

明 細 書

発明の名称：電磁鋼板、積層コア及び回転電機

技術分野

[0001] 本発明は、電磁鋼板、積層コア及び回転電機に関する。本願は、2020年6月17日に、日本に出願された特願2020-104232号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

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

[0003] かしめ、溶接以外の接合方法としては、例えば、表面に接着能を有する絶縁被膜を有する電磁鋼板を積層して互いに接着させる方法が知られている。特許文献1、2には、被膜の対数減衰率のピーク温度を制御した電磁鋼板が開示されている。特許文献3には、接着層（絶縁被膜）の対数減衰率の最大値を制御した積層電磁鋼板が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2000-173816号公報

特許文献2：日本国特許第6037055号公報

特許文献3：日本国特許第6086098号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 近年、更なるモータの効率向上が要求されており、より一層のコア性能の向上が求められている。そのため、接着能を有する絶縁被膜を備える電磁鋼板の更なる性能向上が重要である。

[0006] 本発明は、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性と積層精度、硬化ムラの抑制による騒音低減、占積率と接着強度の両立といったそれぞれの観点の1つ以上でコア性能が向上した積層コアを製造できる電磁鋼板、前記電磁鋼板を用いた積層コア及び回転電機を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 本発明は、以下の構成を有する。

[1] 母材鋼板のいずれか一方又は両方の表面の少なくとも一部が、接着能を有する絶縁被膜により被覆され、前記絶縁被膜の25～100℃の温度範囲の対数減衰率が0.3以下である、電磁鋼板。

[2] 前記絶縁被膜の対数減衰率のピーク温度と硬化開始温度との差が80℃未満であり、かつ前記ピーク温度の対数減衰率と前記硬化開始温度の対数減衰率との差が0.1以上である、[1]に記載の電磁鋼板。

[3] 前記絶縁被膜の200～250℃の温度範囲の対数減衰率が0.9以下である、[1]又は[2]に記載の電磁鋼板。

[4] 母材鋼板のいずれか一方又は両方の表面の少なくとも一部が、接着能を有する絶縁被膜により被覆され、前記絶縁被膜の対数減衰率のピーク温度と硬化開始温度との差が80℃未満であり、かつ前記ピーク温度の対数減衰率と前記硬化開始温度の対数減衰率との差が0.1以上である、電磁鋼板。

[5] 前記絶縁被膜の200～250℃の温度範囲の対数減衰率が0.9以下である、[4]に記載の電磁鋼板。

[6] 母材鋼板のいずれか一方又は両方の表面の少なくとも一部が、接着能を有する絶縁被膜により被覆され、前記絶縁被膜の200～250℃の温度範囲の対数減衰率が0.9以下である、電磁鋼板。

[7] [1]～[6]のいずれかに記載の電磁鋼板が複数積層され、互いに接着されている、積層コア。

[8] [7]に記載の積層コアを備える回転電機。

発明の効果

[0008] 本発明は、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性と積層精度の向上、硬化ムラの

抑制による騒音低減、占積率と接着強度の両立といったそれぞれの観点の1つ以上でコア性能が向上した積層コアを製造できる電磁鋼板、前記電磁鋼板を用いた積層コア及び回転電機を提供することを目的とする。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]本発明の第1実施形態に係る積層コアを備えた回転電機の断面図である。

[図2]同積層コアの側面図である。

[図3]図2のA-A断面図である。

[図4]同積層コアを形成する素材の平面図である。

[図5]図4のB-B断面図である。

[図6]図5のC部の拡大図である。

[図7]同積層コアを製造するために用いられる製造装置の側面図である。

[図8]実施例1の絶縁被膜について測定された温度-対数減衰率曲線を示した図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、図面を参照し、本発明の一実施形態に係る積層コアと、この積層コアを備えた回転電機と、この積層コアを形成する素材について説明する。なお、本実施形態では、回転電機として電動機、具体的には交流電動機、より具体的には同期電動機、より一層具体的には永久磁石界磁型電動機を一例に挙げて説明する。この種の電動機は、例えば、電気自動車などに好適に採用される。

[0011] (回転電機10)

図1に示すように、回転電機10は、ステータ20と、ロータ30と、ケース50と、回転軸60と、を備える。ステータ20及びロータ30は、ケース50内に收容される。ステータ20は、ケース50内に固定される。

本実施形態では、回転電機10として、ロータ30がステータ20の径方向内側に位置するインナーロータ型を採用している。しかしながら、回転電機10として、ロータ30がステータ20の外側に位置するアウターロータ

型を採用してもよい。また、本実施形態では、回転電機 10 が、12 極 18 スロットの三相交流モータである。しかしながら、極数、スロット数、相数などは、適宜変更することができる。

回転電機 10 は、例えば、各相に実効値 10 A、周波数 100 Hz の励磁電流を印加することにより、回転数 1000 rpm で回転することができる。

[0012] ステータ 20 は、ステータ用接着積層コア（以下、ステータコア）21 と、図示しない巻線と、を備える。

ステータコア 21 は、環状のコアバック部 22 と、複数のティース部 23 と、を備える。以下では、ステータコア 21（又はコアバック部 22）の中心軸線 O 方向を軸方向と言い、ステータコア 21（又はコアバック部 22）の径方向（中心軸線 O に直交する方向）を径方向と言い、ステータコア 21（又はコアバック部 22）の周方向（中心軸線 O 回りに周回する方向）を周方向と言う。

[0013] コアバック部 22 は、ステータ 20 を軸方向から見た平面視において円環状に形成されている。

複数のティース部 23 は、コアバック部 22 の内周から径方向内側に向けて（径方向に沿ってコアバック部 22 の中心軸線 O に向けて）突出する。複数のティース部 23 は、周方向に同等の角度間隔をあけて配置されている。本実施形態では、中心軸線 O を中心とする中心角 20 度おきに 18 個のティース部 23 が設けられている。複数のティース部 23 は、互いに同等の形状でかつ同等の大きさに形成されている。よって、複数のティース部 23 は、互いに同じ厚み寸法を有している。

