

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7279866号
(P7279866)

(45)発行日 令和5年5月23日(2023.5.23)

(24)登録日 令和5年5月15日(2023.5.15)

(51)国際特許分類	F I
B 2 3 K 20/12 (2006.01)	B 2 3 K 20/12 3 1 0
	B 2 3 K 20/12 3 4 0
	B 2 3 K 20/12 3 4 4
	B 2 3 K 20/12 3 6 0

請求項の数 6 (全39頁)

(21)出願番号	特願2022-566734(P2022-566734)	(73)特許権者	000001258
(86)(22)出願日	令和4年8月1日(2022.8.1)		J F E スチール株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/029560		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1日(2022.11.1)	(74)代理人	100147485
(31)優先権主張番号	特願2021-194985(P2021-194985)		弁理士 杉村 憲司
(32)優先日	令和3年11月30日(2021.11.30)	(74)代理人	230118913
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		弁護士 杉村 光嗣
早期審査対象出願		(74)代理人	100165696
			弁理士 川原 敬祐
		(74)代理人	100179589
			弁理士 酒匂 健吾
		(72)発明者	松下 宗生
			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	岩田 匠平

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法および電磁鋼帯の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被接合材である第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯とを、互いに対向する一对の回転ツールにより接合する、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法であって、

前記被接合材の未接合部を、前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合方向の前方に配置される加熱装置により、予熱する、予熱工程と、

前記被接合材の未接合部に、前記回転ツールを両面から互いに逆方向に回転させながら押圧し、前記回転ツールを接合方向に移動させることにより、前記第 1 の電磁鋼帯と前記第 2 の電磁鋼帯とを接合する、接合工程と、をそなえ、

前記被接合材の未接合部は、前記第 1 の電磁鋼帯の端部と、前記第 1 の電磁鋼帯に続く前記第 2 の電磁鋼帯の端部との突合せ部または重ね合せ部であり、

前記加熱装置を前記回転ツールに連動させて接合方向に移動させることにより、前記予熱工程と前記接合工程とを連続して行い、

前記接合工程において、前記第 1 の電磁鋼帯と前記第 2 の電磁鋼帯の接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、次式(1)~(4)の関係を満足する条件で、接合を行う、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

$$D s z \quad 200 \mu m \quad \dots (1)$$

$$D h a z 1 \quad D b m 1 \quad \dots (2)$$

$$D h a z 2 \quad D b m 2 \quad \dots (3)$$

$$0.9 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 \quad H_{sz} \quad 1.2 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 \quad \dots (4)$$

ここで、

D_{sz} は、接合部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz1} は、第1の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz2} は、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

H_{sz} は、接合部の硬さの平均値、

H_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

10

H_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

【請求項2】

前記接合工程において、次式(5)および(6)の関係を満足する条件で接合を行う、請求項1に記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

$$0.8 \times T_{bmL} \quad T_{szL} \quad \dots (5)$$

$$T_{szH} \quad 1.3 \times T_{bmH} \quad \dots (6)$$

ここで、

T_{szL} は、接合部の厚さの最小値 (mm)、

T_{szH} は、接合部の厚さの最大値 (mm)、

20

T_{bmL} は、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯のうち、薄い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

T_{bmH} は、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯のうち、厚い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

である。ただし、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の板厚が同じ場合には、 $T_{bmL} = T_{bmH}$ となる。

【請求項3】

前記予熱工程において、前記被接合材の予熱温度が次式(11)~(13)の関係を満足する、請求項1または2に記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

$$100 \quad T_{PW=0} \quad 1000 \quad \dots (11)$$

30

$$100 \quad T_{PW=0.2D} \quad 1000 \quad \dots (12)$$

$$50 \quad T_{PW=0.5D} \quad 800 \quad \dots (13)$$

ここで、 W は被接合材の接合中央線から接合垂直方向に離間する距離 (mm)であり、 $T_{PW=0}$ 、 $T_{PW=0.2D}$ および $T_{PW=0.5D}$ はそれぞれ、 $W=0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の表面での予熱温度 ()である。また、 D は、回転ツールの肩部の直径 D (mm)である。

【請求項4】

前記予熱工程において、前記被接合材の予熱温度が次式(14)および(15)の関係を満足する、請求項3に記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

$$0.70 \quad T_{PW=0.2D} / T_{PW=0} \quad 1.00 \quad \dots (14)$$

40

$$T_{PW=0.5D} / T_{PW=0} \quad 0.45 \quad \dots (15)$$

【請求項5】

前記加熱装置が、高周波誘導加熱装置、レーザー照射加熱装置、または、高周波誘導加熱装置およびレーザー照射加熱装置を組み合わせた装置である、請求項1または2に記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

【請求項6】

請求項1または2に記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法により第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合し、接合鋼帯を得る工程と、

該接合鋼帯に冷間圧延を施し、冷延鋼帯を得る工程と、をそなえる、電磁鋼帯の製造方法。

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法、電磁鋼帯の製造方法、擦撹拌接合装置および電磁鋼帯の製造装置に関する。

【背景技術】

【0002】

鋼板の製造ライン、例えば、酸洗、冷間圧延、焼鈍およびめっきなどの製造ラインでは、生産性の向上や歩留りを高くするために、いわゆるコイル接合を実施したうえで、鋼帯を通板することが一般的である。ここで、コイル接合とは、製造ラインにおいて、先行する鋼帯（以下、先行鋼帯ともいう）の端部（後端）と、先行鋼帯に続く鋼帯（以下、後行鋼帯ともいう）の端部（先端）とを接合するものである。以下、コイル接合により形成される接合部を、コイル接合部ともいう。なお、先端は、製造ラインにおける鋼帯の進行方向側の端部である。また、後端は、製造ラインにおける鋼帯の進行方向反対側の端部である。このコイル接合を行うことにより、鋼帯の全長にわたり、張力を付与した状態で圧延等することが可能となる。また、鋼帯の先端や後端においても、板厚や形状を高精度に制御することが可能となる。

10

【0003】

コイル接合では、従来、フラッシュバット溶接等が適用されることが一般的であった。しかし、レーザ溶接機の進歩に伴い、例えば、電磁鋼板やステンレス鋼板、高張力鋼板の製造ラインでも、コイル接合にレーザ溶接を適用することが主流となりつつある。

20

【0004】

このような技術として、例えば、特許文献1には、
「高Si鋼を溶接するに際し、Niを主成分とするフィラーワイヤを用い、あるいはNiを主成分とする粉末フィラーを供給して溶接金属の化学組成が下記(1)式を満足するように溶接を行うことを特徴とする高Si鋼のレーザー溶接方法。

$$X = [\%Ni] - [\%Si] \times 2.5 - ([\%Cr] + [\%Mo]) \times 0.4 \quad 0 \dots (1)$$

ただし、 $[\%Ni]$ 、 $[\%Si]$ 、 $[\%Cr]$ および $[\%Mo]$ は、それぞれ、溶接金属中のNi、Si、CrおよびMoの含有量（重量％）を表す。」

が開示されている。

30

【0005】

特許文献2には、
「先行板と後行板とを突合せてフィラーワイヤを用いてレーザー溶接する方法において、溶接初期の前記先行板と後行板の突合せギャップ（Gap）と溶接金属の平均巾（DEPO）との比（Gap/DEPO）が0.3～0.8であることを特徴とするレーザー溶接方法。」

が開示されている。

【0006】

特許文献3には、
「連続冷間圧延ライン上を搬送される特殊鋼からなる先行薄板と後行薄板とをレーザー溶接して形成された溶接部において、

40

冷間圧延によって母材の上面側に伸び出た溶接金属からなる上側延出部の下側に存在する前記母材の最小厚みをL1とし、冷間圧延によって前記母材の下面側に伸び出た溶接金属からなる下側延出部と前記上側延出部に挟まれた前記母材の最小厚みをL2とすると、L1及びL2の少なくともいずれかがゼロより大きいことを特徴とする薄板の溶接部。」

が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【文献】特開平5-305466号公報

50

特開 2 0 0 4 - 2 5 2 8 4 号公報
 特開 2 0 1 1 - 1 4 0 0 2 6 号公報
 特表平 0 7 - 5 0 5 0 9 0 号公報
 特許第 3 2 6 1 4 3 3 号
 特許第 4 8 3 8 3 8 5 号
 特許第 4 8 3 8 3 8 8 号
 特再表 2 0 1 9 - 2 6 8 6 4 号公報
 特再表 2 0 1 9 - 5 4 4 0 0 号公報
 特許第 6 3 3 2 5 6 1 号
 特許第 6 3 3 2 5 6 2 号
 特許第 6 4 9 7 4 5 1 号
 特開 2 0 2 0 - 1 2 4 7 3 9 号公報

【非特許文献】

【 0 0 0 8 】

【文献】 Cui, L.; Fujii, H.; Tsuji, N.; Nogi, K. Scripta Mater. 2007, 56, p.637-640.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 9 】

しかし、レーザ溶接は熔融溶接であるため、熔融および凝固時の不純物の偏析に起因する脆化や、水素侵入に起因する脆化が生じる。その結果、接合部（溶接部）の機械的特性の劣化を招く場合がある。特に、電磁鋼板の成分組成には Si が多量に含有されているため、コイル接合部の機械的特性の劣化が顕著となり易い。そのため、特許文献 1 ~ 3 のように、電磁鋼帯のコイル接合としてレーザ溶接を適用すると、製造ライン、例えば、連続冷間圧延ラインにおいて、コイル接合部に破断が生じ、ライン停止などによる生産性の低下を招くという問題がある。

【 0 0 1 0 】

また、電磁鋼板の製造ラインでは電磁鋼帯が連続的に搬送されるので、コイル接合の施工能率の向上も望まれている。

【 0 0 1 1 】

本発明は、上記の現状に鑑み開発されたものであって、高い施工能率の下、コイル接合部の機械的特性の劣化や形状の劣化による製造ラインでのコイル接合部の破断発生を抑止することができる、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を提供することを目的とする。

また、本発明は、上記の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を用いた電磁鋼帯の製造方法を提供することを目的とする。

さらに、本発明は、上記の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法に好適に用いることができる擦攪拌接合装置を提供することを目的とする。

加えて、本発明は、上記の摩擦攪拌接合装置を有する電磁鋼板の製造装置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】

【 0 0 1 2 】

さて、発明者らは、上記の目的を達成すべく、鋭意検討を重ねた。まず、発明者らは、電磁鋼帯のコイル接合としてレーザ溶接を適用する場合に、コイル接合部の機械的特性の劣化や形状の劣化が生じる理由を調査・検討したところ、以下の知見を得た。

【 0 0 1 3 】

(a) 上述したように、電磁鋼板の成分組成には、Si が多量に、例えば、2 . 0 ~ 5 . 0 質量%程度含有されている。Si は、フェライト安定化元素である。そのため、電磁鋼帯のコイル接合に一般的なレーザ溶接を適用すると、熔融部であるコイル接合部のフェライト結晶粒、さらには、熱影響部のフェライト結晶粒が粗大化する。これにより、コイル接合部の機械的特性、特に、韌性や曲げ強度が大幅に劣化し、製造ラインでのコイル接合部の破断発生を招く。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 4 】

(b) また、上記した特許文献 1 ~ 3 の技術では、オーステナイト安定化元素である Ni を主成分とする溶加材 (フィラー) を用いる。そのため、コイル接合部では、主にオーステナイト相が得られる。しかし、上記した特許文献 1 ~ 3 の技術では、先行鋼帯と後行鋼帯との突合せギャップの変動をなくして溶融部 (溶接金属) での溶加材の融合量と鋼板の融合量とを極めて厳格に管理し、溶融部 (溶接金属) での Ni 当量と Cr 当量とのバランスを常時適正に制御する必要がある。すなわち、溶融部 (溶接金属) での Ni 当量と Cr 当量とのバランスが適正に制御されないと、コイル接合部に硬く脆い組織であるマルテンサイト相が形成される。これにより、コイル接合部の機械的特性、特に、靱性が大幅に劣化する。また、熱影響部では、フェライト結晶粒の粗大化により、コイル接合部の機械的特性が大幅に劣化する。これらの理由により、製造ラインでのコイル接合部の破断発生を招く。

10

【 0 0 1 5 】

(c) さらに、上記した先行鋼帯と後行鋼帯との突合せギャップの変動は、溶接部の余盛高さに影響を及ぼす。例えば、溶接部の余盛高さが高くなり、溶接部が過度な凸形状となる場合、溶接部に負荷がかかると、溶接止端部に応力が集中する。そのため、上記した先行鋼帯と後行鋼帯との突合せギャップの変動は、この点でも、製造ラインでのコイル接合部の破断発生の原因となる。なお、溶接部の余盛は研削などにより除去することができる。しかし、このような工程の増加は生産性の大幅な低下を招く。

