

明 細 書

発明の名称：

電磁鋼板用コーティング組成物、電磁鋼板、積層コア及び回転電機

技術分野

[0001] 本発明は、電磁鋼板用コーティング組成物、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2020-104235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、加工時の機械歪や熱歪によって電磁鋼板の磁気特性（コア鉄損）が劣化しやすい。

[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が形成された電磁鋼板を互いに接着させる方法が知られている（特許文献1）。前記絶縁被膜を用いた接着は機械歪や熱歪を与えないため、かしめや溶接に比べてコア鉄損に優れる。エポキシ樹脂は、体積変化が少なく、耐熱性や耐油性、耐薬品性に優れており、電磁鋼板同士を接着する接着剤として優れている（特許文献2、3）。

先行技術文献

特許文献

- [0004] 特許文献1：日本国特開2017-011863号公報
特許文献2：日本国特開2000-173816号公報
特許文献3：国際公開第2004/070080号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 近年、モータ効率の更なる向上の要請を受け、より一層のコア鉄損の低減

が求められている。コア鉄損の低減には、電磁鋼板の薄手化が有力である。しかし、鋼板は板厚の減少に伴ってヤング率が低下するため、鉄損劣化の原因となる応力歪が鋼板に付与されないことが求められる。エポキシ樹脂は、耐熱性に優れるが、硬く靱性が低いことから、接着時の硬化によって鋼板に応力歪が付与されるため、鋼板が薄くなると鉄損劣化の原因となる。

また、電気自動車の駆動モータ等では、駆動中に高温になるため、さらなる耐熱性が求められる。

[0006] 耐熱性を向上させる手法としては、フェノール樹脂を配合する方法がある。しかし、耐熱性に優れた樹脂は常温では硬く積層コアに大きな応力を付与するため、磁気特性が劣化させる。一方、常温付近で適切な硬さの樹脂は、高温では柔らかくなるため、耐熱性に劣る。これらのことから、優れた磁気特性と、駆動時に高温に曝された状態でも十分な接着強度を保持できる優れた耐熱性とを両立することは難しい。

[0007] 本発明は、積層コアの磁気特性と、駆動時の高温状態でも電磁鋼板同士の接着強度を保持できる耐熱性とを両立できる電磁鋼板用コーティング組成物、それを用いた電磁鋼板、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

[0008] 本発明は、以下の態様を有する。

[1] 本発明の一態様に係る電磁鋼板用コーティング組成物は、エポキシ樹脂と、アルキルフェノールからなる第1硬化剤と、フェノールレゾール樹脂及びフェノールノボラック樹脂のいずれか一方又は両方からなる第2硬化剤と、を含有し、前記第1硬化剤の含有量が、前記エポキシ樹脂100質量部に対して、1.0質量部以上20.0質量部以下である。

[2] 上記[1]に記載の電磁鋼板用コーティング組成物は、前記アルキルフェノールが、アルキル基の炭素原子数が2～20であるモノアルキルフェノール、及びアルキル基の炭素原子数が2～20であるジアルキルフェノールのいずれか一方又は両方を含んでもよい。

〔３〕上記〔１〕又は〔２〕に記載の電磁鋼板用コーティング組成物は、前記第２硬化剤の含有量が、エポキシ樹脂１００質量部に対して、５．０質量部以上１５０．０質量部以下であってもよい。

〔４〕上記〔１〕～〔３〕のいずれかに記載の電磁鋼板用コーティング組成物は、硬化収縮率が１５％以下であってもよい。

〔５〕上記〔１〕～〔４〕のいずれかに記載の電磁鋼板用コーティング組成物は、〔前記第１硬化剤（Ａ）の含有量〕／〔前記第２硬化剤（Ｂ）の含有量〕で表される質量比が０．０１～４．０であってもよい。

〔６〕本発明の一態様に係る電磁鋼板は、上記〔１〕～〔５〕のいずれかに記載の電磁鋼板用コーティング組成物を含む絶縁被膜を表面に有する。

〔７〕本発明の一態様に係る積層コアは、上記〔６〕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。

〔８〕本発明の一態様に係る回転電機は、上記〔７〕に記載の積層コアを備える。

発明の効果

〔０００９〕 本発明に係る上記態様によれば、積層コアの磁気特性と、駆動時の高温状態でも電磁鋼板同士の接着強度を保持できる耐熱性とを両立できる電磁鋼板用コーティング組成物、それを用いた電磁鋼板、積層コア及び回転電機を提供することができる。