前記巻線は、ティース部 23 に巻回されている。前記巻線は、集中巻きされていてもよく、分布巻きされていてもよい。

[0014] ロータ 30 は、ステータ 20（ステータコア 21）に対して径方向の内側に配置されている。ロータ 30 は、ロータコア 31 と、複数の永久磁石 32 と、を備える。

ロータコア 31 は、ステータ 20 と同軸に配置される環状（円環状）に形成されている。ロータコア 31 内には、前記回転軸 60 が配置されている。回転軸 60 は、ロータコア 31 に固定されている。

複数の永久磁石 32 は、ロータコア 31 に固定されている。本実施形態では、2 つ 1 組の永久磁石 32 が 1 つの磁極を形成している。複数組の永久磁石 32 は、周方向に同等の角度間隔をあけて配置されている。本実施形態では、中心軸線 O を中心とする中心角 30 度おきに 12 組（全体では 24 個）の永久磁石 32 が設けられている。

[0015] 本実施形態では、永久磁石界磁型電動機として、埋込磁石型モータが採用されている。ロータコア 31 には、ロータコア 31 を軸方向に貫通する複数の貫通孔 33 が形成されている。複数の貫通孔 33 は、複数の永久磁石 32 の配置に対応して設けられている。各永久磁石 32 は、対応する貫通孔 33 内に配置された状態でロータコア 31 に固定されている。各永久磁石 32 のロータコア 31 への固定は、例えば永久磁石 32 の外面と貫通孔 33 の内面とを接着剤により接着すること等により、実現できる。なお、永久磁石界磁型電動機として、埋込磁石型に代えて表面磁石型モータを採用してもよい。

[0016] ステータコア 21 及びロータコア 31 は、いずれも積層コアである。例えばステータコア 21 は、図 2 に示すように、複数の電磁鋼板 40 が積層方向に積層されることで形成されている。

なお、ステータコア 21 及びロータコア 31 それぞれの積厚（中心軸線 O に沿った全長）は、例えば 50.0 mm とされる。ステータコア 21 の外径は、例えば 250.0 mm とされる。ステータコア 21 の内径は、例えば 165.0 mm とされる。ロータコア 31 の外径は、例えば 163.0 mm とされる。ロータコア 31 の内径は、例えば 30.0 mm とされる。ただし、これらの値は一例であり、ステータコア 21 の積厚、外径や内径、及びロータコア 31 の積厚、外径や内径は、これらの値のみに限られない。ここで、ステータコア 21 の内径は、ステータコア 21 におけるティース部 23 の先端部を基準とする。すなわち、ステータコア 21 の内径は、全てのティース

部23の先端部に内接する仮想円の直径である。

[0017] ステータコア21及びロータコア31を形成する各電磁鋼板40は、例えば、図4から図6に示すような素材1を打ち抜き加工すること等により形成される。素材1は、電磁鋼板40の母材となる鋼板（電磁鋼板）である。素材1としては、例えば、帯状の鋼板や切り板などが挙げられる。

積層コアの説明の途中ではあるが、以下では、この素材1について説明する。なお本明細書において、電磁鋼板40の母材となる帯状の鋼板を素材1という場合がある。素材1を打ち抜き加工して積層コアに用いられる形状にした鋼板を電磁鋼板40という場合がある。

[0018] （素材1）

素材1は、例えば、図7に示すコイル1Aに巻き取られた状態で取り扱われる。本実施形態では、素材1として、無方向性電磁鋼板を採用している。無方向性電磁鋼板としては、JIS C 2552：2014の無方向性電磁鋼帯を採用できる。しかしながら、素材1として、無方向性電磁鋼板に代えて方向性電磁鋼板を採用してもよい。この場合の方向性電磁鋼板としては、JIS C 2553：2019の方向性電磁鋼帯を採用できる。また、JIS C 2558：2015の無方向性薄電磁鋼帯や方向性薄電磁鋼帯を採用できる。

[0019] 素材1の平均板厚 t_0 の上下限値は、素材1が電磁鋼板40として用いられる場合も考慮して、例えば以下のように設定される。

素材1が薄くなるに連れて素材1の製造コストは増す。そのため、製造コストを考慮すると、素材1の平均板厚 t_0 の下限値は、0.10mm、好ましくは0.15mm、より好ましくは0.18mmとなる。

一方で素材1が厚すぎると、製造コストは良好になるが、素材1が電磁鋼板40として用いられた場合に、渦電流損が増加してコア鉄損が劣化する。そのため、コア鉄損と製造コストを考慮すると、素材1の平均板厚 t_0 の上限値は、0.65mm、好ましくは0.35mm、より好ましくは0.30mmとなる。

素材 1 の平均板厚 t_0 の上記範囲を満たすものとして、0.20 mm を例示できる。

[0020] なお、素材 1 の平均板厚 t_0 は、後述する母材鋼板 2 の厚さだけでなく、絶縁被膜 3 の厚さも含まれる。また、素材 1 の平均板厚 t_0 の測定方法は、例えば、以下の測定方法による。例えば、素材 1 がコイル 1 A の形状に巻き取られている場合、素材 1 の少なくとも一部を平板形状にほどく。平板形状にほどかれた素材 1 において、素材 1 の長手方向の所定の位置（例えば、素材 1 の長手方向の端縁から、素材 1 の全長の 10% 分の長さ、離れた位置）を選定する。この選定した位置において、素材 1 を、その幅方向に沿って 5 つの領域に区分する。これらの 5 つの領域の境界となる 4 か所において、素材 1 の板厚を測定する。4 か所の板厚の平均値を、素材 1 の平均板厚 t_0 とすることができる。

[0021] この素材 1 の平均板厚 t_0 についての上下限値は、電磁鋼板 40 としての平均板厚 t_0 の上下限値としても当然に採用可能である。なお、電磁鋼板 40 の平均板厚 t_0 の測定方法は、例えば、以下の測定方法による。例えば、積層コアの積厚を、周方向に同等の間隔をあけて 4 か所において（すなわち、中心軸線 O を中心とした 90 度おきに）測定する。測定した 4 か所の積厚それぞれを、積層されている電磁鋼板 40 の枚数で割って、1 枚当たりの板厚を算出する。4 か所の板厚の平均値を、電磁鋼板 40 の平均板厚 t_0 とすることができる。

