

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7570998号
(P7570998)

(45)発行日 令和6年10月22日(2024.10.22)

(24)登録日 令和6年10月11日(2024.10.11)

(51)国際特許分類	F I
B 2 3 K 11/20 (2006.01)	B 2 3 K 11/20
B 2 3 K 11/11 (2006.01)	B 2 3 K 11/11 5 4 0
B 2 3 K 11/16 (2006.01)	B 2 3 K 11/16 3 1 1
B 2 3 K 103/20 (2006.01)	B 2 3 K 103:20

請求項の数 15 (全18頁)

(21)出願番号	特願2021-177025(P2021-177025)	(73)特許権者	000003609 株式会社豊田中央研究所 愛知県長久手市横道4 1 番地の1
(22)出願日	令和3年10月29日(2021.10.29)	(73)特許権者	000003207 トヨタ自動車株式会社 愛知県豊田市トヨタ町1 番地
(65)公開番号	特開2023-66438(P2023-66438A)	(74)代理人	100113664 弁理士 森岡 正往
(43)公開日	令和5年5月16日(2023.5.16)	(74)代理人	110001324 特許業務法人SANSUI国際特許事務所
審査請求日	令和5年4月28日(2023.4.28)	(72)発明者	松岡 秀明 愛知県長久手市横道4 1 番地の1 株式会社豊田中央研究所内
		(72)発明者	門浦 弘明

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 金属接合体の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

接合する鉄基体とアルミニウム基体の各外表面に圧接させた電極から通電して、該鉄基体と該アルミニウム基体の被接合部で、該鉄基体の固相上に該アルミニウム基体の液相を生成させる加熱工程と、

該加熱工程後の被接合部を冷却する冷却工程とを備え、

該加熱工程前に、該被接合部の接触を馴染ませるプレ通電工程が電流値：5 ~ 9 . 5 k A でなされ、

該加熱工程は、電流値：1 0 ~ 1 5 k A で、該プレ通電工程よりも長い通電時間：2 0 0 ~ 5 0 0 m s でなされた金属接合体が得られる製造方法。

10

【請求項2】

前記加熱工程は、前記通電時間に対して前記電流値を単調増加させてなされる請求項1に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項3】

前記プレ通電工程後で前記加熱工程前に、非通電または該プレ通電工程よりも低い電流値の通電を行い、前記鉄基体と前記アルミニウム基体を降温させる請求項1または2に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項4】

前記降温は、1 0 ~ 2 0 0 m s なされる請求項3に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項5】

20

前記電極による前記鉄基体と前記アルミニウム基体への加圧力は、2 ~ 6 kNである請求項1 ~ 4のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

【請求項6】

前記金属接合体は、前記鉄基体と前記アルミニウム基体が接合層を介して接合されてなり、

該接合層は、該鉄基体側にできた第1金属間化合物からなる第1層と、該アルミニウム基体側にできた第2金属間化合物からなる第2層とを有し、

該第1層は、該アルミニウム基体の液相が該鉄基体の結晶粒界から浸透してできた該第1金属間化合物中に、未反応な状態で残存した該鉄基体の結晶粒の一部が該鉄基体側から一体的に連なって延びる第1突起を有する請求項1 ~ 5のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

10

【請求項7】

前記第2層は、前記第2金属間化合物からなり、前記アルミニウム基体中に延びる第2突起を有する請求項6に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項8】

前記第1金属間化合物は、 Al_5Fe_2 を含み、

前記第2金属間化合物は、 Al_3Fe を含む請求項6または7に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項9】

前記第1層の厚さは1 ~ 10 μm である請求項6 ~ 8のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

20

【請求項10】

前記第1層と前記第2層を合せた厚さは2 ~ 15 μm である請求項6 ~ 9のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

【請求項11】

前記第1突起は、前記第1層の基準長(50 μm)あたり2 ~ 60本ある請求項6 ~ 10のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

【請求項12】

前記第1突起の幅(w)に対する前記第1層の厚さ(t_1)の比率(t_1/w)は1 ~ 20である請求項6 ~ 11のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

30

【請求項13】

前記鉄基体は、鋼板であり、

前記アルミニウム基体は、アルミニウム合金板であり、

該鋼板と該アルミニウム合金板がスポット接合されてなる請求項6 ~ 12のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

【請求項14】

前記鋼板は、前記アルミニウム合金板側に表面処理層を有する請求項13に記載の金属接合体の製造方法。

【請求項15】

車両用パネルに用いられる請求項6 ~ 14のいずれかに記載の金属接合体の製造方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、鉄基体とアルミニウム基体の接合体等に関する。

