熱処理板（第2の無方向性電磁鋼板）の製造 >

得られた冷延焼鈍板に、表2に示す条件で熱処理を施し、熱処理板（第2の無方向性電磁鋼板）を得た。

【0093】

< モータコアの製造 >

冷延焼鈍板（第1の無方向性電磁鋼板）を積層してなるロータコアと、熱処理板（第2の無方向性電磁鋼板）を積層してなるステータコアとを、公知の手法を用いて組み合わせることにより、モータコアを得た。

40

【0094】

< 評価 >

（ミクロ組織の観察）

得られた冷延焼鈍板および熱処理板から組織観察用の試験片を採取した。次いで、採取した試験片を、圧延面（ND面）で、板厚の1/4に相当する位置が観察面となるように、化学研磨により減厚して鏡面化した。鏡面化した観察面に対し、電子線後方散乱回折（EBSD）測定を実施し、局所方位データを得た。このとき、冷延焼鈍板に対しては、ステップサ

50

イズ：2 μm、測定領域：4 mm<sup>2</sup>以上とし、熱処理板に対しては、ステップサイズ：10 μm、測定領域：100 mm<sup>2</sup>以上とした。測定領域の広さは、続く解析において結晶粒の数が5000個以上となるように適宜調整した。なお、測定は全域を1回のスキャンで行っても良いし、Combo Scan機能を利用して複数回のスキャン結果を結合しても良い。解析ソフト：OIM Analysis 8を用いて、得られた局所方位データの解析を行った。

【0095】

データ解析に先立ち、解析ソフトのPartition PropertiesにてFormula：GCI[&5.000,2,0.000,0,0,8.0,1,1,1.0,0;]>0.1の条件で粒平均データ点の選別を行い、解析に不適なデータ点を除外した。このとき、有効なデータ点は97%以上であった。

【0096】

以上のように調整したデータに対して、結晶粒界の定義として、Grain Tolerance Angleを5°、Minimum Grain Sizeを2、Minimum Anti Grain Sizeを2、Multiple Rows RequirementおよびAnti-Grain Multiple Rows Requirementは共にOFFとして、以下の解析を行なった。

前処理を施したデータに対して、Export Grain File機能を用いて結晶粒の情報を出力した。Grain File Type 2のGrain Size (Diameter in microns)を結晶粒径( $x_i$ )として用いた。得られたすべての結晶粒の情報に対して、下記式を用いて、平均結晶粒径、標準偏差および尖度をそれぞれ計算した。得られた平均結晶粒径、標準偏差および尖度は、冷延焼鈍板の場合、 $X_1$ 、 $S_1$ および $K_1$ であり、熱処理板の場合、 $X_2$ 、 $S_2$ および $K_2$ である。

【数2】

$$\text{平均結晶粒径 } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{標準偏差 } S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

$$\text{尖度 } K = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^4}{S^4} - 3 \frac{(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

上記式中、 $n$ は結晶粒の数、 $x_i$ は各結晶粒径データ( $i: 1, 2, \dots, n$ )である。

【0097】

(疲労特性の評価)

得られた冷延焼鈍板から、圧延方向を長手方向とした引張疲労試験片(JIS Z 2275:1978に準拠した1号試験片、 $b: 15\text{mm}$ 、 $R: 100\text{mm}$ と同じ形状)を採取し、疲労試験に供した。ここで、試験片の端面は機械加工により平滑に仕上げた。上記疲労試験は、試験温度：室温(25℃)、引張り-引張り(片振り)、応力比(=最小応力/最大応力)：0.1および周波数：20 Hzの条件で行い、繰り返し数 $10^7$ 回において疲労破断を起こさない最大応力を疲労限として測定した。なお、試験結果は、疲労限が500 MPa以上の場合に疲労特性に優れると評価した。

【0098】

10

20

30

40

50

(磁気特性の評価)