[0022] 図 5 及び図 6 に示すように、素材 1 は、母材鋼板 2 と、絶縁被膜 3 と、を備えている。素材 1 は、帯状の母材鋼板 2 の両面が絶縁被膜 3 によって被覆されてなる。本実施形態では、素材 1 の大部分が母材鋼板 2 によって形成され、母材鋼板 2 の表面に、母材鋼板 2 よりも薄い絶縁被膜 3 が積層されている。

[0023] 母材鋼板 2 の化学組成は、以下に質量%単位で示すように、質量%で 2.5%～4.5%の Si を含有する。なお、化学組成をこの範囲とすることにより、素材 1（電磁鋼板 40）の降伏強度を、例えば、380 MPa 以上 5

40 MPa以下に設定することができる。

[0024] Si : 2.5%~4.5%

Al : 0.001%~3.0%

Mn : 0.05%~5.0%

残部 : Fe 及び不純物

[0025] 素材1が電磁鋼板40として用いられるときに、絶縁被膜3は、積層方向に隣り合う電磁鋼板40間での絶縁性能を発揮する。また本実施形態では、絶縁被膜3は、接着能を備えていて、積層方向に隣り合う電磁鋼板40を接着する。絶縁被膜3は、単層構成であってもよく、複層構成であってもよい。より具体的には、例えば、絶縁被膜3は、絶縁性能と接着能とを兼ね備えた単層構成であってもよく、絶縁性能に優れる下地絶縁被膜と、接着性能に優れる上地絶縁被膜とを含む複層構成であってもよい。

[0026] 絶縁被膜3が接着能を有しているかどうかは、例えば、以下の方法で確認できる。電磁鋼板40から、幅30mm×長さ60mmの長方形の電磁鋼板を2枚切り出し、互いの幅30mm×長さ10mmの先端部分同士を重ね合わせ、鋼板温度180℃、圧力10MPa、加圧時間1時間で接着してサンプルを作製する。その後、雰囲気温度25℃、引張速度3mm/分としてサンプルの剪断引張強度を測定し、接着面積で除した数値を接着強度(MPa)とする。得られた接着強度が2.5MPa以上であれば、絶縁被膜3が接着能を備えると判定できる。

[0027] 本実施形態では、絶縁被膜3は、母材鋼板2の両面を全面にわたって隙間なく覆っている。しかしながら、前述の絶縁性能や接着能が確保される範囲において、絶縁被膜3の一部の層が、母材鋼板2の両面を隙間なく覆ってなくてもよい。言い換えると、絶縁被膜3の一部の層は、母材鋼板2の表面に間欠的に設けられていてもよい。ただし、絶縁性能を確保するには、母材鋼板2の両面は全面が露出しないように絶縁被膜3によって覆われている必要がある。具体的には、絶縁被膜3が絶縁性能に優れる下地絶縁被膜を有さず、絶縁性能と接着能を兼ね備えた単層構成である場合は、絶縁被膜3は母

材鋼板 2 の全面にわたって隙間なく形成されている必要がある。これに対し、絶縁被膜 3 が、絶縁性能に優れる下地絶縁被膜と、接着能に優れる上地絶縁被膜とを含む複層構成である場合、下地絶縁被膜と上地絶縁被膜の両方を母材鋼板 2 の全面にわたって隙間なく形成する他に、下地絶縁被膜を母材鋼板の全面にわたって隙間なく形成し、上地絶縁被膜を間欠的に設けても、絶縁性能と接着能の両立が可能である。

[0028] 下地絶縁被膜を形成するコーティング組成物としては、特に限定されず、例えば、クロム酸含有処理剤、リン酸塩含有処理等の一般的な処理剤を使用できる。

[0029] 接着能を備える絶縁被膜は、後述の電磁鋼板用コーティング組成物が母材鋼板上に塗布されてなる。接着能を備える絶縁被膜は、例えば、絶縁性能と接着能を兼ね備えた単層構成の絶縁被膜や、下地絶縁被膜上に設けられる上地絶縁被膜である。接着能を備える絶縁被膜は、積層コア製造時の加熱圧着前においては、未硬化状態又は半硬化状態（B ステージ）であり、加熱圧着時の加熱によって硬化反応が進行して接着能が発現する。

[0030] 絶縁被膜 3 は、以下の 3 つの条件（1）～（3）のいずれか 1 つ以上を満たす。

条件（1）：25～100℃の温度範囲の対数減衰率が0.3以下である。

条件（2）：対数減衰率のピーク温度 T_1 （℃）と硬化開始温度 T_2 （℃）との差（ $T_1 - T_2$ ）が80℃未満であり、かつピーク温度の対数減衰率（ $\Delta 1$ ）と硬化開始温度の対数減衰率（ $\Delta 2$ ）との差（ $\Delta 1 - \Delta 2$ ）が0.1以上である。なお、ピーク温度 T_1 は、接着能に優れた絶縁被膜のガラス転移温度に対応しており、複層構成の場合も下地絶縁被膜にはほぼ影響されない。

条件（3）：200～250℃の温度範囲の対数減衰率が0.9以下である。

[0031] 条件（1）～（3）の対数減衰率は、ISO 12013-2 に従い、シリ

ンダーエッジの剛体振り子を用いた剛体振り子試験により、昇温速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ で測定される。対数減衰率を測定することにより、被膜の動的粘弾性を評価できる。対数減衰率は、市販の剛体振り子型物性試験器、例えばエー・アンド・ディ製 RPT-3000W を用いて測定することができる。対数減衰率の測定温度範囲は適宜設定することができ、例えば、室温 (25°C) から 300°C とすることができる。