【 0 0 1 6 】

上記の点を踏まえ、発明者らがさらに種々の検討を重ねたところ、発明者らは、電磁鋼帯のコイル接合として摩擦攪拌接合を適用することに着想した。

20

ここで、摩擦攪拌接合とは、回転ツールと被接合材との摩擦熱、および、被接合材の塑性流動を利用した固相接合である。すなわち、回転ツールにより被接合材の未接合部 (接合予定領域) を摩擦攪拌する。被接合材の未接合部が摩擦熱により加熱されると、塑性流動が開始する。そして、塑性流動域と母材部との界面が大きく伸長される。これにより、酸化物の無い清浄な界面同士が接触し、被接合材が溶融することなく接合部が形成される。ここで、接合部は、回転ツールと被接合材との摩擦熱と塑性流動による熱間加工を受け再結晶組織となる領域であり、攪拌部と呼ばれる場合もある。また、接合部に隣接する領域には、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けるものの、温度や加工が不十分で再結晶に至らない組織となる領域が形成される。この領域を熱加工影響部という。さらに、被接合材には、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けない領域も存在する。この領域を母材部という。なお、摩擦攪拌接合に関する技術が、例えば、特許文献 4 ~ 1 3 および非特許文献 1 に開示されているが、これらはいずれも、電磁鋼帯のコイル接合に適用するものではない。

30

【 0 0 1 7 】

そこで、発明者らは、上記の着想に基づき、さらに種々の検討を重ねたところ、以下の知見を得た。

(d) 上記 (a) ~ (c) の問題を有利に解決するには、被接合材に予熱処理を行うとともに、接合方式としていわゆる両面摩擦攪拌接合を適用する。そのうえで、接合工程では、接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、当該接合部および熱加工影響部の鋼組織が微細化され、接合部と母材部との硬度差が低減される条件を選択して接合を行う、ことが重要である。具体的には、次式 (1) ~ (4) の関係を同時に満足する条件を選択して接合を行う、ことが重要である。

40

これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性が高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生が有効に抑止される。また、欠陥発生を抑制しつつ接合速度を高速度化することができるので、施工能率に優れ、生産性の点でも極めて有利である。なお、以下、被接合材への予熱処理を行う両面摩擦攪拌接合を、予熱式両面摩擦攪拌接合ともいう。

50

$$D s z \quad 200 \mu m \quad \dots (1)$$

$$D h a z 1 \quad D b m 1 \quad \dots (2)$$

$$D h a z 2 \quad D b m 2 \quad \dots (3)$$

$$0.9 \times (H b m 1 + H b m 2) / 2 \quad H s z \quad 1.2 \times (H b m 1 + H b m 2) / 2 \quad \dots (4)$$

ここで、

$D s z$ は、接合部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

$D h a z 1$ は、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

$D h a z 2$ は、第 2 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

$D b m 1$ は、第 1 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

$D b m 2$ は、第 2 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

$H s z$ は、接合部の硬さの平均値、

$H b m 1$ は、第 1 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

$H b m 2$ は、第 2 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

【0018】

(e) また、上掲式 (1) ~ (4) の関係を同時に満足し、さらに、次式 (5) および (6) の関係を満足する条件を選択して接合を行う、ことが好ましい。これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性が高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生がより有効に抑止される。

$$0.8 \times T b m L \quad T s z L \quad \dots (5)$$

$$T s z H \quad 1.3 \times T b m H \quad \dots (6)$$

ここで、

$T s z L$ は、接合部の厚さの最小値 (mm)、

$T s z H$ は、接合部の厚さの最大値 (mm)、

$T b m L$ は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、薄い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

$T b m H$ は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、厚い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

である。ただし、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯の板厚が同じ場合には、 $T b m L = T b m H$ となる。

本発明は、上記の知見に基づき、さらに検討を加えて完成されたものである。

【0019】

すなわち、本発明の要旨構成は次のとおりである。

1. 被接合材である第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯とを、互いに対向する一对の回転ツールにより接合する、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法であって、

前記被接合材の未接合部を、前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合方向の前方に配置される加熱装置により、予熱する、予熱工程と、

前記被接合材の未接合部に、前記回転ツールを両面から互いに逆方向に回転させながら押圧し、前記回転ツールを接合方向に移動させることにより、前記第 1 の電磁鋼帯と前記第 2 の電磁鋼帯とを接合する、接合工程と、をそなえ、

前記被接合材の未接合部は、前記第 1 の電磁鋼帯の端部と、前記第 1 の電磁鋼帯に続く前記第 2 の電磁鋼帯の端部との突合せ部または重ね合せ部であり、

前記加熱装置を前記回転ツールに連動させて接合方向に移動させることにより、前記予熱工程と前記接合工程とを連続して行い、

前記接合工程において、前記第 1 の電磁鋼帯と前記第 2 の電磁鋼帯の接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、次式 (1) ~ (4) の関係を満足する条件で、接合を行う、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法。

10

20

30

40

50

$$D_{sz} = 200 \mu m \dots (1)$$

$$D_{haz1} = D_{bm1} \dots (2)$$

$$D_{haz2} = D_{bm2} \dots (3)$$

$$0.9 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 = H_{sz} = 1.2 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 \dots (4)$$

ここで、

D_{sz} は、接合部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz1} は、第1の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz2} は、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

H_{sz} は、接合部の硬さの平均値、

H_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

H_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

【0020】

2. 前記接合工程において、次式(5)および(6)の関係を満足する条件で接合を行う、前記1に記載の電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法。

$$0.8 \times T_{bml} = T_{szL} \dots (5)$$

$$T_{szH} = 1.3 \times T_{bmH} \dots (6)$$

ここで、

T_{szL} は、接合部の厚さの最小値 (mm)、

T_{szH} は、接合部の厚さの最大値 (mm)、

T_{bml} は、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯のうち、薄い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

T_{bmH} は、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯のうち、厚い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

である。ただし、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の板厚が同じ場合には、 $T_{bml} = T_{bmH}$ となる。

【0021】

3. 前記予熱工程において、前記被接合材の予熱温度が次式(11)~(13)の関係を満足する、前記1または2に記載の電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法。

$$100 = TP_{W=0} = 1000 \dots (11)$$

$$100 = TP_{W=0.2D} = 1000 \dots (12)$$

$$50 = TP_{W=0.5D} = 800 \dots (13)$$

ここで、 W は被接合材の接合中央線から接合垂直方向に離間する距離 (mm)であり、 $TP_{W=0}$ 、 $TP_{W=0.2D}$ および $TP_{W=0.5D}$ はそれぞれ、 $W=0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の表面での予熱温度 ()である。また、 D は、回転ツールの肩部の直径 D (mm)である。

【0022】

4. 前記予熱工程において、前記被接合材の予熱温度が次式(14)および(15)の関係を満足する、前記3に記載の電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法。

$$0.70 = TP_{W=0.2D} / TP_{W=0} = 1.00 \dots (14)$$

$$TP_{W=0.5D} / TP_{W=0} = 0.45 \dots (15)$$

【0023】

5. 前記加熱装置が、高周波誘導加熱装置、レーザー照射加熱装置、または、高周波誘導加熱装置およびレーザー照射加熱装置を組み合わせた装置である、前記1~4のいずれかに記載の電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法。

【0024】

6. 前記1~5のいずれかに記載の電磁鋼帯の摩擦撹拌接合方法により第1の電磁鋼帯と

10

20

30

40

50

第2の電磁鋼帯とを接合し、接合鋼帯を得る工程と、

該接合鋼帯に冷間圧延を施し、冷延鋼帯を得る工程と、をそなえる、電磁鋼帯の製造方法。

【0025】

7. 前記1～5のいずれかに記載の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法に用いる、摩擦攪拌接合装置であって、

被接合材を把持する、把持装置と、

互いに対向する一対の回転ツールと、

前記回転ツールの駆動装置と、

前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合方向の前方に配置される、加熱装置と、

10

前記把持装置、前記回転ツールの駆動装置および前記加熱装置の動作制御装置と、をそなえる、摩擦攪拌接合装置。

【0026】

8. 前記被接合材の両面において前記被接合材の予熱温度である $T_{PW=0}$ 、 $T_{PW=0.2D}$ および $T_{PW=0.5D}$ を測定する、温度測定装置をさらにそなえる、前記7に記載の摩擦攪拌接合装置。

ここで、Wは被接合材の接合中央線から接合垂直方向に離間する距離(mm)であり、 $T_{PW=0}$ 、 $T_{PW=0.2D}$ および $T_{PW=0.5D}$ はそれぞれ、 $W=0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の表面での予熱温度()である。また、Dは、回転ツールの肩部の直径D(mm)である。

20

【0027】

9. 前記加熱装置が、高周波誘導加熱装置、レーザー照射加熱装置、または、高周波誘導加熱装置およびレーザー照射加熱装置を組み合わせた装置である、前記7または8に記載の摩擦攪拌接合装置。

【0028】

10. 前記7～9のいずれかに記載の摩擦攪拌接合装置をそなえる、電磁鋼帯の製造装置。

【0029】

11. 連続冷間圧延ラインにおいて、前記7～9のいずれかに記載の摩擦攪拌接合装置が、冷間圧延装置の上流側、または、酸洗装置および冷間圧延装置の上流側に配置される、前記10に記載の電磁鋼帯の製造装置。

30

【発明の効果】

【0030】

本発明によれば、被接合材として電磁鋼帯を使用する場合であっても、コイル接合部の機械的特性の劣化や形状の劣化が生じず、製造ラインでのコイル接合部の破断発生が有効に抑止される。また、欠陥発生を抑制しつつ接合速度を高速度化することができる。特に、接合速度を3500mm/分以上、さらには4000mm/分以上に高速化することができるので、施工能率に優れ、生産性の点でも極めて有利である。これにより、電磁鋼帯の生産性の一層の向上を図ることができ、産業上の利用価値は極めて大きい。

【図面の簡単な説明】

40

【0031】

【図1A】本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を説明する概略図であり、予熱式両面摩擦攪拌接合による突合せ接合の一例を示す側面斜視図である。

【図1B】図1AのA-A矢視図である。

【図1C】図1Aの上面図である。

【図1D】図1Aの接合中央線位置における断面図である。

【図2A】本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法で使用する回転ツールの形状の一例を示す模式図である。

【図2B】本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法で使用する回転ツールの形状の一例を示す模式図である。

50

【図3】本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法により得られる、電磁鋼帯の接合継手の模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0032】

本発明を、以下の実施形態に基づき説明する。

[1] 電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法

まず、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を、図1A～Dを用いて説明する。図1A～Dは、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を説明する概略図であり、図1Aは側面斜視図、図1Bは図1AのA-A矢視図、図1Cは図1Aの上面図、図1Dは図1Aの接合中央線位置における断面図である。

図中、符号1が第1の電磁鋼帯（被接合材）、2が第2の電磁鋼帯（被接合材）、3-1が回転ツール（表（オモテ）面側回転ツール）、3-2が回転ツール（裏面側回転ツール）、4が接合部、5-1および5-2が肩部（ショルダー）、6-1および6-2がプローブ（ピン）、7が把持装置、9-1および9-2が先端部、10-1が加熱装置（表（オモテ）面側加熱装置）、10-2が加熱装置（裏面側加熱装置）、11が回転ツールの駆動装置、12が動作制御装置である。なお、図1Aでは、把持装置の図示は省略している。また、 θ は回転ツールの傾斜角度（°）、aはプローブ部の直径（以下、ピン径ともいう）（mm）、bはプローブ部の長さ（以下、ピン長さともいう）（mm）、Dは回転ツールの肩部の直径（mm）、gはプローブ間の隙間（mm）、Gは回転ツールの肩部間の隙間であり、HおよびIは加熱装置による予熱（予定）領域を表している。なお、見やすさの観点から、図1Bおよび図1Cでは、10-1の加熱装置（表面側加熱装置）および/または10-2の加熱装置（裏面側加熱装置）を破線で表している。また、表（オモテ）面（側）の記載について、表面（ヒョウメン）と区別するために、初出箇所などでは表（オモテ）面と表記している。

【0033】

また、図1A～Dでは、

接合方向（回転ツールの進行方向）、

接合垂直方向（接合方向に垂直でかつ、板厚方向に垂直な方向、図1では接合部の幅方向および電磁鋼帯の進行方向と一致する）、および、

板厚方向（被接合材の表面に対して垂直な方向）

により、各部の配置などを示している。

例えば、図1Bでは、鉛直方向が板厚方向である。水平方向が、接合垂直方向である。紙面手前側の方向が、接合方向である。すなわち、図1Bに示す面内には、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる。また、破線で示す10-1および10-2の加熱装置は、3-1および3-2の回転ツールより紙面手前側に位置する。同様に、図1Cにおいて破線で示す10-1の加熱装置は、予熱領域HおよびIより紙面手前側に位置する。