得られた熱処理板から、長さ方向を圧延方向および圧延直角方向とする、幅30mm、長さ280mmの磁気測定用試験片を採取し、JIS C 2550-1：2011に準拠し、エプスタイン法で熱処理板の鉄損W10/400を測定した。W10/400 13.0 (W/kg) の場合に鉄損特性が良いと評価した。

【0099】

上記の結果を表3に示す。

【0100】

【表1】

鋼種	成分組成 [質量%]																			備考										
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Si+Al	Co	Cr	Ca	Mg	REM	Sn	Sb	Cu	Ni	Ti	Nb		V	Ta	B	Ga	Pb	Zn	Mo	W	Ge	As
A	0.0011	2.9	1.35	0.015	0.0017	1.0	0.0018	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
B	0.0016	3.3	0.31	0.007	0.0007	0.4	0.0020	3.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
C	0.0027	2.5	0.92	0.020	0.0039	1.4	0.0028	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
D	0.0011	3.3	0.24	0.005	0.0027	0.5	0.0016	3.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
E	0.0028	3.1	1.08	0.016	0.0005	0.4	0.0022	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
F	0.0015	3.2	2.78	0.017	0.0016	0.7	0.0027	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
G	0.0034	3.7	0.88	0.013	0.0027	0.5	0.0029	4.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
H	0.0029	2.1	0.33	0.017	0.0021	2.3	0.0025	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
I	0.0012	3.9	0.59	0.007	0.0005	0.5	0.0019	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
J	0.0008	2.6	0.38	0.006	0.0024	1.3	0.0018	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
K	0.0061	2.1	0.31	0.006	0.0006	0.4	0.0014	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
L	0.0008	1.3	0.39	0.007	0.0023	1.3	0.0017	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	比較例
M	0.0008	1.9	0.38	0.006	0.0022	1.3	0.0020	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
N	0.0008	4.3	0.37	0.006	0.0025	0.1	0.0022	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
O	0.0012	3.9	0.02	0.003	0.0005	0.5	0.0017	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	比較例
P	0.0013	3.9	0.09	0.003	0.0005	0.5	0.0016	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
Q	0.0010	3.9	3.60	0.007	0.0005	0.5	0.0015	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
R	0.0014	3.9	5.30	0.006	0.0004	0.5	0.0016	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	比較例
T	0.0024	2.1	0.34	0.014	0.0024	0.003	0.0020	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
U	0.0022	2.1	0.33	0.018	0.0019	0.014	0.0026	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
V	0.0024	2.1	0.33	0.019	0.0025	2.3	0.0024	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
W	0.0029	2.1	0.34	0.013	0.0022	3.1	0.0028	5.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	比較例
X	0.0012	3.3	0.25	0.005	0.0029	1.3	0.0018	4.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
Y	0.0026	3.1	1.13	0.020	0.0006	0.4	0.0023	3.5	0.0009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
Z	0.0033	3.1	1.12	0.018	0.0006	0.4	0.0021	3.5	0.0046	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AA	0.0033	3.2	1.13	0.013	0.0004	0.4	0.0022	3.6	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AB	0.0021	3.1	1.11	0.019	0.0005	0.4	0.0019	3.5	-	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AC	0.0029	3.1	1.10	0.014	0.0006	0.4	0.0021	3.5	-	-	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AD	0.0030	3.0	1.04	0.019	0.0006	0.4	0.0025	3.4	-	-	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AE	0.0033	3.1	1.06	0.013	0.0006	0.4	0.0019	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例
AF	0.0026	3.2	1.09	0.019	0.0005	0.4	0.0023	3.6	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	適合例