[0032] 剛体振り子試験による測定では、被膜が軟らかいほど対数減衰率が大きくなる。条件 (1) は、絶縁被膜 3 のガラス領域に対応する $25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における特性を規定するものである。「 $25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲の対数減衰率が 0.3 以下である」とは、 $25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において対数減衰率が常に 0.3 以下になっていることを意味する。すなわち、 $25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における対数減衰率の最大値 $\Delta_{\text{max}}(1)$ が 0.3 以下であることを意味する。

[0033] $25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において対数減衰率が 0.3 以下であれば、この温度範囲における温度上昇による対数減衰率の変化が小さくなり、絶縁被膜 3 の軟化に伴うベタツキが生じにくい。そのため、電磁鋼板 40 の打ち抜き時の作業性に優れ、また電磁鋼板 40 の積層精度が高くなる。また、電磁鋼板 40 の積層精度の悪化によって引き起こされる騒音や電磁鋼板同士の接着強度の低下を抑制することができる。

$25 \sim 100^{\circ}\text{C}$ の温度範囲の対数減衰率は、0.25 以下が好ましく、0.2 以下がより好ましい。

[0034] 剛体振り子試験による対数減衰率の測定において、ガラス領域から昇温していくときに観測されるピーク温度は、被膜のガラス転移温度に対応している。条件 (2) は、絶縁被膜 3 のゴム領域に対応する、対数減衰率のピーク温度から硬化開始温度までの温度範囲における特性を規定するものである。対数減衰率のピーク温度と硬化開始温度との差 ($T_1 - T_2$) が 80°C 未満であり、かつピーク温度の対数減衰率と硬化開始温度の対数減衰率との差 ($\Delta_1 - \Delta_2$) が 0.1 以上であれば、電磁鋼板 40 同士の加熱圧着時にお

る絶縁被膜3の硬化速度が速く、硬化ムラが発生しにくい。これにより、複数の鋼板間で接着強度の差が生じにくく、コア内で剛性ムラが発生しにくくなることから、運転時の騒音が低減される。

[0035] 絶縁被膜3の硬化ムラが生じにくく、騒音低減効果が高い点から、差($T_1 - T_2$)の上限値は、好ましくは75℃、より好ましくは70℃である。急激な硬化に伴う絶縁被膜3のひび割れを抑制しやすい点では、差($T_1 - T_2$)の下限値は、好ましくは30℃、より好ましくは40℃である。

[0036] 絶縁被膜3の硬化ムラが生じにくく、騒音低減効果が高い点から、差($\Delta 1 - \Delta 2$)の下限値は、好ましくは0.1、より好ましくは0.2である。絶縁被膜3のひび割れを抑制しやすい点では、差($\Delta 1 - \Delta 2$)の上限値は、好ましくは0.5、より好ましくは0.4である。

[0037] なお、硬化によって接着能を発現する絶縁被膜の場合、剛体振り子試験で得られる温度-対数減衰率曲線には、ピーク温度以降の減少領域に、傾きの絶対値がゼロに向かって小さくなった後に再び大きくなる特異点(変曲点)が存在する。本発明では、この温度-対数減衰率曲線におけるピーク温度以降の減少領域の変曲点(対数減衰率が急激な減少に転じる点)に対応する温度を硬化開始温度 T_2 とする。

[0038] 対数減衰率のピーク温度 T_1 の下限値は、好ましくは100℃、より好ましくは110℃である。また、対数減衰率のピーク温度 T_1 の上限値は、好ましくは140℃、より好ましくは130℃である。

[0039] 硬化開始温度 T_2 の下限値は、好ましくは160℃、より好ましくは170℃である。また、硬化開始温度 T_2 の上限値は、好ましくは200℃、より好ましくは190℃である。

[0040] 条件(3)は、絶縁被膜3の硬化開始後の領域に対応する、200～250℃の温度範囲における特性を規定するものである。「200～250℃の温度範囲の対数減衰率が0.9以下である」とは、200～250℃の温度範囲において対数減衰率が常に0.9以下になっていることを意味する。すなわち、200～250℃の温度範囲における対数減衰率の最大値 Δ_{max} (2

）が0.9以下であることを意味する。

[0041] 200～250℃の温度範囲において、対数減衰率が0.9以下であれば、硬化後の絶縁被膜3が硬く、絶縁被膜3の板厚を薄くしても高い接着強度で電磁鋼板40同士が接着される。そのため、コアの占積率と電磁鋼板40同士の接着強度を両立できる。

200～250℃の温度範囲の対数減衰率は、0.85以下が好ましく、0.80以下がより好ましい。

[0042] 対数減衰率は、絶縁被膜3の形成に使用する電磁鋼板用コーティング組成物の種類、電磁鋼板用コーティング組成物の母材鋼板への焼き付け条件（温度、時間等）等によって制御できる。例えば、焼き付け温度を高くするほど対数減衰率は低くなる傾向がある。焼き付け時間を長くするほど対数減衰率は低くなる傾向がある。

[0043] 電磁鋼板用コーティング組成物としては、特に限定されず、例えば、エポキシ樹脂と、エポキシ樹脂硬化剤と、を含有する組成物が挙げられる。すなわち、接着能を備える絶縁被膜としては、エポキシ樹脂と、エポキシ樹脂硬化剤と、を含有する膜が、一例として挙げられる。

[0044] エポキシ樹脂としては、一般的なエポキシ樹脂が使用でき、具体的には、一分子中にエポキシ基を2個以上有するエポキシ樹脂であれば特に制限なく使用できる。このようなエポキシ樹脂としては、例えば、ビスフェノールA型エポキシ樹脂、ビスフェノールF型エポキシ樹脂、フェノールノボラック型エポキシ樹脂、クレゾールノボラック型エポキシ樹脂、脂環式エポキシ樹脂、グリシジルエステル型エポキシ樹脂、グリシジルアミン型エポキシ樹脂、ヒダントイン型エポキシ樹脂、イソシアヌレート型エポキシ樹脂、アクリル酸変性エポキシ樹脂（エポキシアクリレート）、リン含有エポキシ樹脂、及びこれらのハロゲン化物（臭素化エポキシ樹脂等）や水素添加物等が挙げられる。エポキシ樹脂としては、1種を単独で使用してもよく、2種以上を併用してもよい。