【0034】

なお、ここでいう電磁鋼帯とは、電磁鋼板の製造用素材となる中間製品を意味し、特に、熱間圧延終了後から一次再結晶のための熱処理（例えば、脱炭焼鈍または一次再結晶焼鈍）前までの段階における中間製品を指す。なお、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造方法で製造される電磁鋼帯は、後述するように、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合した後、冷間圧延して得られるものである。以下、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合した状態の電磁鋼帯を接合鋼帯、該接合鋼帯を冷間圧延した電磁鋼帯を冷延鋼帯とも呼ぶ。また、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法は、例えば、電磁鋼帯の製造ライン、特に、連続冷間圧延ラインにおいて実施することが好適である。ここで、連続冷間圧延ラインとは、鋼帯を、冷間圧延装置により連続的に冷間圧延する製造ラインである。連続冷間圧延ラインは、例えば、鋼帯の搬送装置と、冷間圧延装置とをそなえる。連続冷間圧延ラインには、任意にさらに、酸洗装置や焼鈍炉、コーティング装置などが附帯する場合もある。

【0035】

そして、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法は、上述したように、電磁鋼帯のコイル接合として予熱式両面摩擦攪拌接合を適用する。そのうえで、接合部および熱加工影響部の鋼組織をフェライト主体の組織とし、かつ、接合部および熱加工影響部の鋼組織を微細化し、接合部と母材部の硬度差を低減する条件を選択して接合する、ことを特徴とするものである。

【0036】

より具体的には、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法は、被接合材である第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを、互いに対向する一対の回転ツールにより接合する、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法であって、

前記被接合材の未接合部を、前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合方向の前方に配置される加熱装置により、予熱する、予熱工程と、

10

前記被接合材の未接合部に、前記回転ツールを両面から互いに逆方向に回転させながら押圧し、前記回転ツールを接合方向に移動させることにより、前記第1の電磁鋼帯と前記第2の電磁鋼帯とを接合する、接合工程と、をそなえ、

前記被接合材の未接合部は、前記第1の電磁鋼帯の端部と、前記第1の電磁鋼帯に続く前記第2の電磁鋼帯の端部との突合せ部または重ね合せ部であり、

前記加熱装置を前記回転ツールに連動させて接合方向に移動させることにより、前記予熱工程と前記接合工程とを連続して行い、

前記接合工程において、前記第1の電磁鋼帯と前記第2の電磁鋼帯の接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、次式(1)~(4)の関係を満足する条件で、接合を行う、というものである。

20

$$Dsz \leq 200 \mu m \quad \dots (1)$$

$$Dhaz1 \leq Dbm1 \quad \dots (2)$$

$$Dhaz2 \leq Dbm2 \quad \dots (3)$$

$$0.9 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \leq Hsz \leq 1.2 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \quad \dots (4)$$

ここで、

Dszは、接合部のフェライト粒径の平均値(μm)、

Dhaz1は、第1の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値(μm)、

Dhaz2は、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値(μm)、

30

Dbm1は、第1の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値(μm)、

Dbm2は、第2の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値(μm)、

Hszは、接合部の硬さの平均値、

Hbm1は、第1の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

Hbm2は、第2の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

【0037】

ここで、継手形式の好適な例としては、突合せ接合および重ね接合が挙げられる。

突合せ接合とは、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の端面同士を対向させた状態で、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の端面(突合せ面)を含む突合せ部に回転ツールを回転させながら押圧する。そして、その状態で、回転ツールを接合方向に移動させることにより、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯を接合するものである。

40

重ね接合とは、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の端部の少なくとも一部を重ね合せ、重ね合せ部に回転ツールを回転させながら押圧する。そして、その状態で、回転ツールを接合方向に移動させることにより、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯を接合するものである。

【0038】

突合せ接合と重ね接合は未接合部の形態が異なるだけで、その他の装置の構成は基本的に同じなので、ここでは、図1A~Dのような、予熱式両面摩擦攪拌接合により、突合せ接合を行う場合を例示して説明する。予熱式両面摩擦攪拌接合方法は、被接合材である第

50

1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを予熱したうえで、互いに対向する一对の回転ツールを用いて接合する摩擦攪拌接合方法である。すなわち、互いに対向する一对の回転ツールを、予熱した被接合材の未接合部の両面から互いに逆方向に回転させながら押圧する。そして、その状態で、回転ツールを接合方向に移動させることにより、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合する。

【0039】

このような予熱式両面摩擦攪拌接合では、例えば、図1Aに示すように、被接合材を把持する、把持装置（図示せず）と、互いに対向する一对の回転ツールと、前記回転ツールの駆動装置と、前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合方向の前方に配置される、加熱装置と、

前記把持装置、前記回転ツールの駆動装置および前記加熱装置の動作制御装置と、をそなえる摩擦攪拌接合装置を用いる。

動作制御装置では、例えば、回転ツールの傾斜角度、回転ツールの先端部の位置および先端部（プローブ）同士間の距離 g （以下、プローブ間の隙間 g ともいう）、回転ツールの肩部間の隙間 G 、接合速度（および回転ツールに連動して移動する加熱装置の接合方向への移動速度）、押込み荷重、回転ツールの回転数、回転トルク、ならびに、加熱装置の出力等を制御する。

【0040】

予熱式両面摩擦攪拌接合では、摩擦攪拌接合装置の回転ツールを、被接合材である第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯（以下、単に被接合材ともいう）の両面にそれぞれに配置する。また、加熱装置を、被接合材の少なくとも一方の面において回転ツールの接合方向の前方に配置する。なお、被接合材の表面側（鉛直方向上側）に配置される回転ツールを、表面側回転ツールと称し、被接合材の裏面側（鉛直方向下側）に配置される回転ツールを、裏面側回転ツールと称する場合がある。また、被接合材の表面側（鉛直方向上側）に配置される加熱装置を、表面側加熱装置と称し、被接合材の裏面側（鉛直方向下側）に配置される加熱装置を、裏面側加熱装置と称する場合がある。第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯は、図中に示した接合中央線に平行となるように配置され、それぞれ把持装置で把持される。

【0041】

ここで、接合中央線は、接合の際の回転ツールの回転軸の（被接合材の表面での）通過設定（狙い）位置を結ぶ線であり、接合方向と平行になる。なお、接合中央線は、接合の際の回転ツールの回転軸の（被接合材の表面での）軌跡ということもでき、通常、接合部の幅方向の中心位置を通る。突合せ接合の場合、当該位置は、例えば、図1に示すように、第1の電磁鋼帯の端部（後端）と第2の電磁鋼帯の端部（先端）との突合せ部の接合垂直方向の中心位置になる。換言すれば、当該位置は、接合垂直方向における第1の電磁鋼帯の端部（後端）と第2の電磁鋼帯の端部（先端）との中間点になる。また、重ね接合の場合、当該位置は、例えば、第1の電磁鋼帯の端部（後端）と第2の電磁鋼帯の端部（先端）との重ね合せ部の幅（接合垂直方向の幅）の中心位置となる。

【0042】

そして、接合中央線上に位置する被接合材の未接合部（接合予定領域）、つまり、第1の電磁鋼帯の端部（後端）と第2の電磁鋼帯の端部（先端）との突合せ部を予熱する。ついで、予熱した被接合材の未接合部に、回転ツールを両面から互いに逆方向に回転させながら押圧する。そして、その状態で、回転ツールを接合方向に移動させる。この予熱による被接合材への入熱と、被接合材と回転ツールの摩擦熱とにより、被接合材を軟化させる。そして、その軟化した部位を回転ツールで攪拌することにより、塑性流動を生じさせて、被接合材である第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合する。特に、被接合材を予熱することで未接合部の軟化が容易になり、回転ツールでの攪拌が促進される。その結果、製造ラインでのコイル接合部の破断発生および欠陥発生を有効に抑止しつつ接合速度を高

10

20

30

40

50

速度化することができ、高い施工能率を実現することが可能となる。なお、接合が完了した部分には、接合部が形成される。また、接合部に隣接して、熱加工影響部が形成される。

【0043】

以下、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合法の予熱工程および接合工程について、詳しく説明する。

【0044】

[予熱工程]

予熱工程では、加熱装置を、被接合材の少なくとも一方の面において回転ツールの接合進行方向の前方に配置し、被接合材の未接合部を加熱装置により予熱する。なお、加熱装置を回転ツールに連動させて接合方向に移動させることにより、予熱工程と後述する接合工程とを連続して行うことができる。また、被接合材を予熱することで未接合部の軟化が容易になり、回転ツールでの攪拌が促進される。その結果、製造ラインでのコイル接合部の破断発生および欠陥発生を有効に抑止しつつ接合速度を高速度化することができ、高い施工能率を実現することが可能となる。

10

【0045】

次に、図1Cを用いて、加熱装置を被接合材の両面に配置する場合（以下、両面配置ともいう）を例として、好適な予熱温度などについて説明する。ここで、被接合材の予熱温度は、予熱終了時点（加熱装置の通過時点）での被接合材の表面での温度（内部温度ではなく表面温度）である。そして、被接合材の予熱温度が、被接合材の両面において、以下の要件を満足することが好適である。なお、加熱装置を、被接合材のいずれか一方の面にのみ配置する場合（以下、片面配置ともいう）にも、被接合材の予熱温度が、被接合材の両面において、以下の要件を満足していれば同様の効果が得られる。そのため、片面配置の例についての説明は省略する。

20

【0046】

$$100 \quad T_{PW=0} \quad 1000 \quad \dots (11)$$

$$100 \quad T_{PW=0.2D} \quad 1000 \quad \dots (12)$$

$$50 \quad T_{PW=0.5D} \quad 800 \quad \dots (13)$$

予熱式両面摩擦攪拌接合では、予熱による被接合材への入熱と、被接合材と回転ツールの摩擦熱とにより、被接合材を軟化させ、回転ツールでの攪拌を促進することが重要である。そのためには、図1Cに示す予熱領域I（被接合材の表面における $0 < W < 0.1 \times D$ の領域）および予熱領域H（被接合材の表面における $0.1 \times D < W < 0.5 \times D$ ）の予熱温度、特にこれらの加熱領域の代表位置である $W = 0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の予熱温度を適切に制御することが効果的である。このような観点から、被接合材の予熱温度を上掲式(11)~(13)の関係を満足するように制御することが好適である。ここで、Wは被接合材の接合中央線から接合垂直方向に離間する距離（mm）であり、 $T_{PW=0}$ 、 $T_{PW=0.2D}$ および $T_{PW=0.5D}$ はそれぞれ、 $W = 0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の表面での予熱温度（ ）である。また、Dは、回転ツールの肩部の直径D（mm）である。なお、予熱領域は、加熱装置により予熱される被接合材の表面領域である。

30

【0047】

$$0.70 \quad T_{PW=0.2D} / T_{PW=0} \quad 1.00 \quad \dots (14)$$

$$T_{PW=0.5D} / T_{PW=0} \quad 0.45 \quad \dots (15)$$

また、予熱工程では、被接合材の予熱温度について、上掲式(11)~(13)の関係を満足させたうえで、さらに、上掲式(14)および(15)の関係を満足させることがより好ましい。すなわち、予熱による塑性流動促進効果を得るためには、被接合材の予熱温度を高めることが有効である。しかし、被接合材の予熱温度を過度に高めると、予熱領域の周辺においてミクロ組織の変質が生じる場合がある。そのため、接合中央線近傍の予熱領域Iでは予熱温度を高める一方、接合中央線から離れた予熱領域Hでは予熱温度を抑制することがより有効である。特に、予熱領域Iおよび予熱領域Hの代表位置である $W = 0$ 、 $0.2 \times D$ および $0.5 \times D$ の位置における被接合材の予熱温度について、 $T_{PW=0}$

40

50

に対する $TPW = 0.2D$ の比である $TPW = 0.2D / TPW = 0$ を $0.70 \sim 1.00$ の範囲とし、かつ、 $TPW = 0$ に対する $TPW = 0.5D$ の比である $TPW = 0.5D / TPW = 0$ を 0.45 以下に制御することが効果的である。そのため、予熱工程では、被接合材の予熱温度について上掲式(14)および(15)の関係を満足させることがより好ましい。

【0048】

また、予熱工程で使用する加熱装置は、特に限定されるものではないが、例えば、高周波誘導加熱装置やレーザー照射加熱装置が挙げられる。

【0049】

ここで、加熱装置として高周波誘導加熱装置を用いる場合には、例えば、使用周波数を 20kHz 以上 360kHz 以下の範囲内、および、出力を 10kW 以上 200kW 以下の範囲でそれぞれ種々調整する。これにより、上掲式(11)~(15)の関係を満足するように被接合材の表面温度を制御することができる。

10

【0050】

また、加熱装置としてレーザー照射加熱装置を用いる場合には、例えば、レーザー光の波長を $0.3\mu\text{m}$ 以上 $11\mu\text{m}$ 以下の範囲内、および、出力を 2kW 以上 50kW 以下の範囲内でそれぞれ種々調整する。これにより、上掲式(11)~(15)の関係を満足するように被接合材の表面温度を制御することができる。