注)下線部は発明範囲外であることを示す

10

20

30

40

50



【表 2】

表2

No.	鋼種	板厚 [mm]	冷間圧延工程				焼鈍工程		熱処理工程	備考
			最終パスの ワークロール径 D [mmφ]	最終パスの 圧下率 r [%]	最終パスの ひずみ速度 [s <sup>-1</sup> ]	圧延中の 破断	昇温速度 V <sub>1</sub> [°C/s]	焼鈍温度 T <sub>2</sub> [°C]	熱処理温度 T <sub>3</sub> [°C]	
1	A	0.25	210	32	470	-	78	770	820	発明例
2	B	0.25	244	22	250	-	59	780	810	発明例
3	C	0.25	209	22	830	-	109	750	870	発明例
4	D	0.25	249	20	540	-	107	790	800	発明例
5	E	0.25	261	21	280	-	77	810	830	発明例
6	F	0.25	263	21	690	-	119	800	870	発明例
7	G	0.25	258	21	830	-	118	790	780	発明例
8	H	0.25	253	23	620	-	74	780	850	発明例
9	I	0.25	214	24	660	-	82	760	820	発明例
10	J	0.25	258	31	620	-	80	770	810	発明例
11	K	0.25	238	22	250	-	57	780	810	発明例
12	L	0.25	257	31	620	-	83	770	810	比較例
13	M	0.25	258	31	620	-	81	770	810	発明例
14	N	0.25	263	31	620	-	83	770	810	発明例
15	Q	0.25	213	24	660	-	81	760	820	比較例
16	P	0.25	213	24	660	-	79	760	820	発明例
17	Q	0.25	217	24	660	-	78	760	820	発明例
18	R	0.25	219	24	660	-	79	760	820	比較例
19	T	0.25	251	23	620	-	76	780	850	発明例
20	U	0.25	258	23	620	-	75	780	850	発明例
21	V	0.25	251	23	620	-	76	780	850	発明例
22	W	0.25	252	23	620	-	72	780	850	比較例
23	X	0.25	249	20	540	-	84	790	800	比較例
24	Y	0.25	256	21	280	-	79	810	830	発明例
25	Z	0.25	262	21	280	-	79	810	830	発明例
26	AA	0.25	262	21	280	-	76	810	830	発明例
27	AB	0.25	259	21	280	-	77	810	830	発明例
28	AC	0.25	266	21	280	-	80	810	830	発明例
29	AD	0.25	259	21	280	-	75	810	830	発明例
30	AE	0.25	266	21	280	-	77	810	830	発明例
31	AF	0.25	263	21	280	-	74	810	830	発明例
32	A	0.25	<u>120</u>	32	470	-	74	770	820	比較例
33	A	0.25	165	32	470	-	81	770	820	発明例
34	A	0.25	184	32	470	-	74	770	820	発明例
35	A	0.25	206	<u>9</u>	470	-	76	770	820	比較例
36	A	0.25	207	18	470	-	76	770	820	発明例
37	C	0.25	205	32	<u>80</u>	-	113	750	870	比較例
38	C	0.25	204	22	130	-	109	750	870	発明例
39	C	0.25	212	22	1120	一部破断	108	750	870	発明例
40	C	0.25	204	22	<u>1450</u>	全量破断	-	-	-	比較例
41	C	0.25	213	22	830	-	<u>7</u>	750	870	比較例
42	C	0.25	207	22	830	-	28	750	870	発明例
43	C	0.25	214	22	830	-	41	750	870	発明例
44	F	0.25	259	21	690	-	120	<u>680</u>	870	比較例
45	F	0.25	266	21	690	-	123	730	870	発明例
46	F	0.25	257	21	690	-	117	840	870	発明例
47	F	0.25	264	21	690	-	113	<u>880</u>	870	比較例
48	G	0.25	252	21	830	-	119	790	720	比較例
49	G	0.25	252	21	830	-	118	790	770	発明例
50	G	0.25	253	21	830	-	123	790	880	発明例
51	G	0.25	252	21	830	-	117	790	920	比較例

注) 下線部は発明範囲外であることを示す

10

20

30

40

50

表2(続き)