[0045] 電磁鋼板用コーティング組成物は、アクリル樹脂を含有してもよい。

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

[0046] アクリル樹脂は、アクリルモノマー以外の他のモノマーに由来する構成単位を有していてもよい。他のモノマーとしては、例えば、エチレン、プロピレン、スチレン等が挙げられる。他のモノマーとしては、1種を単独で使用してもよく、2種以上を併用してもよい。

[0047] アクリル樹脂を用いる場合、エポキシ樹脂にアクリル樹脂をグラフトさせたアクリル変性エポキシ樹脂として用いてもよい。電磁鋼板用コーティング組成物においては、アクリル樹脂を形成するモノマーとして含まれていてもよい。

[0048] エポキシ樹脂硬化剤としては、潜在性を持つ加熱硬化タイプのものが使用可能であり、例えば、芳香族ポリアミン、酸無水物、フェノール系硬化剤、ジシアンジアミド、三フッ化ホウ素-アミン錯体、有機酸ヒドラジッド等が挙げられる。芳香族ポリアミンとしては、例えば、メタフェニレンジアミン、ジアミノジフェニルメタン、ジアミノジフェニルスルホン等が挙げられる。フェノール系硬化剤としては、例えば、フェノールノボラック樹脂、クレゾールノボラック樹脂、ビスフェノールノボラック樹脂、トリアジン変性フェノールノボラック樹脂、フェノールレゾール樹脂等が挙げられる。なかでも、エポキシ樹脂硬化剤としては、フェノール系硬化剤が好ましく、フェノールレゾール樹脂がより好ましい。エポキシ樹脂硬化剤としては、1種を単独で使用してもよく、2種以上を併用してもよい。

- [0049] 電磁鋼板用コーティング組成物中のエポキシ樹脂硬化剤の含有量は、エポキシ樹脂 100 質量部に対して、5～35 質量部が好ましく、10～30 質量部がより好ましい。
- [0050] 電磁鋼板用コーティング組成物は、硬化促進剤（硬化触媒）、乳化剤、消泡剤等の添加剤が配合されていてもよい。添加剤としては、1 種のみを使用してもよく、2 種以上を併用してもよい。
- [0051] 絶縁被膜 3 は、例えば電磁鋼板用コーティング組成物を母材鋼板の表面に塗布して乾燥し、焼き付けることで形成できる。
- 焼き付ける際の到達温度の下限値は、好ましくは 120℃、より好ましくは 130℃、さらに好ましくは 150℃である。焼き付ける際の到達温度の上限値は、好ましくは 200℃、より好ましくは 190℃、さらに好ましくは 160℃である。
- 焼き付け時間の下限値は、好ましくは 20 秒、より好ましくは 30 秒である。焼き付け時間の上限値は、好ましくは 70 秒、より好ましくは 60 秒である。
- [0052] 焼付温度は、絶縁被膜 3 のガラス転移温度を T_g としたとき、 $T_g + 20^\circ\text{C} \sim T_g + 50^\circ\text{C}$ の範囲であることが好ましい。焼付温度が $T_g + 20^\circ\text{C} \sim T_g + 50^\circ\text{C}$ の範囲であれば、絶縁被膜 3 の 25～100℃の温度範囲の対数減衰率を 0.3 以下とすることができる。
- [0053] 焼き付ける際の昇温速度は $5^\circ\text{C}/\text{s} \sim 20^\circ\text{C}/\text{s}$ とすることが好ましい。昇温速度を $5^\circ\text{C}/\text{s} \sim 20^\circ\text{C}/\text{s}$ にすることで、絶縁被膜 3 の 25～100℃の温度範囲の対数減衰率を 0.3 以下とすることができる。
- [0054] 絶縁被膜 3 の平均厚み t_1 の上下限値は、素材 1 が電磁鋼板 40 として用いられる場合も考慮して、例えば以下のように設定される。
- 素材 1 が電磁鋼板 40 として用いられる場合において、絶縁被膜 3 の平均厚み t_1 （電磁鋼板 40（素材 1）片面あたりの厚さ）は、互いに積層される電磁鋼板 40 間での絶縁性能及び接着能を確保できるように調整する。
- [0055] 単層構成の絶縁被膜 3 の場合、絶縁被膜 3 の平均厚み t_1 （電磁鋼板 40

(素材1)片面あたりの厚さ)は、例えば、 $1.5\mu\text{m}$ 以上 $8.0\mu\text{m}$ 以下とすることができる。

複層構成の絶縁被膜3の場合、下地絶縁被膜の平均厚みは、例えば、 $0.3\mu\text{m}$ 以上 $1.2\mu\text{m}$ とすることができ、 $0.7\mu\text{m}$ 以上 $0.9\mu\text{m}$ 以下が好ましい。上地絶縁被膜の平均厚みは、例えば、 $1.5\mu\text{m}$ 以上 $8.0\mu\text{m}$ 以下とすることができる。

なお、素材1における絶縁被膜3の平均厚み t_1 の測定方法は、素材1の平均板厚 t_0 と同様の考え方で、複数箇所の絶縁被膜3の厚みを求め、それらの厚みの平均として求めることができる。

[0056] この素材1における絶縁被膜3の平均厚み t_1 についての上下限値は、電磁鋼板40における絶縁被膜3の平均厚み t_1 の上下限値としても当然に採用可能である。なお、電磁鋼板40における絶縁被膜3の平均厚み t_1 の測定方法は、例えば、以下の測定方法による。例えば、積層コアを形成する複数の電磁鋼板のうち、積層方向の最も外側に位置する電磁鋼板40(表面が積層方向に露出している電磁鋼板40)を選定する。選定した電磁鋼板40の表面において、径方向の所定の位置(例えば、電磁鋼板40における内周縁と外周縁との丁度中間(中央)の位置)を選定する。選定した位置において、電磁鋼板40の絶縁被膜3の厚みを、周方向に同等の間隔をあけて4か所において(すなわち、中心軸線Oを中心とした90度おきに)測定する。測定した4か所の厚みの平均値を、絶縁被膜3の平均厚み t_1 とすることができる。