【0051】

なお、加熱装置として、複数種類の加熱装置を組み合わせた装置、例えば、高周波誘導加熱装置およびレーザー照射加熱装置を組み合わせた装置を使用してもよい。

20

【0052】

また、加熱装置が、被接合材の少なくとも一方の面において回転ツールの接合(進行)方向の前方に配置されていれば、加熱装置と回転ツールの間の距離や予熱領域の範囲(以下、予熱範囲ともいう)は特に限定されない。ただし、加熱装置と回転ツールの距離が小さくなりすぎると、回転ツールが加熱装置による熱で損傷するおそれがある。そのため、加熱装置と回転ツールの位置関係は、加熱効率や被接合材への影響を考慮して決定することが好ましい。例えば、使用周波数が $20 \sim 360\text{kHz}$ の高周波誘導加熱装置を用いる例では、加熱装置と回転ツールの間の距離(接合方向における端部間距離)を、 $1\text{mm} \sim 100\text{mm}$ の範囲とすることが好ましい。また、予熱範囲も特に限定されるものではないが、上掲式(11)~(15)の関係を満足させる観点からは、接合垂直方向における予熱範囲の中心位置を $0 \leq W \leq 0.1 \times D$ の範囲とすることが好適である。なお、予熱範囲は、例えば、加熱装置の配置、出力および周波数を調整することにより、制御することができる。

30

【0053】

[接合工程]

上記の予熱工程において、被接合材の未接合部を予熱したのち、被接合材の未接合部に、回転ツールを両面から互いに逆方向に回転させながら押圧する。そして、その状態で回転ツールを接合方向に移動させることにより、被接合材である第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合する。

40

【0054】

そして、この接合工程では、接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、次式(1)~(4)の関係を満足する条件で、接合を行うことが重要である。これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性が高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生が有効に抑止される。

$Dsz \leq 200\mu\text{m} \dots (1)$

$Dhaz1 \leq Dbm1 \dots (2)$

$Dhaz2 \leq Dbm2 \dots (3)$

$0.9 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \leq Hsz \leq 1.2 \times (Hbm1 + Hbm2) \dots (4)$

50

/ 2 . . . (4)

ここで、

D_{sz} は、接合部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz1} は、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz2} は、第 2 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm1} は、第 1 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm2} は、第 2 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

H_{sz} は、接合部の硬さの平均値、

H_{bm1} は、第 1 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

H_{bm2} は、第 2 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

10

である。

【 0 0 5 5 】

さらに、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法では、次式 (5) および (6) の関係を満足する条件で接合を行う、ことが好適である。

$$0.8 \times T_{bmL} \leq T_{szL} \leq 1.3 \times T_{bmL} \quad \dots (5)$$

$$T_{szH} \leq 1.3 \times T_{bmH} \leq T_{szH} \quad \dots (6)$$

ここで、

T_{szL} は、接合部の厚さの最小値 (mm)、

T_{szH} は、接合部の厚さの最大値 (mm)、

T_{bmL} は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、薄い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

20

T_{bmH} は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、厚い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、

である。ただし、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯の板厚が同じ場合には、 $T_{bmL} = T_{bmH}$ となる。

【 0 0 5 6 】

なお、被接合材 (第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯)、接合部および熱加工影響部、ならびに、上掲式 (1) ~ (6) などについての説明は、後述する [2] 電磁鋼帯の接合継手に記載するとおりである。

【 0 0 5 7 】

30

また、接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、上掲式 (1) ~ (4) の関係を満足する条件、好適にはさらに上掲式 (5) および (6) の関係を満足する条件とするには、例えば、以下の点を同時に満足させることが好適である。

・ 前述した予熱工程を行う。

・ そのうえで、回転ツールの回転数 RS (回 / 分)、回転ツールの肩部の直径 D (mm) および接合速度 JS ($\text{mm} / \text{分}$) により表される $RS \times D^3 / JS$ について、次式 (7) および (8) の関係を満足させる。

$$4 \times T_J \leq D \leq 10 \times T_J \quad \dots (7)$$

$$180 \times T_J \leq RS \times D^3 / JS \leq 1500 \times T_J \quad \dots (8)$$

40

ここで、式 (7) および (8) 中の T_J は、

未接合部が突合せ部の場合、第 1 の電磁鋼帯の板厚および第 2 の電磁鋼帯の板厚の平均値 (mm) であり、

未接合部が重ね合せ部の場合、重ね合せ部の厚さ (mm) (すなわち、第 1 の電磁鋼帯の板厚 (mm) と第 2 の電磁鋼帯の板厚 (mm) の合計) である。

【 0 0 5 8 】

すなわち、回転ツールの肩部の直径 D (以下、単に肩径 D ともいう) を、未接合部の厚さに応じて適切に制御する。これにより、回転ツールと被接合材である被接合材である第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯との間で生じる摩擦熱による温度上昇と、摩擦力によるせん断応力とを被接合材に有効に付与することができる。ここで、肩径 D が $4 \times T_J$ (

50

mm)未満になると、十分な塑性流動が得られず、所定の関係を満足させることが困難となる場合がある。一方、肩径Dが $10 \times T J$ (mm)を超えると、塑性流動が生じる領域が不必要に広がり、接合部に過大な熱量が投入される。これにより、接合部の再結晶組織が粗大化し、所定の関係を満足させることが困難となる場合がある。そのため、所定の関係を満足する条件とするには、肩径Dについて、上記式(7)の関係を満足させることが好ましい。肩径Dは、より好ましくは $5 \times T J$ (mm)以上である。また、肩径Dは、より好ましくは $9 \times T J$ (mm)以下である。

【0059】

また、 $RS \times D^3 / JS$ は、単位接合長さ当たりの発熱量と相関するパラメータである。そして、 $RS \times D^3 / JS$ の範囲を $180 \times T J \sim 1500 \times T J$ とすることにより、
10
回転ツールと被接合材である第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯との間で生じる摩擦熱による温度上昇と、摩擦力によるせん断応力とを被接合材に有効に付与することができる。ここで、 $RS \times D^3 / JS$ が $180 \times T J$ 未満では、発熱量が不十分となる場合がある。そのため、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の合せ面に冶金的に接合された状態の接合界面を形成することができず、所定の関係を満足させることが困難となる場合がある。一方、 $RS \times D^3 / JS$ が $1500 \times T J$ を超えると、摩擦攪拌による発熱量が過大となり、接合部に過大な熱量が投入される。これにより、接合部のピーク温度(最高到達温度)が上昇したり、冷却速度が低下したりして、接合部の再結晶組織が粗大化する。その結果、所定の関係を満足させることが困難となる場合がある。そのため、所定の関係を満足する条件とする観点から、 $RS \times D^3 / JS$ については、上記式(8)の関係を満足させる
20
ことが好ましい。 $RS \times D^3 / JS$ は、より好ましくは $240 \times T J$ 以上である。また、 $RS \times D^3 / JS$ は、より好ましくは $1200 \times T J$ 以下である。

【0060】

なお、表面側回転ツールと裏面側回転ツールとで、回転ツールの回転数RSおよび/または肩径Dが異なる場合には、表面側回転ツールおよび裏面側回転ツールのそれぞれで、上記式(7)および(8)の関係を満足させることが好ましい。

【0061】

また、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法では、回転ツールの傾斜角度 θ が、次式(9)の関係を満足することが好ましい。

$$0^\circ < \theta < 2^\circ \cdots (9)$$

ここで、 θ は、接合方向と板厚方向(被接合材の表面に対して垂直な方向)とを含む面における、回転ツールの回転軸(以下、ツールの回転軸ともいう)の板厚方向(被接合材の表面に対して垂直な方向)からの傾斜角度である。なお、回転ツールの先端部が接合方向に対して先行する向き(θ の角度)を+とする。

【0062】

すなわち、回転ツールは、被接合材よりも硬い材質で形成される。しかし、セラミックなどの靱性に乏しい材料を使用した回転ツールにおいて、プローブに対して曲げ方向の力が負荷されると、局部的に応力が集中し、破壊に至るおそれがある。この点、ツールの回転軸を、板厚方向から θ (°)傾斜させ、プローブの先端を接合方向に対して先行させると、回転ツールに対する負荷を、回転軸方向に圧縮される分力として、回転ツールで受け
40
ることができる。これにより、曲げ方向の力を低減することができ、回転ツールの破壊を回避することができる。

【0063】

ここで、回転ツールの傾斜角度 θ が 0° を超えると、上述の効果が得られる。しかし、回転ツールの傾斜角度 θ が 2° を超えると、接合部の表裏面が凹形となりやすい。これにより、接合部の厚さの最小値が、母材の厚さに対して低下する。その結果、継手強度に悪影響を及ぼし、製造ラインでのコイル接合部の破断発生を招く場合がある。そのため、回転ツールの傾斜角度 θ は、表面側回転ツールと裏面側回転ツールの両方において、 $0^\circ < \theta < 2^\circ$ の範囲とすることが好ましい。

【0064】

10

20

30

40

50

さらに、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法では、回転ツールの肩部間の隙間G (mm) が次式 (10) の関係を満足することが好ましい。

$$0.5 \times T J - 0.1 \times D \times \sin \quad G \quad 0.9 \times T J - 0.1 \times D \times \sin$$

・・・ (10)

【0065】

すなわち、両面摩擦攪拌接合では、接合時の欠陥発生を抑制しつつ接合速度の高速度化を達成する観点から、図1Dに示す回転ツールの肩部間の隙間G (以下、単に肩部間隙間Gともいう) を適切に制御することが有利である。なお、肩部間隙間Gは、板厚方向における表面側回転ツールの肩部と裏面側回転ツールの肩部との離間距離ともいえる。特に、肩部間隙間Gが $0.5 \times T J - 0.1 \times D \times \sin \sim 0.9 \times T J - 0.1 \times D \times \sin$ の範囲内にあると、互いに対向する回転ツールの肩部が、被接合材の表面側および裏面側に密接または押し込まれる状態となる。その結果、被接合材が表面側および裏面側から回転ツールの肩部により十分な荷重で押圧され、接合時の欠陥発生を抑制しつつ接合速度の高速度化を達成するうえで有利になる。そのため、肩部間隙間Gは、 $0.5 \times T J - 0.1 \times D \times \sin \sim 0.9 \times T J - 0.1 \times D \times \sin$ の範囲とすることが好ましい。

10

【0066】

上記以外の条件については、上掲式 (1) ~ (4) の関係を満足し、好ましくは上掲式 (5) ~ (10) の関係を満足する条件であれば、特に限定されず、常法に従えばよい。

例えば、回転ツールの回転数は、好ましくは $200 \sim 6000 \text{ r/min}$ (回/分) である。回転ツールの回転数を当該範囲内とすることにより、表面形状を良好に保ちつつ課題な熱量の投入による機械特性の低下を抑制できるので、有利である。回転ツールの回転数は、より好ましくは 300 r/min 以上である。また、回転ツールの回転数は、より好ましくは 5000 r/min 以下である。

20

接合速度は、好ましくは $1000 \sim 10000 \text{ mm/min}$ (mm/分) である。接合速度は、より好ましくは 2000 mm/min 以上、さらに好ましくは 3500 mm/min 以上、よりさらに好ましくは 4000 mm/min 以上、よりさらに好ましくは 5000 mm/min 以上である。

回転ツールの先端部の位置や押込み荷重、回転トルク、プローブ間の隙間などは、常法に従い、適宜、設定すればよい。

30

【0067】

なお、図1A~Dに示すように、予熱式両面摩擦攪拌接合では、表面側回転ツールの回転方向と裏面側回転ツールの回転方向とを、被接合材の表面側 (または裏面側) から見て逆方向とする。また、表面側回転ツールの回転数と裏面側回転ツールの回転数は、同じとすることが好ましい。これにより、表面側回転ツールと裏面側回転ツールから被接合材に加わる回転トルクを打ち消し合うことができる。その結果、一方の面から未接合部を押圧して接合する片面摩擦攪拌接合法と比較して、被接合材を拘束する治具の構造を簡略化することが可能となる。

【0068】

また、表面側回転ツールの回転方向と裏面側回転ツールの回転方向とを、被接合材の表面側 (または裏面側) から見て同方向とすると、一方の回転ツールに対する他方の回転ツールの相対速度はゼロに近づく。その結果、被接合材の塑性流動が均質状態に近づき塑性変形も小さくなる。そのため、材料の塑性変形による発熱も得られなくなるので、良好な接合状態を達成することが難しくなる。よって、良好な接合状態を達成するのに十分な温度上昇とせん断応力を被接合材の板厚方向に対して均質的に得る観点から、表面側回転ツールの回転方向と裏面側回転ツールの回転方向とを、被接合材の表面側 (または裏面側) から見て逆方向とすることが好ましい。

40

【0069】

また、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法で使用する回転ツールについても特に限定されず、常法に従えばよい。

50

例えば、回転ツールの先端部は、接合時に被接合材である第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯と接触する。そのため、回転ツールの先端部は、接合時に晒される高温状態において、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯よりも硬い材質で形成される。これにより、接合時に回転ツールは、先端部の形状を保持したまま、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯に変形を加えることができる。その結果、高い攪拌能を持続的に実現することができ、適正な接合が可能となる。なお、回転ツールの先端部、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯の硬さは、高温ビッカース硬さ試験方法により測定して、比較すればよい。なお、回転ツールの先端部のみを、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯よりも硬い材質で形成してもよい。また、回転ツール全体を、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯よりも硬い材質で形成してもよい。

