

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2020-104254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、エポキシ樹脂硬化剤と、エラストマー変性フェノール樹脂と、を含有し、前記エラストマー変性フェノール樹脂の含有量が、前記エポキシ樹脂 100 質量部に対して、10 質量部以上 100 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、エラストマー変性フェノール樹脂のエラストマー部の重量平均分子量が 2000 以上 20000 以下であってもよい。

[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、硬化収縮率が 15 % 以下であってもよい。

〔４〕本発明の一態様に係る電磁鋼板は、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を含む絶縁被膜を表面に有する。

〔５〕本発明の一態様に係る積層コアは、上記〔４〕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。

〔６〕本発明の一態様に係る回転電機は、上記〔５〕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 2 2 の中心軸線 O に向けて）突出する。複数のティース部 2 3 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 2 0 度おきに 1 8 個のティース部 2 3 が設けられている。複数のティース部 2 3 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 2 3 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 2 3 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 3 0 は、ステータ 2 0（ステータコア 2 1）に対して径方向の内側に配置されている。ロータ 3 0 は、ロータコア 3 1 と、複数の永久磁石 3 2 と、を備える。

ロータコア 3 1 は、ステータ 2 0 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 3 1 内には、前記回転軸 6 0 が配置されている。回転軸 6 0 は、ロータコア 3 1 に固定されている。

複数の永久磁石 3 2 は、ロータコア 3 1 に固定されている。本実施形態では、2 つ 1 組の永久磁石 3 2 が 1 つの磁極を形成している。複数組の永久磁石 3 2 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 3 0 度おきに 1 2 組（全体では 2 4 個）の永久磁石 3 2 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 3 1 には、ロータコア 3 1 を軸方向に貫通する複数の貫通孔 3 3 が形成されている。複数の貫通孔 3 3 は、複数の永久磁石 3 2 の配置に対応して設けられている。各永久磁石 3 2 は、対応する貫通孔 3 3 内に配置された状態でロータコア 3 1 に固定されている。各永久磁石 3 2 のロータコア 3 1 への固定は、例えば永久磁石 3 2 の外面と貫通孔 3 3 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、50.0mmとされる。ステータコア21の外径は、例えば、250.0mmとされる。ステータコア21の内径は、例えば、165.0mmとされる。ロータコア31の外径は、例えば、163.0mmとされる。ロータコア31の内径は、例えば、30.0mm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、

J I S C 2 5 5 8 : 2 0 1 5 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 4 0 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. 1 0 m m、好ましくは 0. 1 5 m m、より好ましくは 0. 1 8 m m 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 4 0 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. 6 5 m m、好ましくは 0. 3 5 m m、より好ましくは 0. 3 0 m m 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. 2 0 m m 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 1 0 % 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 4 0 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 4 0 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、エポキシ樹脂硬化剤と、エラストマー変性フェノール樹脂と、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] エポキシ樹脂硬化剤としては、エポキシ樹脂を硬化させるものであって、所定の温度に加熱することによって硬化反応が開始するタイプの潜在性硬化剤を使用できる。エポキシ樹脂硬化剤としては、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。

[0035] 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エタン、ジアミノジフェニルスルホン等が挙げられる。

[0036] 酸無水物としては、例えば、無水フタル酸、ヘキサヒドロフタル酸無水物、テトラヒドロフタル酸無水物、無水ピロメリット酸、パイロメリット酸無水物等が挙げられる。

[0037] 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。

[0038] 磁気特性と耐熱性を両立させやすい点から、エポキシ樹脂硬化剤としては

、芳香族ポリアミン、フェノール系硬化剤、ジシアンジアミドが好ましく、フェノール系硬化剤がより好ましく、フェノールレゾール樹脂、フェノールノボラック樹脂がさらに好ましい。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。

[0039] 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の下限値は、エポキシ樹脂100質量部に対して、好ましくは1質量部以上、より好ましくは3質量部以上である。エポキシ樹脂硬化剤の含有量の上限値は、好ましくは50質量部以下、より好ましくは35質量部以下である。