なお、このように絶縁被膜3の平均厚み t_1 を、積層方向の最も外側に位置する電磁鋼板40において測定した理由は、絶縁被膜3の厚みが、電磁鋼板40の積層方向に沿った積層位置で殆ど変わらないように、絶縁被膜3が作り込まれているからである。

[0057] 以上のような素材1を打ち抜き加工することで電磁鋼板40が製造され、電磁鋼板40によって接着コア(ステータコア21やロータコア31)が製造される。

[0058] (積層コアの積層方法)

以下、積層コアの説明に戻る。ステータコア21を形成する複数の電磁鋼板40は、図3に示すように、絶縁被膜3を介して積層されている。

積層方向に隣り合う電磁鋼板40は、絶縁被膜3によって全面にわたって接着されている。言い換えると、電磁鋼板40において積層方向を向く面（以下、第1面という）は、全面にわたって接着領域41aとなっている。ただし、積層方向に隣り合う電磁鋼板40が、全面にわたって接着されていなくてもよい。言い換えると、電磁鋼板40の第1面において、接着領域41aと非接着領域（不図示）とが混在していてもよい。

[0059] 本実施形態では、ロータコア31を形成する方の複数の電磁鋼板は、図1に示すかしめ42（ダボ）によって互いに固定されている。しかしながら、ロータコア31を形成する複数の電磁鋼板も、ステータコア21と同様に絶縁被膜3により固定した積層構造を有してもよい。

また、ステータコア21やロータコア31などの積層コアは、いわゆる回し積みにより形成されていてもよい。

[0060] (積層コアの製造方法)

前記ステータコア21は、例えば、図7に示す製造装置100を用いて製造される。以下では、製造方法の説明にあたり、まず先に、積層コアの製造装置100（以下、単に製造装置100という）について説明する。

製造装置100では、コイル1A（フープ）から素材1を矢印F方向に向かって送り出しつつ、各ステージに配置された金型により複数回の打ち抜きを行って電磁鋼板40の形状に徐々に形成していく。そして、打ち抜いた電磁鋼板40を積層して昇温させながら加圧する。その結果、積層方向に隣り合う電磁鋼板40を絶縁被膜3によって接着させ（すなわち、絶縁被膜3のうちの接着領域41aに位置する部分に接着能を発揮させ）、接着が完了する。

[0061] 図7に示すように、製造装置100は、複数段の打ち抜きステーション110を備えている。打ち抜きステーション110は、二段であってもよく、

三段以上であってもよい。各段の打ち抜きステーション１１０は、素材１の下方に配置された雌金型１１１と、素材１の上方に配置された雄金型１１２とを備える。

- [0062] 製造装置１００は、さらに、最も下流の打ち抜きステーション１１０よりも下流位置に積層ステーション１４０を備える。この積層ステーション１４０は、加熱装置１４１と、外周打ち抜き雌金型１４２と、断熱部材１４３と、外周打ち抜き雄金型１４４と、スプリング１４５と、を備えている。

加熱装置１４１、外周打ち抜き雌金型１４２、断熱部材１４３は、素材１の下方に配置されている。一方、外周打ち抜き雄金型１４４及びスプリング１４５は、素材１の上方に配置されている。なお、符号２１は、ステータコアを示している。

- [0063] 以上説明の構成を有する製造装置１００において、まずコイル１Ａより素材１を図７の矢印Ｆ方向に順次送り出す。そして、この素材１に対し、複数段の打ち抜きステーション１１０による打ち抜き加工を順次行う。これら打ち抜き加工により、素材１に、図３に示したコアバック部２２と複数のティース部２３を有する電磁鋼板４０の形状を得る。ただし、この時点では完全には打ち抜かれていないので、矢印Ｆ方向に沿って次工程へと進む。

- [0064] そして最後に、素材１は積層ステーション１４０へと送り出され、外周打ち抜き雄金型１４４により打ち抜かれて精度良く、積層される。この積層の際、電磁鋼板４０はスプリング１４５により一定の加圧力を受ける。以上説明のような、打ち抜き工程、積層工程、を順次繰り返すことで、所定枚数の電磁鋼板４０を積み重ねることができる。さらに、このようにして電磁鋼板４０を積み重ねて形成された積層コアは、加熱装置１４１によって例えば温度２００℃まで加熱される。この加熱により、隣り合う電磁鋼板４０の絶縁被膜３同士が接着される。

なお、加熱装置１４１は、外周打ち抜き雌金型１４２に配置されていなくてもよい。すなわち、外周打ち抜き雌金型１４２で積層された電磁鋼板４０を接着させる前に、外周打ち抜き雌金型１４２外に取り出してもよい。この

場合、外周打ち抜き雌金型 1 4 2 に断熱部材 1 4 3 がなくてもよい。さらにこの場合、積み重ねられた接着前の電磁鋼板 4 0 を、図示されない治具で積層方向の両側から挟んで保持した上で、搬送したり加熱したりしてもよい。

以上の各工程により、ステータコア 2 1 が完成する。

[0065] 以上説明したように、本発明では、電磁鋼板の接着能を備える絶縁被膜が条件（１）～（３）のいずれか１つ以上を満たす。条件（１）により、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性や積層精度が向上し、また積層精度向上によって騒音の低減及び電磁鋼板同士の接着強度の向上といった効果も得られる。条件（２）により、硬化ムラの抑制による騒音の低減効果が得られる。条件（３）により、占積率と電磁鋼板同士の接着強度を両立できる。条件（１）～（３）をすべて満たせば、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性、電磁鋼板の積層精度、騒音低減、占積率、電磁鋼板同士の接着強度といったコア性能がいずれも向上した積層コアが得られる。

[0066] なお、本発明の技術的範囲は前記実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲において種々の変更を加えることが可能である。