10

【0070】

図2AおよびBに、両面摩擦攪拌接合で使用する回転ツールの例として、回転ツールの先端部が、肩部（図中の肩径で示される範囲）と、該肩部に配置され、該肩部と回転軸を共有するプローブ（図中のピン径で示される範囲）と、をそなえる場合の形状を示す。

図2Aに示す回転ツールの例では、回転ツールの形状は、肩径D：13mm、ピン径：4mm、ピン長さ：0.6mm、凹面深さ（図示せず）：0.3mmである。

図2Bに示す回転ツールの例では、回転ツールの形状は、肩径D：20mm、ピン径：6.7mm、ピン長さ：0.9mm、凹面深さ（図示せず）：0.3mmである。

【0071】

肩部は、略平面または緩やかな曲面により形成された平坦な形状を呈する。肩部は、接合時に回転しながら、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯と接触し、摩擦熱を発生させる機能を有する。また、肩部は、熱により軟化した部位を押圧することで材料の離散を防止し、回転方向への塑性流動を促進させる機能を有する。

20

【0072】

プローブは、肩部と不連続な形状となり、被接合材（図示せず）へ向けて略垂直に突出した形状を呈する。プローブは、接合時に、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯の軟化部において板厚中心方向へ侵入することにより、板厚中心部近傍の攪拌能を向上させる機能を有する。また、プローブは、通常、肩部の中心に位置する。

【0073】

肩径D（mm）については、上述したように、上掲式（7）および（8）の関係を満足させることが好ましい。また、回転ツールのピン径およびピン長さなどは特に限定されず、常法に従い、適宜設定すればよい。例えば、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の板厚が異なる場合に突合せ接合する際には、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の板厚の平均値を考慮し、常法に従った回転ツールのピン径およびピン長さなどを設定すればよい。また、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯を重ね接合する際には、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の板厚の合計値を考慮し、常法に従った回転ツールのピン径およびピン長さなどを設定すればよい。

30

【0074】

回転ツールとしては、上記の回転ツールの先端部を肩部とプローブとから構成した回転ツール（以下、単にプローブありの回転ツールともいう）に加え、回転ツールの先端部を肩部のみから構成したプローブなしの回転ツール（以下、単にプローブなしの回転ツールともいう）を使用することもできる。プローブなしの回転ツールとしては、例えば、回転ツールの先端面（被接合材との接触面）を、平面、凸型の曲面、または、凹型の曲面としたプローブなしの回転ツールが挙げられる。なお、プローブなしの回転ツールの場合、肩径Dは、先端径ということもできる。先端径は、回転軸に垂直な面における回転ツールの先端面の直径（回転ツールの先端面を、回転軸に平行な方向へ投影したときの投影領域の直径）である。

40

【0075】

〔2〕電磁鋼帯の接合継手

次に、電磁鋼帯の接合継手を、図3を用いて説明する。図中、符号1が第1の電磁鋼帯

50

(被接合材)、2が第2の電磁鋼帯(被接合材)、4が接合部、4-1が熱加工影響部(第1の電磁鋼帯側)、4-2が熱加工影響部(第2の電磁鋼帯側)である。なお、図3は、電磁鋼帯の接合継手の板厚方向の断面図である。図中、鉛直方向が板厚方向である。水平方向が、接合垂直方向である。紙面手前側の方向が、接合方向である。すなわち、図3に示す面(ここでいう板厚方向の断面)内には、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる。

【0076】

上記の電磁鋼帯の接合継手は、

第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合する、電磁鋼帯の接合継手であって、該電磁鋼帯の接合継手は、接合部と、該接合部に隣接する熱加工影響部とをそなえ、該接合部および該熱加工影響部の鋼組織はそれぞれ、フェライト相主体の組織であり、

10

$$D_{sz} \quad 200 \mu\text{m} \quad \dots (1)$$

$$D_{haz1} \quad D_{bm1} \quad \dots (2)$$

$$D_{haz2} \quad D_{bm2} \quad \dots (3)$$

$$0.9 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 \quad H_{sz} \quad 1.2 \times (H_{bm1} + H_{bm2}) / 2 \quad \dots (4)$$

ここで、

D_{sz} は、接合部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz1} は、第1の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{haz2} は、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

20

D_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

H_{sz} は、接合部の硬さの平均値、

H_{bm1} は、第1の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

H_{bm2} は、第2の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

また、上記の電磁鋼帯の接合継手は、例えば、上述した本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法により得る(製造する)ことができる。

【0077】

[被接合材(第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯)]

30

第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯は、被接合材である電磁鋼帯である。第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯の成分組成は、冷間圧延段階の電磁鋼帯(電磁鋼板)として一般的なものであれば特に限定されない。

【0078】

このような電磁鋼帯の成分組成としては、 Si を2.0~5.0質量%の範囲で含有する成分組成を例示できる。また、 C :0.005質量%以下、 Si :2.0~5.0質量%、 Al :3.0質量%以下、 Mn :2.00質量%以下、 P :0.2質量%以下、 S :0.01質量%以下、および、 N :0.01質量%以下であり、残部が Fe および不可避的不純物である成分組成を例示できる。なお、上記の成分組成には、質量%で、任意に、 Sn :0.2%以下、 Sb :0.2%以下、 Ca :0.01%以下、 REM :0.05%以下、および、 Mg :0.01%以下からなる群から選ばれる少なくとも1種を含有させることができる。さらに、上記の成分組成には、質量%で、任意に、 Cr :1%以下、 Ni :1%以下、および、 Cu :1%以下からなる群から選ばれる少なくとも1種を含有させることができる。なお、 Si および Fe 以外の元素はいずれも0%であってもよい。

40

また、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の成分組成は、同じであっても、異なってもよい。

【0079】

第1の電磁鋼帯の板厚 t_1 および第2の電磁鋼帯の板厚 t_2 は特に限定されるものではないが、 t_1 および t_2 はそれぞれ、1.2~3.2mmが好適である。なお、 t_1 および t_2 は、同じであっても、異なってもよい。

50

【 0 0 8 0 】

また、被接合材である第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯において、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けていない領域を、母材部という。

【 0 0 8 1 】

また、母材部、ならびに、後述する接合部および熱加工影響部は、以下のようにして画定する。

すなわち、電磁鋼帯の接合継手を、図 3 に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面）が切断面となるように、板厚（鉛直）方向に切断する。ついで、切断面を研磨し、ピクリン酸飽和水溶液、ナイトール（硝酸とエタノールの溶液）または王水（濃塩酸と濃硝酸を 3 : 1 の体積比で混合した溶液）でエッチングする。ついで、当該切断面を光学顕微鏡で観察しエッチングの度合いなどから、母材部、ならびに、接合部および熱加工影響部を画定する。

10

【 0 0 8 2 】

〔 接 合 部 〕

接合部は、回転ツールと被接合材との摩擦熱と塑性流動による熱間加工を受け再結晶組織となる領域である。

【 0 0 8 3 】

接合部は、フェライト相主体の鋼組織、具体的には、面積率で 9 5 % 以上のフェライト相により構成される。フェライト相の面積率は 1 0 0 % であってもよい。また、フェライト相以外の残部組織の面積率は 5 % 以下である。フェライト相以外の残部組織としては、例えば、マルテンサイト、硫化物、窒化物や炭化物などの第二相等を例示できる。残部組織の面積率は 0 % であってもよい。

20

【 0 0 8 4 】

なお、フェライト相の面積率は、以下のようにして測定する。

すなわち、後述する接合部の測定領域が観察面に含まれるように、電磁鋼帯の接合継手から試験片を切り出す。なお、観察面は、図 3 に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面）とする。ついで、試験片の観察面を研磨後、3 v o l . % ナイトール、ピクリン酸飽和水溶液または王水でエッチングし、組織を現出させる。ついで、後述する接合部の測定領域内において、合計 1 0 視野を、光学顕微鏡により、倍率：5 0 0 倍で撮影する。ついで、得られた組織画像から、A d o b e S y s t e m s 社の A d o b e P h o t o s h o p を用いて、フェライト相の面積を 1 0 視野分算出する。ついで、視野ごとに算出したフェライト相の面積をそれぞれの視野領域の面積で除し、1 0 0 を乗じる。そして、それらの値の算術平均値を、フェライト相の面積率とする。

30

【 0 0 8 5 】

また、接合部の鋼組織を微細化する、具体的には、接合部の鋼組織を構成するフェライト結晶粒の粒径（以下、フェライト粒径ともいう）を小さくして次式（1）の関係を満足させることが重要である。これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性が高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生が有効に抑止される。

$$D_{sz} \leq 200 \mu\text{m} \cdot \dots (1)$$

40

ここで、

D_{sz} は、接合部のフェライト粒径の平均値（ μm ）、である。

【 0 0 8 6 】

ここで、 D_{sz} は、J I S G 0 5 5 1 に準拠して測定する。具体的には、以下のようにして測定する。

すなわち、電磁鋼帯の接合継手を、図 3 に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面）が切断面となるように、板厚（鉛直）方向に切断する。当該切断面において、接合垂直方向を X 軸、板厚方向を Y 軸とする。そして、接合垂直方向における接合部の中心位置で、かつ、板厚（鉛直）方向における被接合材の板厚中心位置を、X 軸と Y

50

軸の原点とする。接合垂直方向における接合部の中心位置は、例えば、突合せ継手の場合には、突合せギャップの中心位置であり、重ね継手の場合には、重ね合せ部の中心位置である。板厚（鉛直）方向における被接合材の板厚中心位置は、例えば、突合せ継手の場合には、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯のうち、板厚が小さい方の板厚中心位置であり、重ね継手の場合には、重ね合せ部の板厚中心位置である。そして、 $X = -0.2 \times t \sim +0.2 \times t$ 、 $Y = -0.2 \times t \sim +0.2 \times t$ の領域を測定領域とする。ここで、 t は、第1の電磁鋼帯の板厚および第2の電磁鋼帯の板厚の平均値（mm）である。ただし、上記の測定領域に、熱加工影響部や母材部といった接合部ではない領域が含まれる場合には、当該領域を測定領域から除くものとする。なお、 X 軸および Y 軸については、+および-を任意に設定すればよい。

10

そして、上記の測定領域内の任意の位置において、JIS G 0551「鋼 - 結晶粒度の顕微鏡試験方法」に準拠した切断法（試験線1mm当たりの捕捉した結晶粒数、または、交点の数 P によって評価する）により、接合部のフェライト粒径を計5回測定し、これらの平均値を Dsz とする。なお、接合部のフェライト粒径の測定領域を、以下、単に、接合部の測定領域ともいう。

【0087】

また、接合部と母材部の硬度差を低減する、具体的には、次式（4）の関係を満足させることが重要である。これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性が高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生が有効に抑止される。

20

$$0.9 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \quad Hsz \quad 1.2 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \quad \dots (4)$$

ここで、

Hsz は、接合部の硬さの平均値、

$Hbm1$ は、第1の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

$Hbm2$ は、第2の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

である。

【0088】

ここで、 Hsz 、 $Hbm1$ および $Hbm2$ は、JIS Z 2244に準拠して測定する。具体的には、それぞれ以下のようにして測定する。

30

すなわち、上記の切断面における上記の接合部の測定領域内の任意の5か所で、試験力：4.9Nの条件でピッカース硬さ（HV）を測定する。そして、これらの平均値を Hsz とする。

また、上記の切断面において、第1の電磁鋼帯の母材部の板厚中心位置 $\pm 0.2 \times t1$ の領域（板厚（鉛直）方向）のレベル）内、および、第2の電磁鋼帯の母材部の板厚中心位置 $\pm 0.2 \times t2$ の領域（板厚（鉛直）方向）のレベル）内の任意の5か所でそれぞれ、試験力：4.9Nの条件でピッカース硬さ（HV）を測定する。なお、接合垂直（水平）方向の位置については、母材部であればよく、任意に選択すればよい。そして、第1の電磁鋼帯の母材部および第2の電磁鋼帯の母材部で測定したピッカース硬さ（HV）の平均値をそれぞれ、 $Hbm1$ および $Hbm2$ とする。ここで、 $t1$ および $t2$ はそれぞれ、第1および第2の電磁鋼帯の板厚である。

40

【0089】

また、接合部の厚さは特に限定されるものではないが、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の厚さとの関係を適切に制御する、具体的には、次式（5）および（6）の関係を満足させることが好ましい。これにより、被接合材として電磁鋼帯を用いる場合であっても、コイル接合部の形状の劣化を招くことなくコイル接合部の機械的特性がより高まり、製造ラインでのコイル接合部の破断発生を一層有効に抑止することができる。

$$0.8 \times TbmL \quad TszL \quad \dots (5)$$

$$TszH \quad 1.3 \times TbmH \quad \dots (6)$$

ここで、

50

T s z L は、接合部の厚さの最小値 (mm)、
 T s z H は、接合部の厚さの最大値 (mm)、
 T b m L は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、薄い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、
 T b m H は、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯のうち、厚い方の電磁鋼帯の板厚 (mm)、
 である。ただし、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯の板厚が同じ場合には、T b m L = T b m H となる。