No.	鋼種	板厚 [mm]	冷間圧延工程				焼鈍工程		熱処理工程	備考
			最終パスの ワークロール径 D [mmφ]	最終パスの 圧下率 r [%]	最終パスの ひずみ速度 [s <sup>-1</sup> ]	圧延中の 破断	昇温速度 V <sub>1</sub> [°C/s]	焼鈍温度 T <sub>2</sub> [°C]	熱処理温度 T <sub>3</sub> [°C]	
52	AG	0.25	260	21	280	-	74	810	830	発明例
53	AH	0.25	262	21	280	-	75	810	830	発明例
54	AI	0.25	258	21	280	-	79	810	830	発明例
55	AJ	0.25	258	21	280	-	80	810	830	発明例
56	AK	0.25	255	21	280	-	76	810	830	発明例
57	AL	0.25	263	21	280	-	77	810	830	発明例
58	AM	0.25	264	21	280	-	77	810	830	発明例
59	AN	0.25	249	20	540	-	107	790	800	発明例
60	AO	0.25	250	20	540	-	109	790	800	発明例
61	AP	0.25	244	20	540	-	109	790	800	発明例
62	AQ	0.25	250	20	540	-	110	790	800	発明例
63	AR	0.25	255	20	540	-	111	790	800	発明例
64	AS	0.25	255	20	540	-	107	790	800	発明例
65	AT	0.25	249	20	540	-	111	790	800	発明例
66	AU	0.25	244	20	540	-	108	790	800	発明例
67	AV	0.25	244	20	540	-	103	790	800	発明例
68	AW	0.25	248	20	540	-	104	790	800	発明例
69	AX	0.25	251	20	540	-	106	790	800	発明例
70	AY	0.25	254	20	540	-	108	790	800	発明例
71	AZ	0.25	245	20	540	-	109	790	800	発明例
72	BA	0.25	245	20	540	-	102	790	800	発明例
73	BB	0.25	245	20	540	-	110	790	800	発明例
74	BC	0.25	253	20	540	-	109	790	800	発明例
75	BD	0.25	243	20	540	-	104	790	800	発明例
76	BE	0.25	246	20	540	-	104	790	800	発明例
77	BF	0.25	249	20	540	-	106	790	800	発明例
78	BG	0.25	255	20	540	-	112	790	800	発明例
79	BH	0.25	252	20	540	-	112	790	800	発明例
80	BI	0.25	244	20	540	-	112	790	800	発明例
81	BJ	0.25	243	20	540	-	109	790	800	発明例
82	BK	0.25	250	20	540	-	111	790	800	発明例
83	BL	0.25	248	20	540	-	106	790	800	発明例
84	BM	0.25	245	20	540	-	110	790	800	発明例
85	BN	0.25	246	20	540	-	104	790	800	発明例
86	BO	0.25	243	20	540	-	104	790	800	発明例