図面の簡単な説明

〔００１０〕〔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〕図１に示す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〕図１に示す積層コアを形成するための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〕図１に示す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。

発明を実施するための形態

[0011] 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。

[0012] また、以下に「～」を挟んで記載する数値限定範囲には、下限値および上限値がその範囲に含まれる。「未満」または「超」と示す数値には、その値が数値範囲に含まれない。

[0013] (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。

[0014] 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。

[0015] 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よく、分布巻きされていてよい。

[0016] 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。

[0017] 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。

[0018] 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。

[0019] 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。

[0020] 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。

[0021] (素材 1)

素材 1 は、例えば、図 7 に示すコイル 1 A 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 の無方向性電磁鋼板を採用できる。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 の方向性電磁鋼板を採用できる。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。

[0022] 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、0.10 mm、好ましくは 0.15 mm、より好ましくは 0.18 mm 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、0.65 mm、好ましくは 0.35 mm、より好ましくは 0.30 mm 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。

[0023] 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。

[0024] 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。

[0025] 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。

[0026] 母材鋼板2の化学組成は、以下に示すように、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、380MPa以上540MPa以下に設定することができる。

[0027] Si : 2.5%~4.5%
Al : 0.001%~3.0%
Mn : 0.05%~5.0%
残部 : Fe及び不純物

[0028] 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。なお、本実施形態における「絶縁被膜 3 の接着能」とは、絶縁被膜 3 を挟んで積層された複数の電磁鋼板 40 からなる積層体において、所定の温度条件下で所定値以上の接着強度を発現することが可能な能力を意味する。

[0029] 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 の一部の層は、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 の一部の層が、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て、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。

[0030] 下地絶縁被膜を構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。

[0031] 接着能を備える絶縁被膜 3 は、エポキシ樹脂と、第 1 硬化剤 (A) と、第 2 硬化剤 (B) とを含有する電磁鋼板用コーティング組成物が塗布されてなる。

電磁鋼板用コーティング組成物からなる絶縁被膜は、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。電磁鋼板用コーティング組成物は、単層構成の絶縁被膜の形成に用いてもよく、下地絶縁被膜上に設ける上地絶縁被膜の形成に用いてもよい。

[0032] 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、トリフェニルメタン型エポキシ樹脂、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。

[0033] エポキシ樹脂の含有量は、電磁鋼板用コーティング組成物の総質量に対して、例えば、30～90質量%が好ましく、40～80質量%がより好ましく、50～70質量%がさらに好ましい。エポキシ樹脂の含有量が上記下限値以上であると、電磁鋼板40の接着強度をより高められる。エポキシ樹脂の含有量が上記上限値以下であると、電磁鋼板40の応力歪みをより抑制できる。

[0034] 第1硬化剤は、アルキルフェノールからなる。

アルキルフェノールとしては、特に限定されず、例えば、クレゾール（o-クレゾール等）、エチルフェノール（o-エチルフェノール等）、プロピルフェノール（p-プロピルフェノール、p-イソプロピルフェノール等）、ブチルフェノール（p-ブチルフェノール、p-sec-ブチルフェノール等）、ノニルフェノール（p-ノニルフェノール等）、ドデシルフェノール（p-ドデシルフェノール等）、ジメチルフェノール（2,3-ジメチル

フェノール等)、ジエチルフェノール(2, 3-ジエチルフェノール等)、ジブチルフェノール(2, 6-ジブチルフェノール等)、トリメチルフェノール(2, 3, 4-トリメチルフェノール等)等が挙げられる。アルキルフェノールとしては、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。

- [0035] 磁気特性と耐熱性を両立しやすい点から、アルキルフェノールとしては、アルキル基の炭素原子数が2~20であるモノアルキルフェノール、及びアルキル基の炭素原子数が2~20であるジアルキルフェノールのいずれか一方又は両方を含むことが好ましい。

モノアルキルフェノールのアルキル基の炭素原子数は、3~16がより好ましく、4~12がさらに好ましい。

ジアルキルフェノールの2つのアルキル基の炭素原子数はそれぞれ独立に、3~20がより好ましく、4~12がさらに好ましい。

- [0036] 電磁鋼板用コーティング組成物中の第1硬化剤(A)の含有量は、エポキシ樹脂100質量部に対して、1.0質量部以上20.0質量部以下である。第1硬化剤(A)の含有量が前記下限値以上であれば、耐熱性に優れた積層コアが得られる。第1硬化剤の含有量が前記上限値以下であれば、磁気特性に優れた積層コアが得られる。