【 0 0 9 0 】

なお、T s z L および T s z H は、例えば、以下のようにして測定すればよい。すなわち、電磁鋼帯の接合継手を、図 3 に示す面 (すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面) が切断面となるように、板厚 (鉛直) 方向に切断する。そして、当該切断面において、ノギスなどを用いて、T s z L および T s z H を測定する。

【 0 0 9 1 】

[熱加工影響部]

熱加工影響部は、接合部に隣接し、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けるものの温度や加工が不十分で再結晶組織に至らない領域である。また、熱加工影響部は、接合部に隣接して、第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯の両側に形成される。

【 0 0 9 2 】

熱加工影響部は、接合部と同様、フェライト相主体の鋼組織、具体的には、面積率が 95% 以上のフェライト相により構成される。フェライト相の面積率は 100% であってもよい。また、フェライト相以外の残部組織の面積率は 5% 以下である。フェライト相以外の残部組織としては、例えば、マルテンサイト、硫化物、窒化物や炭化物などの第二相等を例示できる。残部組織の面積率は 0% であってもよい。フェライト相の面積率は、上述した方法と同様の要領で測定すればよい。

【 0 0 9 3 】

また、熱加工影響部でも、鋼組織を微細化する、具体的には、熱加工影響部のフェライト粒径を母材部のフェライト粒径以下にする。すなわち、次式 (2) および (3) の関係を満足させることが重要である。

$$D_{haz1} \leq D_{bm1} \quad \dots (2)$$

$$D_{haz2} \leq D_{bm2} \quad \dots (3)$$

ここで、

D h a z 1 は、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D h a z 2 は、第 2 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D b m 1 は、第 1 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

D b m 2 は、第 2 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μm)、

である。

【 0 0 9 4 】

ここで、D h a z 1、D h a z 2、D b m 1 および D b m 2 は、J I S G 0 5 5 1 に準拠して、接合部のフェライト粒径の平均値である D s z と同じ要領で測定する。

また、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の測定領域 (以下、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部の測定領域ともいう) は、以下のように設定する。すなわち、電磁鋼帯の接合継手を、図 3 に示す面 (すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面) が切断面となるように、板厚 (鉛直) 方向に切断する。上記の切断面において、接合垂直方向を X 軸、板厚方向を Y 軸とする。そして、第 1 の電磁鋼帯の板厚中心位置 (レベル) における接合部と第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部との境界位置を、X 軸と Y 軸の原点とする。X 軸については、第 1 の電磁鋼帯側を +、接合部側を - とし、 $X = 0 \sim + 0.4 \times t_1$ 、 $Y = - 0.2 \times t_1 \sim + 0.2 \times t_1$ の領域を測定領域とする。ここで、 t_1 は、第 1 の電磁鋼帯の板厚である。なお、Y 軸については、+ および - を任意に設定すればよい。ただし、上記の測定領域に、接合部や母材部といった第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響

10

20

30

40

50

部ではない領域が含まれる場合には、当該領域を測定領域から除くものとする。

【 0 0 9 5 】

上述のとおり、接合部は、回転ツールと被接合材との摩擦熱と塑性流動による熱間加工を受け再結晶組織となる領域をいう。熱加工影響部は、接合部に隣接する領域であり、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けるものの、温度や加工が不十分で再結晶に至らない組織となる領域をいう。母材は、摩擦熱と塑性流動による熱間加工の影響を受けない領域をいう。

【 0 0 9 6 】

同様に、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の測定領域（以下、第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部の測定領域ともいう）は、以下のように設定する。すなわち、電磁鋼帯の接合継手を、図3に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面）が切断面となるように、板厚（鉛直）方向に切断する。上記の切断面において、接合垂直方向をX軸、板厚方向をY軸とする。そして、第2の電磁鋼帯の板厚中心位置（レベル）における接合部と第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部との境界位置を、X軸とY軸の原点とする。X軸については、第2の電磁鋼帯側を+、接合部側を-とし、 $X = 0 \sim +0.4 \times t_2$ 、 $Y = -0.2 \times t_2 \sim +0.2 \times t_2$ の領域を測定領域とする。ここで、 t_2 は、第2の電磁鋼帯の板厚である。なお、Y軸については、+および-を任意に設定すればよい。ただし、上記の測定領域に、接合部や母材部といった第2の電磁鋼帯側の熱加工影響部ではない領域が含まれる場合には、当該領域を測定領域から除くものとする。

【 0 0 9 7 】

また、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の測定領域（以下、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯の母材部の測定領域ともいう）はそれぞれ、上記の切断面における第1の電磁鋼帯の母材部の板厚中心位置 $\pm 0.2 \times t_1$ の領域（板厚（鉛直）方向のレベル）および第2の電磁鋼帯の母材部の板厚中心位置 $\pm 0.2 \times t_2$ の領域（板厚（鉛直）方向のレベル）とすればよい。なお、接合垂直（水平）方向の位置については、母材部であればよく、任意に選択すればよい。ここで、 t_1 および t_2 はそれぞれ、第1および第2の電磁鋼帯の板厚である。

【 0 0 9 8 】

なお、継手形式としては、突合せ継手や重ね継手を例示できる。

【 0 0 9 9 】

[3] 電磁鋼帯の製造方法

次に、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造方法を、説明する。

本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造方法は、

上記の本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法により第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯とを接合し、接合鋼帯を得る工程と、

該接合鋼帯に冷間圧延を施し、冷延鋼帯を得る工程と、をそなえる。

ここで、接合鋼帯は、好適には、第1の電磁鋼帯と、第2の電磁鋼帯と、上記[2]の電磁鋼帯の接合継手とを有し、第1の電磁鋼帯および第2の電磁鋼帯が当該電磁鋼帯の接合継手を介して接合されている。

また、冷間圧延条件については特に限定されず、常法に従えばよい。また、第1の電磁鋼帯と第2の電磁鋼帯の接合後、冷間圧延を行う前に、任意に、酸洗を行ってもよい。

【 0 1 0 0 】

[4] 摩擦攪拌接合装置

次に、本発明の一実施形態に従う摩擦攪拌接合装置を、説明する。

本発明の一実施形態に従う摩擦攪拌接合装置は、上記[1]の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法に用いる、摩擦攪拌接合装置であって、

被接合材を把持する、把持装置と、

互いに対向する一対の回転ツールと、

前記回転ツールの回転と接合方向への移動とを可能とする駆動装置と、

前記被接合材の少なくとも一方の面において前記回転ツールの接合進行方向の前方に配

10

20

30

40

50

置される、加熱装置と、

前記把持装置、前記回転ツールの駆動装置および前記加熱装置の動作制御装置と、をそなえる。

【0101】

ここで、把持装置の態様としては、例えば、

- ・可動把持部材と、該可動把持部材のスライド装置と、を有するもの、および、
 - ・固定把持部材と、可動把持部材と、該可動把持部材のスライド装置と、を有するもの、
- が挙げられる。

【0102】

回転ツールの態様は、上記[1]の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法で例示したとおりである。

10

【0103】

回転ツールの駆動装置の態様としては、回転ツールの回転駆動部と、回転ツールの接合方向への移動装置とを有するものが挙げられる。回転駆動部および移動装置の駆動方式は特に限定されず、例えば、電動駆動方式によればよい。

【0104】

加熱装置の態様は、上記[1]の電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法で例示したとおりである。また、加熱装置には、回転ツールと連動して加熱装置を接合方向へ移動させる、移動装置が附帯される。移動装置の駆動方式は特に限定されず、例えば、電動駆動方式によればよい。

20

【0105】

動作制御装置の態様としては、各種設定値などのデータを入力する入力部と、入力されたデータを演算処理する演算部と、データ等を記憶する記憶装置と、演算部での演算処理結果に基づき、把持装置、回転ツールの駆動装置および加熱装置への動作信号を出力する出力部と、を有するものが挙げられる。

【0106】

また、被接合材の予熱温度を、上掲式(11)~(15)の範囲内に制御する観点から、被接合材の両面において $TPW=0$ 、 $TPW=0.2D$ および $TPW=0.5D$ を測定する、温度測定装置をさらにそなえることが好ましい。このような温度測定装置の態様としては、例えば、 $TPW=0$ 、 $TPW=0.2D$ および $TPW=0.5D$ 測定用として複数の放射型温度計を設置したものや、($TPW=0$ 、 $TPW=0.2D$ および $TPW=0.5D$ を含む範囲の温度を網羅して測定するように設定した)サーモグラフィなどが挙げられる。

30

【0107】

なお、上記以外の装置構成などについては特に限定されず、従来公知の摩擦攪拌接合装置の装置構成とすればよい。

【0108】

[5] 電磁鋼帯の製造装置

次に、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造装置を、説明する。

本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造装置は、上記[4]の摩擦攪拌接合装置をそなえるものである。

40

【0109】

また、本発明の一実施形態に従う電磁鋼帯の製造装置は、連続冷間圧延ラインにおいて、上記[4]の摩擦攪拌接合装置が、冷間圧延装置の上流側、または、酸洗装置および冷間圧延装置の上流側(上流側から、摩擦攪拌接合装置、酸洗装置および冷間圧延装置の順)に配置される。なお、酸洗装置および冷間圧延装置については、電磁鋼帯の連続冷間圧延ラインで一般的に使用されているものを好適に用いることができる。

【0110】

また、連続冷間圧延ラインとは、鋼帯を、冷間圧延装置により連続的に冷間圧延する製造ラインである。連続冷間圧延ラインは、例えば、鋼帯の搬送装置と、冷間圧延装置とをそなえる。連続冷間圧延ラインには、任意にさらに、酸洗装置や焼鈍炉、コーティング装

50

置などが附帯する場合もある。

【 0 1 1 1 】

なお、上記以外の装置構成などについては特に限定されず、従来公知の電磁鋼帯の製造装置の装置構成とすればよい。

【実施例】

【 0 1 1 2 】

以下、本発明の作用および効果について、実施例を用いて説明する。なお、本発明は以下の実施例に限定されない。

【 0 1 1 3 】

表 1 に示す成分組成（残部は Fe および不可避免的不純物）を有する電磁鋼帯を被接合材（第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯）とした。そして、表 2 に記載の予熱条件および表 3 に記載の接合条件の予熱式摩擦攪拌接合により、連続冷間圧延ライン上にあることを模擬して第 1 の電磁鋼帯（先行鋼帯）と第 2 の電磁鋼帯（後行工程）とを予熱したうえで接合し、電磁鋼帯の接合継手を製造した。ここで、突合せ接合の場合は、開先を被接合材である 2 枚の電磁鋼帯の端面に開先角度をつけないいわゆる I 型開先とし、フライス加工程度の表面状態で 2 枚の電磁鋼帯を突合せ、接合を行った。後述する表 3 および表 4 の場合も同様である。なお、表 1 に、電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値、硬さの平均値およびエリクセン値を併記している。ここで、電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値および硬さの平均値は、上述の方法により求めたものである。また、エリクセン値は、JIS Z 2247 で規定するエリクセン試験方法に準拠して測定した値である。なお、明記していない条件については、常法に従い、設定した。

【 0 1 1 4 】

なお、予熱工程では、加熱装置を回転ツールに連動させて（接合速度と同じ速度で）接合方向に移動させた。また、加熱装置には高周波誘導加熱装置を用いた。より具体的には、最大出力 100 kW、周波数帯 70 ~ 90 kHz の高周波電源を、長さ 100 mm、幅 30 mm の四角形の誘導加熱コイルに接続した。そして、当該誘導加熱コイルを、長さ 100 mm の辺が接合進行方向に平行となり、かつ、被接合材の片面または両面において表面から板厚方向に 10 mm 離れた位置となるように設置した。なお、表 2 中の加熱装置の配置において、「片面」と記載しているものは、被接合材の片面（表（オモテ）面）のみに加熱装置を配置したものの、「両面」と記載しているものは、被接合材の両面（表（オモテ）面および裏面の両方）に加熱装置を配置したものを意味する。また、摩擦攪拌接合装置に設けたサーモグラフィにより、被接合材の両面において予熱温度を測定した。測定した被接合材の予熱温度を、表 2 に併記する。なお、 $TPW = 0.2D$ および $TPW = 0.5D$ は接合中央線を挟んでアドバンシングサイド（第 1 の電磁鋼帯側）とリトリートイングサイド（第 2 の電磁鋼帯側）の両方で測定したが、ほぼ同じ温度であった。そのため、ここでは、代表して、アドバンシングサイドでの測定温度のみを記載している。また、比較のため、一部の条件では予熱を行わなかった。