注)下線部は発明範囲外であることを示す

【 0 1 0 2 】

10

20

30

40

50

【表 3】

表3

No.	鋼種	板厚 [mm]	冷延焼鈍板(第1の無方向性電磁鋼板)				熱処理板(第2の無方向性電磁鋼板)				疲労限 $\sigma_{max}$ (MPa)	鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)	備考
			平均結晶粒径 $X_1$	標準偏差 $S_1$	$S_1/X_1$	結晶粒径 分布の尖度 $K_1$	平均結晶粒径 $X_2$	標準偏差 $S_2$	$S_2/X_2$	結晶粒径 分布の尖度 $K_2$			
1	A	0.25	18	10.4	0.58	6.16	104	57	0.55	1.13	610	11.2	発明例
2	B	0.25	20	11.6	0.58	1.66	103	58	0.56	0.87	590	12.4	発明例
3	C	0.25	15	9.0	0.60	4.31	122	72	0.59	1.13	630	10.6	発明例
4	D	0.25	22	13.9	0.63	0.61	101	63	0.62	0.50	580	11.9	発明例
5	E	0.25	25	15.0	0.60	0.98	106	60	0.57	0.72	550	12.2	発明例
6	F	0.25	24	13.4	0.56	2.89	122	67	0.55	0.98	570	9.8	発明例
7	G	0.25	21	11.3	0.54	2.40	90	45	0.50	0.92	600	10.5	発明例
8	H	0.25	20	12.4	0.62	0.63	116	71	0.61	0.51	570	10.9	発明例
9	I	0.25	15	9.2	0.61	2.97	100	57	0.57	0.97	670	10.8	発明例
10	J	0.25	17	9.4	0.55	1.01	99	51	0.52	0.65	610	11.4	発明例
11	K	0.25	23	12.2	0.53	1.51	117	66	0.56	0.81	530	12.7	発明例
12	L	0.25	17	9.2	0.54	0.95	97	49	0.50	0.62	540	13.4	比較例
13	M	0.25	19	11.2	0.59	1.00	106	61	0.58	0.66	560	12.7	発明例
14	N	0.25	19	9.7	0.51	0.95	107	55	0.51	0.64	660	9.5	発明例
15	O	0.25	18	10.6	0.59	3.18	119	74	0.62	0.99	640	14.1	比較例
16	P	0.25	17	10.7	0.63	3.21	108	67	0.62	1.01	650	12.6	発明例
17	Q	0.25	17	10.0	0.59	2.70	109	63	0.58	0.90	660	11.9	発明例
18	R	0.25	18	11.0	0.61	2.90	116	73	0.63	1.05	660	13.5	比較例
19	T	0.25	23	15.2	0.66	0.59	131	93	0.71	0.49	530	13.0	発明例
20	U	0.25	20	12.8	0.64	0.66	115	71	0.62	0.49	540	13.0	発明例
21	V	0.25	23	15.0	0.65	0.66	128	88	0.69	0.49	550	12.1	発明例
22	W	0.25	20	11.8	0.59	0.67	115	66	0.57	0.48	570	13.3	比較例
23	X	0.25	23	13.3	0.58	0.60	103	59	0.57	0.47	480	13.6	比較例
24	Y	0.25	27	15.7	0.58	1.06	113	66	0.58	0.77	660	10.0	発明例
25	Z	0.25	25	16.5	0.66	0.90	105	65	0.62	0.72	690	9.8	発明例
26	AA	0.25	27	16.2	0.60	1.04	115	70	0.61	0.69	550	10.1	発明例
27	AB	0.25	28	17.6	0.63	0.93	116	74	0.64	0.78	540	10.1	発明例
28	AC	0.25	26	14.8	0.57	0.96	111	62	0.56	0.78	550	9.7	発明例
29	AD	0.25	29	17.7	0.61	1.01	122	79	0.65	0.78	530	9.8	発明例
30	AE	0.25	26	15.9	0.61	1.06	109	64	0.59	0.77	550	10.4	発明例
31	AF	0.25	29	17.7	0.61	0.91	123	80	0.65	0.78	540	9.6	発明例
32	A	0.25	20	11.0	0.55	<u>22.10</u>	113	63	0.56	<u>3.65</u>	470	13.7	比較例
33	A	0.25	18	9.7	0.54	17.20	104	53	0.51	2.71	520	12.4	発明例
34	A	0.25	18	11.2	0.62	15.70	104	61	0.59	2.23	510	12.4	発明例
35	A	0.25	17	15.0	<u>0.88</u>	<u>20.80</u>	101	83	<u>0.82</u>	<u>4.21</u>	430	13.5	比較例
36	A	0.25	18	12.8	0.71	15.40	103	73	0.71	1.32	520	12.2	発明例
37	C	0.25	14	8.5	0.61	<u>23.10</u>	119	70	0.59	<u>3.73</u>	460	14.2	比較例
38	C	0.25	14	8.0	0.57	16.30	115	62	0.54	2.53	500	12.2	発明例
39	C	0.25	14	8.0	0.57	4.12	114	60	0.53	1.10	710	10.4	発明例
40	C	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	比較例
41	C	0.25	14	11.8	<u>0.84</u>	4.26	114	98	<u>0.86</u>	1.11	470	13.6	比較例
42	C	0.25	16	11.8	0.74	4.10	135	99	0.73	1.17	500	12.3	発明例
43	C	0.25	14	10.1	0.72	4.31	121	87	0.72	1.12	530	12.2	発明例
44	F	0.25	17	13.8	<u>0.81</u>	2.90	137	111	0.81	0.94	490	14.5	比較例
45	F	0.25	15	11.0	0.73	2.79	118	87	0.74	1.02	520	11.9	発明例
46	F	0.25	41	23.3	0.57	2.76	131	77	0.59	0.97	510	10.2	発明例
47	F	0.25	<u>62</u>	35.9	0.58	2.83	115	62	0.54	0.98	420	10.0	比較例
48	G	0.25	23	11.7	0.51	2.60	<u>74</u>	38	0.52	0.83	590	14.8	比較例
49	G	0.25	21	11.6	0.55	2.54	86	44	0.51	0.83	600	12.1	発明例
50	G	0.25	21	10.7	0.51	2.56	129	62	0.48	2.43	600	10.3	発明例
51	G	0.25	21	10.3	0.49	2.16	141	65	0.46	<u>3.22</u>	600	14.2	比較例