[0040] エラストマー変性フェノール樹脂は、ソフトセグメントとハードセグメントをする熱可塑性エラストマーをグラフト化したフェノール樹脂である。例えば、フェノール類とアルデヒド類とを重縮合させる際にエラストマーを配合することで、エラストマー変性フェノール樹脂が得られる。また、フェノール樹脂にエラストマーを反応させることでもエラストマー変性フェノール樹脂が得られる。

[0041] エラストマー変性フェノール樹脂におけるフェノール樹脂は、フェノールノボラック樹脂であってもよく、フェノールレゾール樹脂であってもよい。

フェノール類としては、特に限定されず、例えば、フェノール、オークレゾール、カルダノール、アルキルフェノール（イソプロピルフェノール、p-イソブチルフェノール等）、ビスフェノール（ビスフェノールA、ビスフェノールF等）、多価フェノール（レゾルシン等）が挙げられる。フェノール類としては、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] アルデヒド類としては、特に限定されず、例えば、ホルムアルデヒド、パラホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、ベンズアルデヒド等が挙げられる。アルデヒド類としては、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] 熱可塑性エラストマーとしては、例えば、アクリルゴム、エチレンープロピレンゴム、スチレンーブタジエンゴム、アクリロニトリルーブタジエンゴム、イソプレンゴム、シリコンゴム等が挙げられる。熱可塑性エラストマ

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。

[0044] エラストマー変性フェノール樹脂のエラストマー部の重量平均分子量 (M_w) の下限は、2000以上20000以下である。エラストマー部の M_w が前記下限値以上であれば、積層コアの鉄損劣化を抑制しやすい。エラストマー部の M_w が前記上限値以下であれば、鋼板に塗布する電磁鋼板用コーティング組成物の増粘を抑制可能である。

エラストマー部の M_w の下限は、好ましくは3000以上、より好ましくは4000以上である。エラストマー部の M_w の上限は、好ましくは18000以下、より好ましくは16000以下である。

なお、エラストマー部の M_w は、加水分解反応によりエラストマーとフェノール樹脂を分解し、HPLC（液体クロマトグラフィー）により分離した後、GPC（ゲルパミューレーションクロマトグラフィー）によりポリスチレン換算値として測定される。

[0045] エラストマー変性フェノール樹脂中のエラストマー部の含有量の下限は、好ましくは5質量%以上、より好ましくは10質量%以上である。エラストマー部の含有量が前記下限値以上であれば、コア鉄損が良好である。

エラストマー部の含有量の上限は、好ましくは40質量%以下、より好ましくは35質量%以下である。エラストマー部の含有量が前記上限値以下であれば、速やかに硬化させることができる。

[0046] 電磁鋼板用コーティング組成物中のエラストマー変性フェノール樹脂の含有量は、エポキシ樹脂100質量部に対して、10質量部以上100質量部以下である。エラストマー変性フェノール樹脂の含有量が前記下限値以上であれば、磁気特性に優れた積層コアが得られる。エラストマー変性フェノール樹脂の含有量が前記上限値以下であれば、耐熱性に優れた積層コアが得られる。

エラストマー変性フェノール樹脂の含有量の下限は、好ましくは10質量部以上、より好ましくは20質量部以上である。エラストマー変性フェノール樹脂の含有量の上限は、好ましくは80質量部以下、より好ましくは70

質量部以下である。

- [0047] 電磁鋼板用コーティング組成物は、エポキシ樹脂、エポキシ樹脂硬化剤及びエラストマー変性フェノール樹脂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、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。
- [0048] 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。
- [0049] 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。
- [0050] 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。
- [0051] 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、5質量%以上60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。

[0052] 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。

[0053] 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、ソフトセグメントとハードセグメントを持ち、弾性率の大きい熱可塑性エラストマーをグラフト化したエラストマー変性フェノール樹脂を用いることで、常温付近での鋼板への応力の付与が抑制されるため、磁気特性（コア鉄損）の劣化が抑制される。

また、エラストマーはフェノール樹脂に結合しており、高温に曝されても流動しないため、高温環境下での接着強度も確保される。このように、エラストマー変性フェノール樹脂を特定量用いることで、磁気特性と耐熱性が両立される。なお、熱可塑性エラストマーをグラフト化させず、熱可塑性エラストマーを単に、組成物中に含ませるだけでは、本発明の効果を享受することは困難である。すなわち、熱可塑性エラストマーをグラフト化したエラストマー変性フェノール樹脂を用いることで、より優れた磁気特性が得られる。グラフト化させていない熱可塑性エラストマーを用いる場合には、高温での接着強度が低下したり、鋼板に圧力がかかった際に熱可塑性エラストマー成分だけが流動して積層状態が歪む恐れがある。