ステータコアの形状は、前記実施形態で示した形態に限定されるものではない。具体的には、ステータコアの外径及び内径の寸法、積厚、スロット数、ティース部の周方向と径方向の寸法比率、ティース部とコアバック部との径方向の寸法比率、などは所望の回転電機の特성에依じて任意に設計可能である。

[0067] 前記実施形態におけるロータでは、２つ１組の永久磁石 3 2 が１つの磁極を形成しているが、本発明はこれに限られない。例えば、１つの永久磁石 3 2 が１つの磁極を形成していてもよく、３つ以上の永久磁石 3 2 が１つの磁極を形成していてもよい。

[0068] 前記実施形態では、回転電機として、永久磁石界磁型電動機を一例に挙げて説明したが、回転電機の構造は、以下に例示するようにこれに限られず、さらには以下に例示しない種々の公知の構造も採用可能である。

前記実施形態では、回転電機として、永久磁石界磁型電動機を一例に挙げて説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、回転電機がリラクタンس型電動機や電磁石界磁型電動機（巻線界磁型電動機）であってもよい。

前記実施形態では、交流電動機として、同期電動機を一例に挙げて説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、回転電機が誘導電動機であってもよい。

前記実施形態では、電動機として、交流電動機を一例に挙げて説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、回転電機が直流電動機であってもよい。

前記実施形態では、回転電機として、電動機を一例に挙げて説明したが、本発明はこれに限られない。例えば、回転電機が発電機であってもよい。

[0069] 前記実施形態では、本発明に係る積層コアをステータコアに適用した場合を例示したが、ロータコアに適用することも可能である。

積層コアを、回転電機に代えて変圧器に採用することも可能である。この場合、電磁鋼板として、無方向電磁鋼板を採用することに代えて、方向性電磁鋼板を採用することが好ましい。

[0070] その他、本発明の趣旨に逸脱しない範囲で、前記実施形態における構成要素を周知の構成要素に置き換えることは適宜可能であり、また、前記した変形例を適宜組み合わせてもよい。

実施例

[0071] 以下、実施例によって本発明を具体的に説明するが、本発明は以下の記載によっては限定されない。

[0072] [剛体振り子試験]

各例で製造した電磁鋼帯から縦50mm、横20mmの試験片を切り出した。前記試験片の絶縁被膜に対し、ISO12013-2に従って、シリンダーエッジの剛体振り子による剛体振り子試験を実施し、温度-対数減衰率曲線を得た。剛体振り子型物性試験機としては、エー・アンド・ディ製RPT-3000Wを用いた。昇温速度は10℃/秒、測定温度範囲は25～3

00℃とした。

[0073] [打ち抜き時の作業性]

各例で製造した電磁鋼帯から、図3に例示した形状で外径250.0mm、内径165.0mmの電磁鋼板を10枚打ち抜き、以下の評価基準に従って作業性を評価した。

(評価基準)

A：絶縁被膜の軟化に伴うベタツキが生じず、打ち抜きが容易であり、積層精度も高かった。

B：絶縁被膜の軟化に伴うベタツキが生じ、打ち抜きが困難であり、積層精度も悪かった。

[0074] [積層精度]

上記の[打ち抜き時の作業性]の試験で製造した電磁鋼板130枚を積層し、鋼板温度200℃、圧力10MPa、加圧時間1時間で接着して積層コアを作製した。得られた積層コアについて、幅方向に10箇所の積層板厚を測定し、その平均偏差により積層精度を評価した。積層板厚の平均偏差が1枚の電磁鋼板の板厚に対して1/2未満である場合を「優良」、1/2以上1未満である場合を「可」、1以上である場合を「不良」とした。

[0075] [打音テスト（騒音評価）]

上記の[打ち抜き時の作業性]の試験で製造した電磁鋼板130枚を積層し、鋼板温度200℃、圧力10MPa、加圧時間1時間で接着して積層コア（ステータコア）を作製した。

ステータコアのコアバック部の外周端部をインパクトハンマーによって半径方向に加振し、その加振源に対して軸方向に180°の方向におけるティース部の先端とコアバック部の中央部を測定点として、騒音振動のモーダル解析を行った。また、コアバック部の半径方向の中央部をインパクトハンマーによって軸方向に加振した場合についても、その加振源に対して軸方向に180°の方向におけるティース部の先端とコアバック部の中央部を測定点として、騒音振動のモーダル解析を行った。評価は以下の基準に従って行っ

た。数値が小さいほど騒音を抑制できることを意味する。下記の評価において1～4を合格とし、5を不合格とした。なお、「－」とあるのは測定されないことを示す。

- 1：振動ピークが1つないし2つのみ検出される。
- 2：振動ピークが数個検出される。
- 3：加振方向によっては10個以上の振動ピークが検出される。
- 4：主ピークはあるが、10個以上の振動ピークが検出される。
- 5：主ピークが無く、10個以上の振動ピークが検出される。

[0076] [占積率]

上記の[打ち抜き時の作業性]の試験で製造した電磁鋼板130枚を積層し、鋼板温度200℃、圧力10MPa、加圧時間1時間で接着して積層コアを作製した。得られた積層コアについて、下記式から占積率(%)を算出した。

$$\text{占積率}(\%) = M / (D \cdot h \cdot S) \times 100$$

ただし、Mは積層コアの質量(kg)、Dは母材鋼板の密度(kg/m³)、hは積層コアの平均高さ(m)、Sは平面視における電磁鋼板の面積(m²)を表す。電磁鋼板の面積Sは、積層する前の電磁鋼板をスキャナーにより画像として取り込み、画像解析をすることにより求めた。

[0077] [接着強度]

各例で製造した電磁鋼帯から、幅30mm×長さ60mmの長方形の電磁鋼板を2枚切り出し、互いの幅30mm×長さ10mmの先端部分同士を重ね合わせ、鋼板温度180℃、圧力10MPa、加圧時間1時間で接着してサンプルを作製した。雰囲気温度25℃、引張速度3mm/分として剪断引張強度を測定し、接着面積で除した数値を接着強度(MPa)とした。接着強度が2.5MPa以上を合格とした。

[0078] [例1]