【 0 1 1 5 】

また、接合工程では、鉛直方向上側に配置する表面側回転ツールの回転方向を鉛直方向上側から見て時計回りに回転させ、鉛直方向下側に配置する裏面側回転ツールを鉛直方向上側から見て反時計回りに回転させた。すなわち、それぞれの回転ツールの先端部を正面視した状態では、どちらも反時計回りに回転させた。また、図 2 A および B に示した 2 種類の断面寸法および形状の回転ツールのいずれかを用いた。また、表面側回転ツールと裏面側回転ツールは、同じ断面寸法および形状の回転ツールを用いた。なお、これらの回転ツールはいずれも、被接合材よりも硬いピッカース硬さ HV 1090 の炭化タングステン（WC）を素材としたものである。また、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯の板厚が異なる場合には、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯の突合せ部は裏面（裏面側回転ツールを配置する側の面）を段差のない状態とし、表面（表面側回転ツールを配置する側の面）を段差がある状態とした。また、第 1 の電磁鋼帯（先行鋼帯）をアドバンシングサイド、第 2 の電磁鋼帯（後行鋼帯）をリトリートイングサイドとなるように接合した。

また、重ね接合の場合は、第 1 の電磁鋼帯（先行鋼帯）を重ねの上側、第 2 の電磁鋼帯（後行鋼帯）を重ねの下側となるように接合した。回転ツールの回転方向および回転ツールの形状などは、突合せ接合の場合と同様である。

【 0 1 1 6 】

また、比較のため、表 4 に記載の被接合材（第 1 の電磁鋼帯および第 2 の電磁鋼帯）に対し、表 4 の記載の条件のレーザー溶接により、第 1 の電磁鋼帯と第 2 の電磁鋼帯とを接合し、電磁鋼帯の接合継手を製造した。

【 0 1 1 7 】

レーザー溶接では、最大出力 5 . 5 k W の C O ₂ レーザ発振器を用いた。シールドガスにはヘリウムを使用し、シールドガス流量は 4 0 リットル / 分とした。表 4 中の「フィルターワイヤ添加」が「無」のものはフィルターワイヤを使用せずに、溶接を行ったものである。また、表 4 中の「フィルターワイヤ添加」が「有」のものは、フィルターワイヤとして表 5 に示す成分組成（残部は F e および不可避免的不純物）を有する M I G 用ワイヤ（ 0 . 9 m m ）を使用し、溶接を行ったものである。

【 0 1 1 8 】

かくして得られた電磁鋼帯の接合継手について、上述の要領により、接合部、熱加工影響部および母材部を画定した。

また、上述の要領により、

D s z : 接合部のフェライト粒径の平均値 (μ m)、

D h a z 1 : 第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μ m)、

D h a z 2 : 第 2 の電磁鋼帯側の熱加工影響部のフェライト粒径の平均値 (μ m)、

D b m 1 : 第 1 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μ m)、

D b m 2 : 第 2 の電磁鋼帯の母材部のフェライト粒径の平均値 (μ m)、

H s z : 接合部の硬さの平均値、

H b m 1 : 第 1 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

H b m 2 : 第 2 の電磁鋼帯の母材部の硬さの平均値

を測定した。

さらに、得られた電磁鋼帯の接合継手の鉛直方向の切断面（図 3 に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面））において、T s z L : 接合部の厚さの最小値 (m m) および T s z H : 接合部の厚さの最大値 (m m) を測定した。

なお、レーザー溶接により得た電磁鋼帯の接合継手では、溶接部を接合部、熱影響部を熱加工影響部と見做して、上記の測定を行った。測定要領などは、摩擦攪拌接合により得た電磁鋼帯の接合継手の場合と同じである。

結果を表 6 および表 7 に示す。なお、後述する表面欠陥および内部欠陥の確認において、欠陥が確認された場合には、上記の測定を省略した。また、表面欠陥が確認された場合には、内部欠陥の確認も省略した。

【 0 1 1 9 】

また、得られた電磁鋼帯の接合継手について、以下の要領で、(I) 表面欠陥の有無および (I I) 内部欠陥の有無を確認した。結果を表 8 に示す。

【 0 1 2 0 】

(I) 表面欠陥の有無

得られた電磁鋼帯の接合継手の接合部および熱加工影響部（レーザー溶接の場合は、溶接部および熱影響部）の表面および裏面において、未接合状態および割れの有無を目視により確認した。そして、以下の基準により、表面欠陥の有無を判定した。

表面欠陥無し：未接合状態および割れがいずれも確認されない。

表面欠陥有り：未接合状態および割れの少なくとも一方が確認される。

【 0 1 2 1 】

(I I) 内部欠陥の有無

得られた電磁鋼帯の接合継手を、図 3 に示す面（すなわち、接合垂直方向と板厚方向とが含まれる面）が観察面となるように、板厚（鉛直）方向に切断して試験片を採取した。

なお、接合方向における切断位置は、接合（溶接）開始側の被接合材の端部から 20 mm の位置、接合（溶接）終了側の被接合材の端部から 20 mm の位置、および、被接合材の両端部の中間となる位置とした。そして、当該切断位置での切断面が観察面となるように、合計 3 枚の試験片を採取した。ついで、得られた試験片の観察面を、光学顕微鏡（倍率：10 倍）で観察した。そして、以下の基準により、内部欠陥の有無を判定した。

内部欠陥無し：3 枚の試験片全てにおいて、接合部に未接合状態および割れがいずれも確認されない。

内部欠陥有り：少なくとも 1 枚の試験片において、接合部に未接合状態および割れの少なくとも一方が確認される。

【0122】

また、得られた電磁鋼帯の接合継手について、以下の要領で、製造ラインでのコイル接合部の破断発生の抑止効果（以下、破断抑止効果ともいう）を評価した。

【0123】

すなわち、得られた電磁鋼帯の接合継手から、接合部、第 1 の電磁鋼帯側の熱加工影響部および母材ならびに第 2 の電磁鋼帯側の熱加工影響部および母材が含まれるように、試験片を採取した。ついで、採取した試験片を用い、JIS Z 2247 で規定するエリクセン試験方法に準拠して接合継手のエリクセン値を測定した。そして、母材部のエリクセン値に対する接合継手のエリクセン値の比率（以下、エリクセン値の比率ともいう）により、以下の基準で破断抑止効果を評価した。結果を表 8 に示す。

[エリクセン値の比率(%)] = [接合継手のエリクセン値] / [母材部のエリクセン値] × 100

○（合格）：エリクセン値の比率が 80 % 以上

×（不合格）：エリクセン値の比率が 80 % 未満

なお、第 1 の電磁鋼帯の母材部のエリクセン値と第 2 の電磁鋼帯の母材部のエリクセン値が異なる場合、母材部のエリクセン値は、第 1 の電磁鋼帯の母材部のエリクセン値と第 2 の電磁鋼帯の母材部のエリクセン値のうち小さい方の値とする。

【0124】

10

20

30

40

50

【表 1】

表 1

鋼種	板厚 (mm)	成分組成(質量%)					母材部の フェライト粒径 平均値 (μm)	母材部の 硬さの平均値 (HV)	母材部の エリクセン値 (mm)
		C	Si	Mn	P	S			
B1-1	2.0	0.02	2.5	0.01	0.015	0.006	280	219	12.4
B1-2	2.6	0.02	2.5	0.01	0.015	0.006	280	219	13.5
B2-1	2.0	0.01	3.5	0.02	0.012	0.006	310	242	3.5
B2-2	2.6	0.01	3.5	0.02	0.012	0.006	310	242	3.8

【 0 1 2 5 】

10

20

30

40

50

【表 2】

表2

予熱条件	継手形式	被接合材						加熱装置の配置	予熱条件			
		第1の電磁鋼帯		第2の電磁鋼帯		t (mm)	TJ (mm)		表面側		裏面側	
		鋼種	板厚 t1 (mm)	鋼種	板厚 t2 (mm)				周波数 (kHz)	出力 (kW)	周波数 (kHz)	出力 (kW)
1	突合せ	B2-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	片面	104	12	-	-
2	突合せ	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	両面	104	12	104	12
3	突合せ	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	片面	98	22	-	-
4	突合せ	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	2.0	両面	98	22	98	22
5	突合せ	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	2.0	片面	83	46	-	-
6	突合せ	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	2.6	両面	83	46	83	46
7	突合せ	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	2.6	片面	83	46	-	-
8	突合せ	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	両面	83	46	83	46
9	突合せ	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	片面	53	97	-	-
10	突合せ	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	両面	53	97	53	97
11	重ね	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	4.0	両面	98	22	98	22

10

20

30

40

50

表2(続き)

予熱条件	継手形式	予熱温度(°C)												(11)式	(12)式	(13)式	(14)式	(15)式
		表面側						裏面側										
		TP _{W=0}	TP _{W=0.2D}	TP _{W=0.5D}	TP _{W=0.2D} / TP _{W=0}	TP _{W=0.5D} / TP _{W=0}	TP _{W=0}	TP _{W=0.2D}	TP _{W=0.5D}	TP _{W=0.2D} / TP _{W=0}	TP _{W=0.5D} / TP _{W=0}	TP _{W=0}	TP _{W=0.2D} / TP _{W=0}					
1	突合せ	80	60	30	0.75	0.38	60	40	30	0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	×	×	×	×
2	突合せ	140	110	60	0.79	0.43	140	110	60	0.79	0.43	0.43	0.79	0.43	○	○	○	○
3	突合せ	170	120	60	0.71	0.35	130	100	50	0.77	0.38	0.38	0.77	0.38	○	○	○	○
4	突合せ	300	220	100	0.73	0.33	300	220	100	0.73	0.33	0.33	0.73	0.33	○	○	○	○
5	突合せ	500	400	210	0.80	0.42	420	320	150	0.76	0.36	0.36	0.76	0.36	○	○	○	○
6	突合せ	590	470	250	0.80	0.42	590	470	250	0.80	0.42	0.42	0.80	0.42	○	○	○	○
7	突合せ	440	350	170	0.80	0.39	350	280	120	0.80	0.34	0.34	0.80	0.34	○	○	○	○
8	突合せ	500	400	210	0.80	0.42	500	400	210	0.80	0.42	0.42	0.80	0.42	○	○	○	○
9	突合せ	990	910	400	0.92	0.40	910	820	350	0.90	0.38	0.38	0.90	0.38	○	○	○	○
10	突合せ	1180	800	550	0.68	0.47	1180	800	550	0.68	0.47	0.47	0.68	0.47	×	○	×	×
11	重ね	450	352	170	0.78	0.38	450	352	170	0.78	0.38	0.38	0.78	0.38	○	○	○	○

○ 当該式の関係を満たす
 × 当該式の関係を満たさない

【 0 1 2 6 】

10

20

30

40

50

【表 3】

表3

継手形式	被接合材						回転ツール				接合条件					(10)式	(9)式	(8)式	(7)式			
	第1の電磁鋼帯		第2の電磁鋼帯		t (mm)	TJ (mm)	予熱条件	形状	肩径 D (mm)	ピン径 (mm)	ピン長さ (mm)	傾斜角度 α (°)	肩部間隙 G (mm)	回転数						接合速度 JS (mm/分)	RS x D ³ /JS	
	鋼種	板厚 t1 (mm)	鋼種	板厚 t2 (mm)										表面側	裏面側							
発明例1	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	2	図2A	13	4	0.6	1.5	1.20	3000	3000	6000	1099	○	○	○	○	
発明例2	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	3	図2B	20	6.7	0.9	1	1.50	1700	1700	5000	2720	○	○	○	○	
発明例3	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	2.0	4	図2A	13	4	0.6	1.5	0.90	2500	2500	6000	915	○	○	○	○	×
発明例4	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	2.0	5	図2B	20	6.7	0.9	1.5	1.90	1000	1000	4000	2000	○	○	○	○	×
発明例5	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	2.6	6	図2A	13	4	0.6	2	1.80	1800	1800	5000	791	○	○	○	○	○
発明例6	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	2.6	7	図2B	20	6.7	0.9	1.5	2.00	800	800	5000	1280	○	○	○	○	○
発明例7	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	8	図2A	13	4	0.6	1.5	2.20	2200	2200	6000	806	○	○	○	○	○
発明例8	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	9	図2A	13	4	0.6	1.5	2.40	2000	2000	6000	732	○	○	○	○	×
発明例9	B2-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	1	図2B	20	6.7	0.9	1.5	1.50	1300	1300	3500	2971	○	○	○	○	○
発明例10	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	10	図2A	13	4	0.6	1.5	1.70	2200	2200	6000	806	○	○	○	○	○
発明例11	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	11	図2B	20	6.7	0.9	1.5	3.00	2000	2000	3500	4571	○	○	○	○	○
比較例1	B1-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	2.0	予熱なし	図2A	13	4	0.6	1	1.20	3000	3000	6000	1099	○	○	○	○	○
比較例2	B1-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	2.6	予熱なし	図2B	20	6.7	0.9	2	1.10	800	800	5000	1280	○	○	○	○	×
比較例3	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	予熱なし	図2B	20	6.7	0.9	1.5	3.00	2000	2000	3500	4571	○	○	○	○	○