[0054] 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。

- [0055] 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、エポキシ樹脂の過硬化を抑制でき、電磁鋼板用コーティング組成物の接着能を維持できる。

- [0056] 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40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、エポキシ樹脂の過硬化を抑制でき、電磁鋼板用コーティング組成物の接着能を維持できる。

- [0057] 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。

- [0058] 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 μm 以上8.0 μm 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 μm 以上2.5 μm 以下とすることができ、0.5 μm 以上1.5 μm 以下が好ましい。上地絶縁被膜の平均厚みは、例えば、1.5 μm 以上8.0 μm 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。

[0059] 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。

[0060] 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。

[0061] 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。

[0062] 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。

[0063] （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。

[0064] 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い
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41
aと非接着領域（不図示）とが混在していてもよい。

[0065] 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。

[0066] （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。

[0067] 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。

[0068] 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1
10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。

[0069] 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14
0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 1 4 4 と、スプリング 1 4 5 と、を備えている。

加熱装置 1 4 1、外周打ち抜き雌金型 1 4 2、断熱部材 1 4 3 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 1 4 4 及びスプリング 1 4 5 は、素材 1 の上方に配置されている。なお、符号 2 1 は、ステータコアを示している。

[0070] 以上説明の構成を有する製造装置 1 0 0 において、まずコイル 1 A 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 1 1 0 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 2 2 と複数のティース部 2 3 を有する電磁鋼板 4 0 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。

[0071] そして最後に、素材 1 は積層ステーション 1 4 0 へと送り出され、外周打ち抜き雄金型 1 4 4 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 4 0 はスプリング 1 4 5 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 4 0 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 4 0 を積み重ねて形成された積層コアは、加熱装置 1 4 1 によって例えば温度 2 0 0℃まで加熱される。この加熱により、隣り合う電磁鋼板 4 0 の絶縁被膜 3 同士が接着される（接着工程）。

[0072] 接着工程の条件については、特に限定されない。例えば、接着工程における加熱温度としては、1 2 0～2 5 0℃が好ましい。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、3 0 秒～1 2 0 分間が好ましい。また、絶縁被膜 3 同士を接着させる際は、積層体を加圧することによって接着させてもよい。積層体を加圧する際の圧力、および、加圧時間は、例えば、2～3 0 0 M P a、3 0 秒～1 2 0 分間が好ましい。

[0073] なお、加熱装置 1 4 1 は、外周打ち抜き雌金型 1 4 2 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 1 4 2 で積層された電磁鋼板 4 0

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。

[0074] 以上説明したように、本発明では、エポキシ樹脂及びエポキシ樹脂硬化剤に、エラストマー変性フェノール樹脂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。

[0075] 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。

[0076] 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性に応じて任意に設計可能である。

[0077] 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。

[0078] 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。

[0079] 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

[0080] 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。

[0081] [原料]

実施例で使用了原料を以下に示す。

(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 : クレゾールノボラック型エポキシ樹脂

[0082] (エラストマー変性フェノール樹脂)

A 1 : アクリルゴム変性フェノール樹脂 (ノボラック型、フェノール樹脂部とエラストマー部の質量比 = 70 : 30、エラストマー部の Mw : 350

00)

A2 : スチレン-ブタジエンゴム変性フェノール樹脂 (ノボラック型、フェノール樹脂部とエラストマー部の質量比 = 65 : 35、エラストマー部の Mw : 20000)

A3 : エチレン-プロピレンゴム変性フェノール樹脂 (ノボラック型、フェノール樹脂部とエラストマー部の質量比 = 85 : 15、エラストマー部の Mw : 160000)

A4 : シリコンゴム変性フェノール樹脂 (ノボラック型、フェノール樹脂部とエラストマー部の質量比 = 90 : 10、エラストマー部の Mw : 3000)

[0083] (エポキシ樹脂硬化剤)