母材鋼板として、質量%で、Si：3.0%、Mn：0.2%、Al：0.5%、残部がFe及び不純物からなる板厚0.25mm、幅300mmの

帯状の無方向性電磁鋼板を用いた。母材鋼板の表面に、非クロム系の下地処理剤を用いて塗布量が 1.0 g/m^2 となるように下地処理を施し、下地絶縁被膜を形成した。

[0079] 液状のビスフェノールF型エポキシ樹脂100質量部と、エポキシ樹脂硬化剤として液状のフェノールレゾール樹脂の25質量部とを混合して電磁鋼板用コーティング組成物を調製した。得られた電磁鋼板用コーティング組成物を前記下地絶縁被膜上に塗布量が 1.0 g/m^2 となるように塗布し、昇温速度 10°C/min で 160°C まで温度を上げ、その後 160°C で60秒間焼き付けて上地絶縁被膜を形成して電磁鋼帯を得た。形成された複層構成の絶縁被膜に対し、剛体振り子試験により対数減衰率を測定した結果を図8に示す。

[0080] [例2～9]

焼き付ける際の昇温速度、焼き付け温度（焼き付ける際の到達温度）を表1に示すとおりに変更した以外は、例1と同様にして電磁鋼帯を得た。

[0081] 各例における製造時の電磁鋼板用コーティング組成物の焼き付け温度、絶縁被膜に対する剛体振り子試験の測定結果、及び評価結果を表1に示す。なお、表1において、「差（ $T_1 - T_2$ ）」は、対数減衰率のピーク温度（ T_1 ）と硬化開始温度（ T_2 ）との差（ $^\circ\text{C}$ ）を示す。表1中の焼付温度と T_g との差（ $^\circ\text{C}$ ）における T_g はピーク温度（ T_1 ）（ $^\circ\text{C}$ ）である。「差（ $\Delta 1 - \Delta 2$ ）」は、ピーク温度の対数減衰率（ $\Delta 1$ ）と硬化開始温度の対数減衰率（ $\Delta 2$ ）との差を示す。 $\Delta_{\max}(1)$ は、 $25 \sim 100^\circ\text{C}$ の温度範囲における対数減衰率の最大値を意味する。 $\Delta_{\max}(2)$ は、 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ の温度範囲における対数減衰率の最大値を意味する。

[0082]

[表1]

	例1	例2	例3	例4	例5	例6	例7	例8	例9
昇温速度 (°C/s)	10	10	10	5	10	10	10	3	25
焼付温度とTgとの差 (°C)	35	20	14	85	10	25	85	40	40
焼き付け温度 [°C]	160	150	140	200	120	140	210	160	160
$\Delta_{\max}(1)$	0.1	0.2	0.8	0.2	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6
ピーク温度 (T1) [°C]	125	130	126	115	110	115	125	110	115
硬化開始温度 (T2) [°C]	180	178	179	198	209	175	180	193	199
差 (T1-T2) [°C]	55	48	53	83	99	60	55	83	84
T1の対数減衰率 ($\Delta 1$)	1.4	1.6	1.5	1.25	1.26	1.6	1.5	1.4	1.3
T2の対数減衰率 ($\Delta 2$)	1	1.1	1	1.21	1.2	1.3	1.2	1.32	1.24
差 ($\Delta 1 - \Delta 2$)	0.4	0.5	0.5	0.04	0.06	0.3	0.3	0.08	0.06
$\Delta_{\max}(2)$	0.85	0.8	1.1	1	0.85	0.8	1.0	1.0	1.1
打ち抜き時の作業性	A	A	B	A	B	B	A	B	B
積層精度	優良	可	不良	可	可	可	優良	不良	不良
打音テスト(騒音評価)	1	1	2	3	1	1	1	5	5
占積率 [%]	98.3	98.7	96.5	97.9	98.5	98.4	98.1	97.7	97.8
接着強度 [MPa]	6.3	7.2	5.5	5.2	3.5	5.8	6.1	1.8	2.2

[0083] 接着強度が2.5 MPa以上を合格とした。表1に示すように、 $\Delta_{\max}(1)$ が0.3以下である例1、2は、 $\Delta_{\max}(1)$ が0.3超である例3に比べて、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性に優れ、積層精度が高く、また積層コアの騒音が低減されており、電磁鋼板同士の接着強度も高かった。また、 $\Delta_{\max}$

(2) が 0.9 以下である例 1、2 は、 $\Delta_{max}(2)$ が 0.9 を超える例 3 に比べて、積層コアの占積率及び電磁鋼板同士の接着強度の点でコア性能が向上した。 $\Delta_{max}(1)$ が 0.3 以下の例 4 は、打ち抜き時の作業性に優れ、接着強度に優れていた。 $\Delta_{max}(2)$ が 0.9 以下である例 5 は、占積率および接着強度が優れていた。差 ($T1 - T2$) が 80℃未満であり、差 ($\Delta T1 - \Delta T2$) が 0.1 以上であり、かつ、 $\Delta_{max}(2)$ が 0.9 以下である例 6 は、打音テスト、占積率、接着強度に優れていた。 $\Delta_{max}(1)$ が 0.3 以下であり、差 ($T1 - T2$) が 80℃未満であり、差 ($\Delta T1 - \Delta T2$) が 0.1 以上である例 7 は、積層精度、打音テスト、接着強度に優れていた。昇温速度が 3℃/s の例 8 は、本発明のいずれの要件も満足せず、接着強度も 2.5 MPa を満足しなかった。昇温速度が 25℃/s の例 9 は、本発明のいずれの要件も満足せず、接着強度も 2.5 MPa を満足しなかった。

産業上の利用可能性

[0084] 本発明によれば、電磁鋼板の打ち抜き時の作業性と積層精度の向上、硬化ムラの抑制による騒音低減、占積率と接着強度の両立といったそれぞれの観点の 1 つ以上でコア性能が向上した積層コアを製造できる。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0085] 1…素材、2…母材鋼板、3…絶縁被膜、10…回転電機、20…ステータ、21…ステータコア、40…電磁鋼板。