注) 下線部は発明範囲外であることを示す

10

20

30

40

50

表3(続き)

No.	鋼種	板厚 [mm]	冷延焼鈍板(第1の無方向性電磁鋼板)				熱処理板(第2の無方向性電磁鋼板)				疲労限 $\sigma_{max}$ (MPa)	鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)	備考
			平均結晶粒径 $X_1$	標準偏差 $S_1$	$S_1/X_1$	結晶粒径 分布の尖度 $K_1$	平均結晶粒径 $X_2$	標準偏差 $S_2$	$S_2/X_2$	結晶粒径 分布の尖度 $K_2$			
52	AG	0.25	27	15.7	0.58	0.96	105	55.7	0.53	0.74	670	9.6	発明例
53	AH	0.25	25	15.0	0.60	1.02	113	66.7	0.59	0.70	560	9.8	発明例
54	AI	0.25	24	14.2	0.59	0.94	112	61.6	0.55	0.76	540	10.0	発明例
55	AJ	0.25	26	16.4	0.63	0.96	112	69.4	0.62	0.69	540	10.3	発明例
56	AK	0.25	27	15.7	0.58	1.02	112	66.1	0.59	0.69	550	9.5	発明例
57	AL	0.25	23	14.3	0.62	0.94	107	58.9	0.55	0.70	550	10.5	発明例
58	AM	0.25	24	14.4	0.60	1.03	105	62.0	0.59	0.74	550	9.6	発明例
59	AN	0.25	26	16.4	0.63	0.64	104	62.4	0.60	0.50	580	12.3	発明例
60	AO	0.25	24	15.1	0.63	0.58	104	68.6	0.66	0.45	570	11.7	発明例
61	AP	0.25	24	15.8	0.66	0.58	107	63.1	0.59	0.54	570	12.4	発明例
62	AQ	0.25	21	12.6	0.60	0.63	99	57.4	0.58	0.49	570	11.3	発明例
63	AR	0.25	22	14.5	0.66	0.61	86	49.9	0.58	0.51	620	12.5	発明例
64	AS	0.25	20	11.8	0.59	0.56	89	56.1	0.63	0.50	630	12.5	発明例
65	AT	0.25	21	12.8	0.61	0.65	88	51.0	0.58	0.51	620	12.6	発明例
66	AU	0.25	24	15.8	0.66	0.63	95	57.0	0.60	0.48	630	12.5	発明例
67	AV	0.25	21	13.9	0.66	0.57	88	58.1	0.66	0.52	640	12.5	発明例
68	AW	0.25	24	14.9	0.62	0.60	82	53.3	0.65	0.50	640	12.6	発明例
69	AX	0.25	20	11.8	0.59	0.63	82	53.3	0.65	0.49	630	12.6	発明例
70	AY	0.25	24	15.4	0.64	0.62	89	55.2	0.62	0.53	630	12.5	発明例
71	AZ	0.25	21	13.2	0.63	0.57	96	63.4	0.66	0.48	630	12.6	発明例
72	BA	0.25	22	15.0	0.68	0.62	95	61.8	0.65	0.52	640	12.4	発明例
73	BB	0.25	23	13.6	0.59	0.65	90	53.1	0.59	0.53	620	12.6	発明例
74	BC	0.25	24	15.4	0.64	0.60	86	53.3	0.62	0.52	620	12.7	発明例
75	BD	0.25	23	13.8	0.60	0.65	83	55.6	0.67	0.47	640	12.5	発明例
76	BE	0.25	20	13.2	0.66	0.59	94	60.2	0.64	0.51	640	12.5	発明例
77	BF	0.25	20	13.2	0.66	0.60	106	63.6	0.60	0.50	580	12.4	発明例
78	BG	0.25	21	14.3	0.68	0.62	106	70.0	0.66	0.54	570	12.6	発明例
79	BH	0.25	24	14.2	0.59	0.64	84	50.4	0.60	0.55	620	12.7	発明例
80	BI	0.25	23	14.0	0.61	0.63	96	63.4	0.66	0.53	620	12.5	発明例
81	BJ	0.25	22	13.6	0.62	0.63	93	53.9	0.58	0.55	620	12.5	発明例
82	BK	0.25	20	13.4	0.67	0.64	89	52.5	0.59	0.48	620	12.5	発明例
83	BL	0.25	22	14.5	0.66	0.59	94	55.5	0.59	0.53	580	9.8	発明例
84	BM	0.25	20	11.8	0.59	0.64	97	60.1	0.62	0.46	570	10.7	発明例
85	BN	0.25	22	14.7	0.67	0.60	108	64.8	0.60	0.51	590	10.3	発明例
86	BO	0.25	22	13.6	0.62	0.58	108	67.0	0.62	0.45	590	9.9	発明例