H1 : フェノールレゾール樹脂

H2 : フェノールノボラック樹脂

H3 : ジアミノジフェニルメタン

H4 : ジシアンジアミド

H5 : 4-メチルヘキサヒドロフタル酸無水物

[0084] (配合剤)

M1 : アクリル樹脂 (メチルメタクリレート単位 : 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) = 60 : 30 : 10、ガラス転移温度 : 40℃)

M2 : 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) = 70 : 30、ガラス転移温度 : 15℃)

[0085] [磁気特性]

各例の電磁鋼帯から 55 mm × 55 mm 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 10 MPa、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) に準拠し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 400 Hz 、最大磁束密度 1.0 T のときの鉄損である。

[0086] [接着強度]

各例の電磁鋼帯から、幅 30 mm ×長さ 60 mm 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 30 mm ×長さ 10 mm 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°C 、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°C もしくは 150°C 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。

[0087] [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。

[0088] [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。

[0089] [基準]

「 $Good$ 」： 25°C の接着強度が 5.0 MPa 以上、 150°C 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°C の接着強度が 5.0 MPa 未満、 150°C 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。

[0090] [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 F e 及び不純物からなる板厚 0. 2 5 m m、幅 1 0 0 m m 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、2 0 0 °C で 5 秒間焼き付けることで、平均厚みが 3 μ m の絶縁被膜を有する電磁鋼帯を得た。

[0091] [実施例 2 ～ 1 0、比較例 1 ～ 6]

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。

[0092] 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。

[0093]

[表1]

	エポキシ樹脂		エラストマー変性 フェノール樹脂		エポキシ樹脂 硬化剤		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	40	H1	5	M1	15	200	5	4.3
実施例2	E1		A1	15	H2	7	M1	15	140	30	4.1
実施例3	E1		A2	85	H1	5	M1	15	140	30	3.9
実施例4	E2		A2	65	H2	7	M2	30	160	20	4.4
実施例5	E2		A3	30	H1	5	M2	30	160	20	4.6
実施例6	E3		A3	30	H2	7	—	—	140	30	4.3
実施例7	E3		A4	75	H2	7	M1	10	140	30	4.1
実施例8	E1		A1	40	H3	3	M2	20	160	20	4.8
実施例9	E1		A2	65	H4	1	M1	15	180	10	4.6
実施例10	E1		A2	65	H5	7	M2	30	160	20	4.5
比較例1	E3		A3	6	H1	5	M1	15	200	5	5.7
比較例2	E3		A1	3	H2	7	M1	15	140	30	6.7
比較例3	E2		A3	110	H2	7	M1	35	140	30	4.1
比較例4	E2		A1	145	H1	5	M1	5	160	20	4.3
比較例5	E2		—	—	H1	5	M2	10	180	10	11.2
比較例6	E1		A1	30	—	—	M2	10	160	20	5.4

[0094]

[表2]

	接着強度 [MPa]		磁性 [W/kg]	判定
	25℃	150℃	W10/400	
実施例1	12.0	4.0	11.1	Good
実施例2	11.0	3.0	11.4	Good
実施例3	12.0	3.0	11.3	Good
実施例4	13.0	4.0	11.2	Good
実施例5	11.0	3.0	11.4	Good
実施例6	13.0	4.0	11.4	Good
実施例7	12.0	3.0	11.1	Good
実施例8	10.0	1.0	11.6	Good
実施例9	10.0	1.0	11.7	Good
実施例10	9.0	1.0	11.6	Good
比較例1	14.0	4.0	12.8	Bad
比較例2	14.0	3.0	12.3	Bad
比較例3	11.0	0.6	11.2	Bad
比較例4	10.0	0.4	10.9	Bad
比較例5	15.0	5.0	13.8	Bad
比較例6	4.0	0.0	10.9	Bad

[0095] 表2に示すように、エポキシ樹脂及びエポキシ樹脂硬化剤に、エラストマー変性フェノール樹脂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、エラストマー変性フェノール樹脂の含有量が本発明の範囲外の比較例1～4、エラストマー変性フェノール樹脂を含まない比較例5、エポキシ樹脂硬化剤を含まない比較例6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

[0096] 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

[0097] 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。