○ 当該式の関係は満足する
× 当該式の関係は満足しない

【 0 1 2 7 】

10

20

30

40

50

【 表 4 】

表4

継手形式	接合方式	被接合材						接合条件				ファイラワイヤ添加	
		第1の電磁鋼帯		第2の電磁鋼帯		t (mm)	TJ (mm)	電磁鋼帯間ギャップ (mm)	レーザ出力 (kW)	レーザビーム径 (mm)	溶接速度 (mm/分)	有無	ファイヤ供給速度 (m/分)
		鋼種	板厚 t1 (mm)	鋼種	板厚 t2 (mm)								
比較例4	突合せ	レーザ	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	2.0	2.5	0.5	1500	無	-
比較例5	突合せ	レーザ	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	0	3.0	0.5	1250	無	-
比較例6	突合せ	レーザ	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	0	2.5	0.5	1500	無	-
比較例7	突合せ	レーザ	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	0	3.0	0.5	1250	無	-
比較例8	突合せ	レーザ	B1-1	2.0	B1-1	2.0	2.0	0.3	5.0	0.5	1300	有	3.0
比較例9	突合せ	レーザ	B1-2	2.6	B1-2	2.6	2.6	0.3	5.0	0.5	1000	有	3.0
比較例10	突合せ	レーザ	B2-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	0.3	5.0	0.5	1300	有	3.0
比較例11	突合せ	レーザ	B2-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	0.3	5.0	0.5	1000	有	3.0
比較例12	突合せ	レーザ	B1-1	2.0	B2-1	2.0	2.0	0.3	5.0	0.5	1300	有	3.0
比較例13	突合せ	レーザ	B1-2	2.6	B2-2	2.6	2.6	0.3	5.0	0.5	1000	有	3.0

【 0 1 2 8 】

10

20

30

40

50

【表 5】

記号	成分組成(質量%)										残部 Feおよび不純物
	C	Si	Mn	Al	Ti	Ni	Cr	Mo	Nb+Ta		
F1	0.02	0.29	0.07	0.15	0.17	61.3	22.2	9.2	3.51		

表5

【 0 1 2 9 】

10

20

30

40

50

【表 6】

表6	継手形式	被接合材										接合部					熱加工影響部							
		第1の電磁鋼帯					第2の電磁鋼帯					フェライト相面積率 (%)	Dsz (μm)	Hsz	TszL (mm)	TszH (mm)	第1の電磁鋼帯側		第2の電磁鋼帯側					
		鋼種	Dbm1 (μm)	Hbm1 (mm)	板厚 (mm)	鋼種	Dbm2 (μm)	Hbm2 (mm)	板厚 (mm)	TbmL (mm)	TbmH (mm)						フェライト相面積率 (%)	Dhaz1 (μm)	フェライト相面積率 (%)	Dhaz2 (μm)	フェライト相面積率 (%)			
発明例1	突合せ	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	201	99	203	99
発明例2	突合せ	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	208	99	210	99
発明例3	突合せ	B2-1	310	242	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	240	99	235	99
発明例4	突合せ	B2-1	310	242	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	287	99	290	99
発明例5	突合せ	B1-2	280	219	2.6	B1-2	280	219	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	99	204	99	206	99
発明例6	突合せ	B1-2	280	219	2.6	B1-2	280	219	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	99	210	99	208	99
発明例7	突合せ	B2-2	310	242	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	99	273	99	278	99
発明例8	突合せ	B2-2	310	242	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	99	291	99	295	99
発明例9	突合せ	B2-1	310	242	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	200	99	198	99
発明例10	突合せ	B2-2	310	242	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	99	308	99	307	99
発明例11	重ね	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	99	253	99	251	99
比較例1	突合せ	B1-1	280	219	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	-	-	-	-
比較例2	突合せ	B1-2	280	219	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	-	-	-	-	-
比較例3	重ね	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	-	-	-	-	-

【 0 1 3 0 】

10

20

30

40

50

【表 7】

表7	継手形式	接合方式	被接合材												接合部					熱加工影響部		
			第1の電磁鋼帯				第2の電磁鋼帯				フェライト相面積率 (%)	Dsz (μm)	Hsz (mm)	TszL (mm)	TszH (mm)	第1の電磁鋼帯側		第2の電磁鋼帯側				
			鋼種	Dbm1 (μm)	Hbm1 (mm)	板厚 (mm)	鋼種	Dbm2 (μm)	Hbm2 (mm)	板厚 (mm)						TbmL (mm)	TbmH (mm)	フェライト相面積率 (%)	Dhaz1 (μm)	フェライト相面積率 (%)	Dhaz2 (μm)	
																						フェライト相面積率 (%)
比較例4	突合せ	レーザー	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	99	410	218	1.9	2.2	99	310	99	327
比較例5	突合せ	レーザー	B1-2	280	219	2.6	B1-2	280	219	2.6	2.6	2.6	2.6	99	453	215	2.6	2.7	99	326	99	321
比較例6	突合せ	レーザー	B2-1	310	242	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	99	437	240	2.0	2.1	99	351	99	346
比較例7	突合せ	レーザー	B2-2	310	242	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	99	440	238	2.5	2.8	99	367	99	372
比較例8	突合せ	レーザー	B1-1	280	219	2.0	B1-1	280	219	2.0	2.0	2.0	2.0	43	23	271	2.0	2.7	99	338	99	362
比較例9	突合せ	レーザー	B1-2	280	219	2.6	B1-2	280	219	2.6	2.6	2.6	2.6	40	31	265	2.6	3.5	99	359	99	355
比較例10	突合せ	レーザー	B2-1	310	242	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	49	19	283	2.0	2.5	99	388	99	395
比較例11	突合せ	レーザー	B2-2	310	242	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	46	28	278	2.6	3.5	99	399	99	413
比較例12	突合せ	レーザー	B1-1	280	219	2.0	B2-1	310	242	2.0	2.0	2.0	2.0	45	25	276	2.0	2.5	99	352	99	392
比較例13	突合せ	レーザー	B1-2	280	219	2.6	B2-2	310	242	2.6	2.6	2.6	2.6	48	21	281	2.6	3.3	99	377	99	401

【 0 1 3 1 】

10

20

30

40

50

【表 8】

表8

	(1)式	(2)式	(3)式	(4)式	(5)式	(6)式	表面 欠陥	内部 欠陥	接合継手の エリクセン値 (mm)	エリクセン値の 比率 (%)
発明例1	○	○	○	○	○	○	無し	無し	12.1	98
発明例2	○	○	○	○	○	○	無し	無し	11.6	94
発明例3	○	○	○	○	×	○	無し	無し	3.2	91
発明例4	○	○	○	○	○	○	無し	無し	2.9	83
発明例5	○	○	○	○	○	○	無し	無し	13.1	97
発明例6	○	○	○	○	○	○	無し	無し	13.4	99
発明例7	○	○	○	○	○	○	無し	無し	3.2	84
発明例8	○	○	○	○	○	○	無し	無し	3.2	84
発明例9	○	○	○	○	○	○	無し	無し	3.3	94
発明例10	○	○	○	○	○	○	無し	無し	3.1	82
発明例11	○	○	○	○	○	○	無し	無し	10.1	81
比較例1	-	-	-	-	-	-	無し	有り	-	-
比較例2	-	-	-	-	-	-	無し	有り	-	-
比較例3	-	-	-	-	-	-	無し	有り	-	-
比較例4	×	×	×	○	○	○	無し	無し	9.5	77
比較例5	×	×	×	○	○	○	無し	無し	10.0	74
比較例6	×	×	×	○	○	○	無し	無し	1.1	31
比較例7	×	×	×	○	○	○	無し	無し	2.3	61
比較例8	○	×	×	×	○	×	無し	無し	9.8	79
比較例9	○	×	×	×	○	×	無し	無し	9.7	72
比較例10	○	×	×	○	○	○	無し	無し	2.5	71
比較例11	○	×	×	○	○	×	無し	無し	2.2	58
比較例12	○	×	×	○	○	○	無し	無し	2.3	66
比較例13	○	×	×	×	○	○	無し	無し	2.6	68

○ 当該式の関係満足する
 × 当該式の関係満足しない

【0132】

表8より、発明例ではいずれも、接合速度：3500mm/分以上という高速度での接合を行いつつ、欠陥がなく、優れた破断抑止効果を有する電磁鋼帯の接合継手が得られた。

一方、比較例では、接合速度：3500mm/分以上の接合を行った場合、欠陥が生じたり、十分な破断抑止効果が得られなかった。

【符号の説明】

【0133】

- 1 第1の電磁鋼帯（被接合材）
- 2 第2の電磁鋼帯（被接合材）
- 3 - 1 回転ツール（表面側回転ツール）
- 3 - 2 回転ツール（裏面側回転ツール）
- 4 接合部
 - 4 - 1 熱加工影響部（第1の電磁鋼帯側）
 - 4 - 2 熱加工影響部（第2の電磁鋼帯側）
- 5 - 1、5 - 2 肩部
- 6 - 1、6 - 2 プローブ
- 7 把持装置

10

20

30

40

50

- 9 - 1、9 - 2 先端部
- 10 - 1 加熱装置（表面側加熱装置）
- 10 - 2 加熱装置（裏面側加熱装置）
- 11 回転ツールの駆動装置
- 12 動作制御装置

【要約】

高い施工能率の下、コイル接合部の機械的特性の劣化や形状の劣化による製造ラインでのコイル接合部の破断発生を抑止することができる、電磁鋼帯の摩擦攪拌接合方法を提供する。予熱式両面摩擦攪拌接合を行うとともに、接合により形成される接合部および熱加工影響部の鋼組織がそれぞれ、フェライト相主体の組織となり、かつ、次式（1）～（4）の関係と同時に満足する条件により、接合を行う。

10

$$Dsz \quad 200 \mu m \quad \dots (1)$$

$$Dhaz1 \quad Dbm1 \quad \dots (2)$$

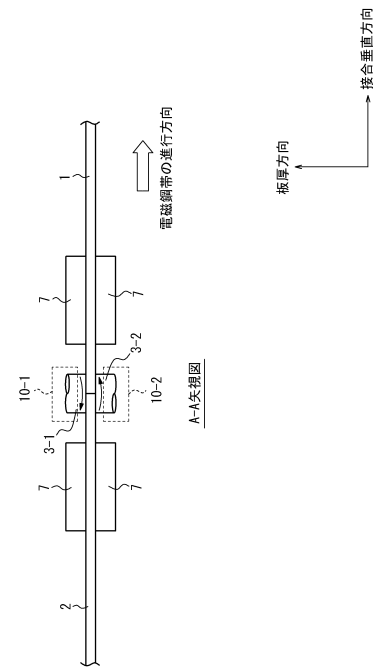
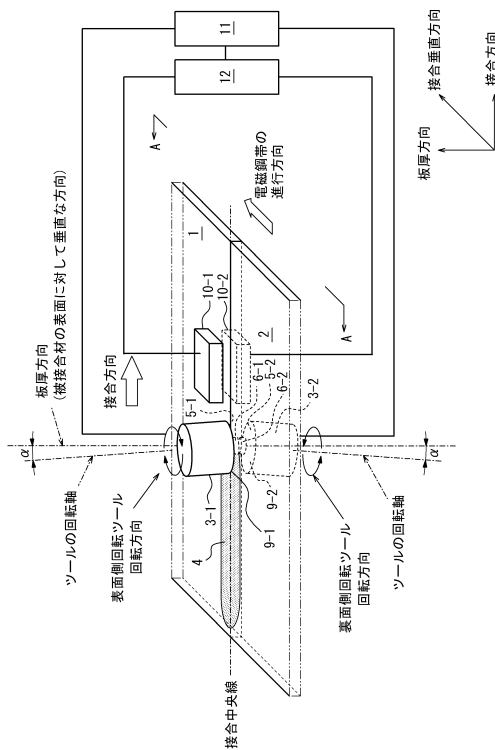
$$Dhaz2 \quad Dbm2 \quad \dots (3)$$

$$0.9 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \quad Hsz \quad 1.2 \times (Hbm1 + Hbm2) / 2 \quad \dots (4)$$

【図面】

【図1A】

【図1B】



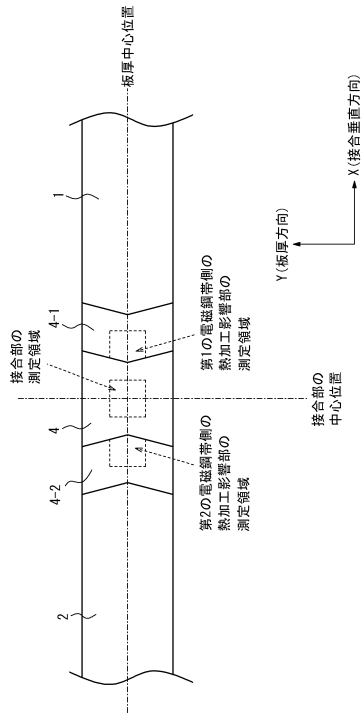
20

30

40

50

【 図 3 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

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 富田 海

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 黒石 孝志

(56)参考文献 特開2020-124739(JP,A)

国際公開第2021/060176(WO,A1)

特開2018-95956(JP,A)

特開2012-40584(JP,A)

国際公開第2011/024320(WO,A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

B23K 20/12