【背景技術】

【0002】

軽量化や高機能化を図るため、異種金属を接合した部材(異種金属接合体という。)が用いられる。例えば、骨格やフレームをなす鋼板に、外装面を構成する軽量のアルミニウム合金板を接合したルーフ、アウターパネル等が自動車に用いられつつある。

【0003】

50

異種な金属板は、これまで主に、リベット接合（Self-Pirceing Rivet接合等）やカシメ接合（クリンチング）等されてきた。このような機械的な接合法は、副資材（リベット等）や専用設備を必要とし、接合体の重量やコストを増加させ得る。また、機械的に接合された部位にできる突起は、周辺部材との干渉や作業性の低下等を招き得る。

【0004】

そこで異種な金属板（特に鋼板とアルミニウム合金板）も、鋼板同士と同様に、スポット溶接で接合する提案がなされており、例えば、下記の特許文献に関連した記載がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】特開2006-289452

【文献】特開2013-78804

【文献】特開2013-27890

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

特許文献1～3には、鋼板とアルミニウム合金板の間に、一定な大電流を短時間だけ通電して、それらをスポット溶接した接合体に関する記載がある。電流（密度）値は、アルミニウム合金板自体を抵抗加熱（ジュール加熱）により直接溶融させるために、大きく設定されている。また通電時間は、脆弱な金属間化合物からなる接合層を薄くするために、短く設定されている。

【0007】

いずれの接合体も、略均質的なAl₅Fe₂層が接合界面近傍の鋼板側に、略一定の厚さで形成されていた。本発明者が調査研究したところ、そのような接合体は、接合品質（接合強度、耐久性等）が安定せず、信頼性に欠けるため、殆ど実用化がされていなかった。

【0008】

本発明は、このような事情に鑑みて為されたものであり、実用に適した異種金属の接合体等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】

【0009】

本発明者はこの課題を解決すべく鋭意研究した結果、鉄基体とアルミニウム基体の接合層を、金属間化合物中に鉄基体の一部が杭状に突出した構造（「パイル（Pile）構造」という。）とすることで、信頼性に優れた金属接合体を得ることに成功した。この成果を発展させることにより、以降に述べる本発明を完成させるに至った。

【0010】

《金属接合体》

本発明は、鉄基体とアルミニウム基体が接合層を介して接合された金属接合体であって、該接合層は、該鉄基体側にできた第1金属間化合物からなる第1層と該アルミニウム基体側にできた第2金属間化合物からなる第2層とを有し、該第1層は、該鉄基体から一体的に連なって該第1金属間化合物中へ杭状に延びる第1突起を有する金属接合体である。

【0011】

本発明の金属接合体は、安定した接合強度が得られ、信頼性が高く、実用化が可能となる。このような優れた効果が得られる理由は次のように考えられる。本発明に係る第1層は、鉄基体から連なる杭状の第1突起（パイル）が、第1金属間化合物中へ延びた複合組織（パイル構造）からなる。第1金属間化合物は、第1突起により 歯状となった鉄基体とアンカー効果等により強固に接合される。さらに、鉄基材からなる高靱性または高延性な第1突起により、第1金属間化合物内に生じる亀裂の進展や伝播が十分に抑止され得る。こうして本発明の金属接合体は、少なくとも鉄基体側において、強固な接合状態が安定して維持されるようになったと考えられる。

【0012】

10

20

30

40

50

《金属接合体の製造方法》

本発明は金属接合体の製造方法としても把握される。例えば、本発明は、接合する鉄基体とアルミニウム基体の各外表面に圧接させた電極から通電して、該鉄基体と該アルミニウム基体の被接合部で、該鉄基体の固相上に該アルミニウム基体の液相を生成させる加熱工程と、該加熱工程後の被接合部を冷却する冷却工程とを備え、上述した金属接合体が得られる製造方法でもよい。

【0013】

この製造方法によれば、加熱工程で被接合部（接合界面近傍）に生成したアルミニウム基体の液相が鉄基体の固相と反応して、上述した第1金属間化合物が生成される。このとき、例えば、加熱の時間や程度（抵抗加熱時の電流値等）などを調整すれば、鉄基体の固相の未反応部分が第1金属間化合物内に杭状に残存して第1突起が形成され、ひいては上述した第1層が形成され得る。

10

【0014】

冷却工程では、第1層上に残存したAlとFeを含む液相が、アルミニウム基体の固相と反応しつつ凝固して、上述した第2金属間化合物からなる第2層が形成され得る。こうして、第1層と第2層を含む接合層により、鉄基体とアルミニウム基体は強固に安定して接合された金属接合体となり得る。