第1硬化剤(A)の含有量の下限値は、好ましくは2.0質量部以上、より好ましくは3.0質量部以上である。第1硬化剤(A)の含有量の上限値は、好ましくは18.0、より好ましくは16.0質量部以下、さらに好ましくは15.0質量部以下である。

- [0037] 第2硬化剤(B)は、フェノールレゾール樹脂及びフェノールノボラック樹脂から選ばれる1種以上である。第2硬化剤としてのフェノールレゾール樹脂及びフェノールノボラック樹脂は、フェノール骨格にアルキル基及びアルコキシ基をいずれも有していないものである。

第2硬化剤(B)としては、フェノールレゾール樹脂を単独で使用してもよく、フェノールノボラック樹脂を単独で使用してもよく、フェノールレゾ

ール樹脂とフェノールノボラック樹脂を併用してもよい。

- [0038] 電磁鋼板用コーティング組成物中の第2硬化剤（B）の合計の含有量は、エポキシ樹脂の100質量部に対して、5.0質量部以上150.0質量部以下が好ましい。第2硬化剤（B）の含有量が前記下限値以上であれば、耐熱性が確保可能である。第2硬化剤（B）の含有量が前記上限値以下であれば、磁気特性の劣化を抑制できる。

第2硬化剤（B）の含有量の下限値は、好ましくは5.0質量部以上、より好ましくは10.0質量部以上、さらに好ましくは20.0質量部以上である。第2硬化剤（B）の含有量の上限は、好ましくは150.0質量部以下、より好ましくは100.0質量部以下、さらに好ましくは70.0質量部以下である。

- [0039] [第1硬化剤（A）の含有量] / [第2硬化剤（B）の含有量] で表される質量比（以下、「A/B比」ともいう。）は、0.01～4.0が好ましい。A/B比は、より好ましくは0.1以上、さらに好ましくは0.25以上である。また、A/B比は、より好ましくは3.8以下、さらに好ましくは3.5以下である。A/B比が上記上限および下限値の範囲内であると、応力歪の抑制と耐熱性との両立をより良好に図れる。

- [0040] 電磁鋼板用コーティング組成物は、エポキシ樹脂、第1硬化剤（A）及び第2硬化剤（B）以外の他の成分を含有してもよい。他の成分としては、例えば、アクリル樹脂、第1硬化剤（A）及び第2硬化剤（B）以外の他の硬化剤、硬化促進剤（硬化触媒）、乳化剤、消泡剤等が挙げられる。なお、接着強度を確保する観点から、電磁鋼板用コーティング組成物中には、シリカ、アルミナ、ガラス等の無機充填材は含まれない。他の成分としては、1種のみを使用してもよく、2種以上を併用してもよい。

- [0041] 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。

[0042] 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。

[0043] アクリル樹脂のガラス転移点(T_g点)は、特に限定されないが、下限は、好ましくは-40℃、より好ましくは-20℃である。アクリル樹脂のT_g点の上限は、好ましくは80℃、より好ましくは50℃である。

[0044] 電磁鋼板用コーティング組成物がアクリル樹脂を含有する場合、アクリル樹脂の含有量は、特に制限されず、例えば、エポキシ樹脂とアクリル樹脂の合計量に対して、1質量%以上50質量%以下とすることができる。アクリル変性エポキシ樹脂やアクリルモノマーとして含有させる場合の含有量も同様である。

[0045] 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。

[0046] 他の硬化剤としては、加熱によって硬化反応を開始する潜在性エポキシ樹脂硬化剤が挙げられる。具体的には、芳香族ポリアミン、酸無水物、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。他の硬化剤としては、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。

[0047] 電磁鋼板用コーティング組成物中の他の硬化剤の含有量は、エポキシ樹脂の100質量部に対して、20質量部以下が好ましく、10質量部以下がよ

り好ましい。

- [0048] 一般に、耐熱性に優れるエポキシ樹脂接着剤は、高温での接着強度を担保すると常温付近ではヤング率が大きく、鋼板に応力を付与して磁気特性（コア鉄損）を劣化させる。一方、常温付近で適度な強度を持つ樹脂組成とすると、耐熱性が低下する。

本実施形態では、第1硬化剤（A）のアルキルフェノールを第2硬化剤（B）と組み合わせて用いることにより、硬化物がアルキル基を側鎖として持つ構造となる。そのため、硬化物の弾性率が適度に低下して鋼板に付与される応力が低減され、磁気特性に優れた積層コアが得られる。また、フェノール樹脂は優れた耐熱性を有しているため、第1硬化剤（A）と第2硬化剤（B）を組み合わせて用いることで、耐熱性も向上する。これらのことから、磁気特性と耐熱性を両立することができる。