注) 下線部は発明範囲外であることを示す

## 【 0 1 0 3 】

表3の結果から、本発明に従う無方向性電磁鋼板は、いずれも、優れた疲労強度と優れた鉄損特性とを発揮できることがわかる。なお、本発明に従う冷延焼鈍板を積層してなるロータコアと、同熱処理板を積層してなるステータコアとを組み合わせて得た、モータコアは優れた疲労特性を有していた。

10

20

30

40

50

## 【要約】

ロータコアに適した良好な疲労特性を有する高強度無方向性電磁鋼板と、ステータコアに適した優れた磁気特性を有する無方向性電磁鋼板とを提供する。質量%で、C：0.01%以下、Si：2.0%以上4.5%未満、Mn：0.05%以上5.00%以下、P：0.1%以下、S：0.01%以下、Al：3.0%以下およびN：0.005%以下を含み、かつSi + Alが4.5%未満であり、残部がFeおよび不可避的不純物である成分組成を有し、鋼板中の結晶粒について、平均結晶粒径 $X_1$ が50  $\mu\text{m}$ 以下であり、結晶粒径分布の標準偏差 $S_1$ が所定式(1)を満たし、かつ、結晶粒径分布の尖度 $K_1$ が20.0以下である、無方向性電磁鋼板である。

10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- (51)国際特許分類 F I  
H 0 1 F 1/147(2006.01) H 0 1 F 1/147 1 7 5
- 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内
- (72)発明者 財前 善彰  
東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内
- (72)発明者 宮本 幸乃  
東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内
- 審査官 鈴木 葉子
- (56)参考文献 国際公開第 2 0 2 0 / 0 9 0 1 6 0 ( W O , A 1 )  
特開 2 0 1 9 - 2 6 8 9 1 ( J P , A )  
特開 2 0 0 2 - 1 8 0 2 1 3 ( J P , A )  
特開 2 0 1 8 - 1 7 8 1 9 7 ( J P , A )  
米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 3 7 3 3 4 0 ( U S , A 1 )
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
C 2 2 C 3 8 / 0 0 - 3 8 / 6 0  
C 2 1 D 8 / 1 2 , 9 / 4 6  
H 0 1 F 1 / 1 2 - 1 / 3 8 , 1 / 4 4