- [0049] 電磁鋼板用コーティング組成物の硬化収縮率は、15%以下が好ましく、12%以下がより好ましく、10%以下がさらに好ましく、8%以下が特に好ましい。硬化収縮率が前記上限値以下であれば、鋼板への応力付与を低減しやすく、磁気特性に優れた積層コアが得られやすい。

なお、硬化収縮率は、JIS K 6941に準拠した方法により測定される。

- [0050] 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℃以上、より好ましくは140℃以上である。焼き付ける際の到達温度の上限値は、好ましくは200℃以下、より好ましくは180℃以下である。到達温度が上記下限値以上であると、電磁鋼板用コーティング組成物が電磁鋼板と十分に接着し、剥離が抑制される。到達温度が上記上限値以下であると、エポキシ樹脂の硬化を抑制でき、電磁鋼板用コーティング組成物の接着能を維持できる。

- [0051] 焼き付け時間の下限値は、好ましくは5秒以上、より好ましくは10秒以上である。焼き付け時間の上限値は、好ましくは60秒以下、より好ましく

は30秒以下である。焼き付け時間が上記下限値以上であると、電磁鋼板用コーティング組成物が電磁鋼板と十分に接着し、剥離が抑制される。焼き付け時間が上記上限値以下であると、エポキシ樹脂の硬化を抑制でき、電磁鋼板用コーティング組成物の接着能を維持できる。

[0052] 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てよい。

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。

[0053] 単層構成の絶縁被膜3の場合、絶縁被膜3の全体の平均厚み 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 $2.5\mu\text{m}$ 以下とすることができ、 $0.5\mu\text{m}$ 以上 $1.5\mu\text{m}$ 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。

[0054] 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。

[0055] 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。

[0056] 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によって積層コア（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。

[0059] 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。

[0060] 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。

[0061] （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。

[0062] 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。

[0063] 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。

[0064] 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。

[0065] 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。

- [0066] 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（接着工程）。
- [0067] 接着工程における加熱温度としては、例えば、120～250℃が好ましく、150～230℃がより好ましく、200～220℃がさらに好ましい。加熱温度が上記下限値以上であると、絶縁被膜 3 が十分に硬化し、積層コアの接着強度をより高められる。加熱温度が上記上限値以下であると、絶縁被膜 3 の熱劣化を抑制でき、積層コアの接着強度をより高められる。
- [0068] 接着工程における加熱時間としては、積層コアの大きさや加熱方法によって影響を受けるが、例えば、30～120分間が好ましく、45～100分間がより好ましく、60～80分間がさらに好ましい。加熱時間が上記下限値以上であると、絶縁被膜 3 が十分に硬化し、積層コアの接着強度をより高められる。加熱時間が上記上限値以下であると、絶縁被膜 3 の熱劣化を抑制でき、積層コアの接着強度をより高められる。
- [0069] 積層体を加圧する際の圧力は、例えば、2～50MPa が好ましく、3～30MPa がより好ましく、4～20MPa がさらに好ましい。積層体を加圧する際の圧力が上記下限値以上であると、絶縁被膜 3 が十分に密着し、積層コアの接着強度をより高められる。積層体を加圧する際の圧力が上記上限値以下であると、絶縁被膜 3 の端部からのみ出しを抑制でき、積層コアの積み精度をより向上させることができる。
- [0070] 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 142 に断熱部材 143 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 40 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 21 が完成する。

[0071] 以上説明したように、本発明では、エポキシ樹脂、第 1 硬化剤 (A) 及び第 2 硬化剤 (B) を特定の比率で組み合わせた電磁鋼板用コーティング組成物によって電磁鋼板の表面に絶縁被膜を形成する。これにより、積層コアの優れた磁気特性 (コア鉄損) と、駆動時の高温状態でも電磁鋼板同士の接着強度を保持できる優れた耐熱性とを両立できる。

[0072] 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。

[0073] 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。

[0074] 前記実施形態におけるロータでは、2 つ 1 組の永久磁石 32 が 1 つの磁極を形成しているが、本発明はこれに限られない。例えば、1 つの永久磁石 32 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 32 が 1 つの磁極を形成していてもよい。

[0075] 上記実施形態では、回転電機 10 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 10 の構造は、以下に例示するようにこれのみに限られず、更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。

上記実施形態では、回転電機 10 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、本発明はこれのみに限られない。例えば、回転電機 10 がリラクタンス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。

上記実施形態では、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 10 が誘導電動機であってもよい。

上記実施形態では、回転電機 10 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 10 が直流電動機であってもよい。

上記実施形態では、回転電機 10 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 10 が発電機であってもよい。

[0076] 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

[0077] 以下、実施例によって本発明の一態様の効果を具体的に説明するが、実施例での条件は、本発明の実施可能性および効果を確認するために採用した一条件例であり、本発明は以下の記載によっては限定されない。本発明は、本発明の要旨を逸脱せず、本発明の目的を達成する限りにおいて、種々の条件を採用し得るものである。

[0078] [原料]

実施例で使用した原料を以下に示す。

(エポキシ樹脂)

E 1 : ビスフェノール A 型エポキシ樹脂

E 2 : ビスフェノール F 型エポキシ樹脂

E 3 : トリフェニルメタン型エポキシ樹脂

[0079] (第 1 硬化剤)

A 1 : p - s e c - ブチルフェノール

A 2 : p - ノニルフェノール

A 3 : p - ドデシルフェノール

A 4 : 2, 6-ジ-sec-ブチルフェノール

A 5 : p-プロピルフェノール

[0080] (第2硬化剤)

H 1 : フェノールレゾール樹脂

H 2 : フェノールノボラック樹脂

[0081] (硬化剤 (比較対象))

B 1 : ジアミノジフェニルメタン

B 2 : ジシアンジアミド

B 3 : 4-メチルヘキサヒドロフタル酸無水物

[0082] (配合剤)

M 1 : アクリル樹脂 (メチルメタクリレート単位 : イソプロピルアクリレート単位 : スチレン単位 : 2-エチルヘキシルアクリレート単位 (モル比) = 40 : 30 : 20 : 10、ガラス転移温度 : 17℃)

M 2 : アクリル樹脂 (メチルメタクリレート単位 : n-ブチルアクリレート単位 (モル比) = 55 : 45、ガラス転移温度 : 10℃)

[0083] [磁気特性]

各例の電磁鋼帯から55mm×55mmサイズの矩形の電磁鋼板 (単板) を切り出し、鋼板温度200℃、圧力10MPa、加圧時間1時間の条件で電磁鋼板10枚を積層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、JIS C2556 (2015) に規定された単板磁気測定法により、圧延方向と圧延方向に対して直角方向の単板磁気特性を測定し、それらの値の平均値を磁気特性として求めた。なお、磁気特性 (磁性) としては、鉄損として「W10/400 (W/kg)」を評価した。「W10/400」は、周波数400Hz、最大磁束密度1.0Tのときの鉄損である。

[0084] [接着強度]

各例の電磁鋼帯から、幅30mm×長さ60mmの長方形の電磁鋼板 (単板) を2枚切り出した。次いで、表面に、電磁鋼板用コーティング組成物を塗布し、互いの幅30mm×長さ10mmの先端部分同士を重ね合わせ、加

圧することで測定用のサンプルを作製した。加圧条件は、鋼板温度 200℃、圧力 10 MPa、加圧時間 1 時間とした。

得られたサンプルに対し、雰囲気温度を 25℃もしくは 150℃のそれぞれ雰囲気下で、引張速度を 2 mm/分として引張り、剥離するまでの最大荷重 (N) を測定し、この最大荷重 (N) 接着面積で除した数値を接着強度 (MPa) とした。

[0085] <硬化収縮率>

各例の電磁鋼帯の表面に電磁鋼板用コーティング組成物を塗布し、硬化収縮率を測定した。硬化収縮率は、JIS K 6941 に準拠して膜厚の変化により測定した。

[0086] [判定]

各例について、以下の基準で判定を行った。なお、鉄損が小さいほど、電磁鋼板に付与する応力歪が抑制されていることを意味する。測定結果及び判定結果を表 2 に示す。表において、発明範囲外の値には下線を付した。

[0087] [基準]

「Good」：25℃の接着強度が 5.0 MPa 以上、150℃の接着強度が 1.0 MPa 以上、かつ磁気特性が 12.0 W/kg 未満。

「Bad」：25℃の接着強度が 5.0 MPa 未満、150℃の接着強度が 1.0 MPa 未満、または、磁気特性が 12.0 W/kg 以上。

[0088] [実施例 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 0.25 mm、幅 100 mm の無方向性電磁鋼板を用いた。

表 1 に示す各成分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母材鋼板の表面に塗布し、160℃で 15 秒間焼き付けることで、平均厚みが 3 μm の絶縁被膜を有する電磁鋼帯を得た。

[0089] [実施例 2 ~ 10、比較例 1 ~ 9]

電磁鋼板用コーティング組成物の組成及び焼き付け条件を表1に示すとおりに変更した以外は、実施例1と同様にして電磁鋼帯を得た。

[0090] 各例の電磁鋼板用コーティング組成物の組成及び焼き付け条件を表1に示す。各例の磁気特性（磁性）及び接着強度の評価結果を表2に示す。

[0091] [表1]

	エポキシ樹脂		第1硬化剤(A)		第2硬化剤(B)		A/B	配合剤		焼き付け条件		硬化 収縮率 (%)
	種類	質量部	種類	質量部	種類	質量部		種類	質量部	到達 温度 [°C]	時間 [秒]	
実施例1	E1	100	A1	5.0	H1	50.0	0.1	M1	20	160	15	4.1
実施例2	E1		A1	10.0	H1	20.0	0.5	M2	10	160	15	3.9
実施例3	E1		A2	4.0	H1	65.0	0.06	M1	20	180	10	4.6
実施例4	E2		A2	4.0	H2	135.0	0.03	M2	10	180	10	4.5
実施例5	E2		A3	16.0	H2	5.0	3.2	M1	20	200	10	4.2
実施例6	E3		A3	14.0	H2	10.0	1.4	M2	10	200	10	3.8
実施例7	E3		A4	18.0	H2	5.0	3.6	-	-	140	30	3.6
実施例8	E1		A5	2.0	H1	145.0	0.01	M2	25	160	20	4.3
実施例9	E1		A3	2.0	H1	8.0	0.25	M2	20	140	20	4.2
実施例10	E1		A4	2.0	H1	6.0	0.33	M2	20	140	20	4.0
比較例1	E2	100	A1	0.5	H1	100.0	0.01	M1	20	160	20	4.9
比較例2	E1		A2	0.3	H1	100.0	0.003	M1	20	160	15	5.3
比較例3	E1		A1	23.0	H1	50.0	0.46	M1	20	160	15	13.2
比較例4	E1		A2	40.0	H2	50.0	0.8	M1	20	140	25	11.4
比較例5	E2		B1	4.0	H2	80.0	0.05	M2	10	140	25	7.2
比較例6	E2		B2	4.0	H2	120.0	0.03	M2	10	140	25	8.8
比較例7	E2		B3	3.0	H1	120.0	0.03	M2	10	140	25	9.4
比較例8	E2		A1	5.0	-	-	-	M1	20	160	15	9.7
比較例9	E2		-	-	H1	120.0	-	M1	20	160	15	10.4

[0092]

[表2]

	接着強度[MPa]		磁性[W/kg]	判定
	25℃	150℃	W10/400	
実施例1	10.0	2.0	10.8	Good
実施例2	11.0	3.0	11.2	Good
実施例3	9.0	2.0	10.9	Good
実施例4	8.0	1.0	11.0	Good
実施例5	8.0	1.0	11.1	Good
実施例6	9.0	2.0	11.2	Good
実施例7	7.0	1.0	10.8	Good
実施例8	6.0	1.0	10.8	Good
実施例9	7.5	1.5	11.1	Good
実施例10	8.5	1.5	11.2	Good
比較例1	8.0	0.7	11.8	Bad
比較例2	7.0	0.6	11.3	Bad
比較例3	12.0	3.0	12.4	Bad
比較例4	12.0	3.0	12.3	Bad
比較例5	6.0	0.4	11.4	Bad
比較例6	5.0	0.4	11.1	Bad
比較例7	6.0	0.3	11.0	Bad
比較例8	13.0	0.0	13.2	Bad
比較例9	12.0	1.0	12.6	Bad

[0093] 表2に示すように、エポキシ樹脂、第1硬化剤（A）及び第2硬化剤（B）を特定の比率で組み合わせた実施例1～10では、150℃でも十分な接着強度が確保され、耐熱性に優れるうえ、磁気特性にも優れていた。

一方、第1硬化剤の含有量が本発明の範囲外の比較例1～4、第1硬化剤を含まない比較例5～7および9、第2硬化剤を含まない比較例8では、耐熱性と磁気特性が両立できなかった。

産業上の利用可能性

[0094] 本発明によれば、積層コアの耐熱性と磁気特性を両立できる。よって、産業上の利用可能性は大である。

符号の説明

[0095] 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。