【0015】

《その他》

(1) 説明の便宜上、適宜、鉄基体側にあるものに「第1」を付し、アルミニウム基体側にあるものに「第2」を付す。

20

【0016】

(2) 特に断らない限り本明細書でいう「 $x \sim y$ 」は下限値 x および上限値 y を含む。本明細書に記載した種々の数値または数値範囲に含まれる任意の数値を新たな下限値または上限値として「 $a \sim b$ 」のような範囲を新設し得る。また、特に断らない限り、本明細書でいう「 $x \sim y \mu\text{m}$ 」は $x \mu\text{m} \sim y \mu\text{m}$ を意味する。他の単位系（ms、kA等）についても同様である。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】スポット溶接の概要を示す模式図である。

30

【図2】スポット溶接に係るタイムチャート例である。

【図3A】試料1について、接合部の断面を示す顕微鏡写真である。

【図3B】試料1について、Al合金板と鋼板の接合層の断面を示す顕微鏡写真である。

【図3C】試料1を参考に、パラメータを特定する領域例を示す顕微鏡写真である。

【図3D】試料1を参考に、第1層の厚さ（ t_1 ）と第1突起の幅（ w ）を例示した顕微鏡写真である。

【図3E】接合層の形態例を模式的に示す参考図である。

【図4A】試料2について、接合部の断面を示す顕微鏡写真である。

【図4B】試料2について、Al合金板と鋼板の接合層の断面を示す顕微鏡写真である。

【図5】試料2と試料Cについて、Al合金板と鋼板の接合層にできた亀裂の断面を示す顕微鏡写真である。

40

【図6】試料1をモデルにしたシミュレーションにより得られた加熱工程中の温度分布図である。

【図7】接合層の生成過程（機序）を示す模式図である。

【図8】接合強度の評価試験を示す模式図である。

【図9】金属接合体の用途例を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

上述した本発明の構成要素に、本明細書中から任意に選択した一つまたは二つ以上の構成要素を付加し得る。本明細書で説明する内容は、金属接合体の他、その製造方法等にも

50

適宜該当し得る。いずれの実施形態が最良であるか否かは、対象、要求性能等によって異なる。

【0019】

《鉄基体とアルミニウム基体》

鉄基体とアルミニウム基体は、材質（成分組成）や形態を問わない。鉄基体は、純鉄でも鉄合金（特に鋼材）でもよい。アルミニウム基体は、純アルミニウムでもアルミニウム合金でもよい。鉄基体とアルミニウム基体は、同形態でも異形態でもよい。以下では、説明の便宜上、適宜、鉄基体とアルミニウム基体の代表例である鋼板とアルミニウム合金板（「Al合金板」という。）を取り上げつつ説明する。

【0020】

鋼板やAl合金板は、それぞれ1枚ずつでもよいし、少なくとも一方が複数枚でもよい。複数枚の板材は、板厚、成分組成、表面処理状態（めっきの有無等）等が同じでも、異なってもよい。

【0021】

鋼板は、例えば、冷間圧延鋼板、熱間圧延鋼板、高強度鋼板、ホットスタンプ鋼板等である。少なくとも1枚の鋼板は、片面または両面に表面処理がなされていてもよい。鋼板の表面処理層として、例えば、亜鉛めっき層、Al-Si系めっき層、酸化亜鉛層、Zn-Fe合金層等がある。代表例である亜鉛めっき鋼板には、例えば、熔融亜鉛めっき鋼板、電気亜鉛めっき鋼板、合金化熔融亜鉛めっき鋼板等がある。なお、合金化熔融亜鉛めっき鋼板は、アルミニウム-亜鉛合金めっき鋼板（いわゆるガルバリウム鋼板（登録商標））でもよい。

【0022】

少なくとも被接合面側にある表面処理層は、アルミニウム基体を構成するAl基材（Al合金等）よりも低融点な金属からなってもよい。このような表面処理層（めっき層）は、アルミニウム基体よりも先行（優先）して溶解して、被接合面間で濡れ拡がり、余分な低融点金属は接合部の外周囲に排出される。このため、表面処理された鉄基体でも、ほぼ所望の金属間化合物からなる接合層によってアルミニウム基体と接合され得る。

【0023】

アルミニウム基体（Al合金板）は、例えば、2000系～8000系、特に5000系または6000系のAl合金からなる。5000系なら、例えば、JISに規定されているA5052、A5083、A5005等に相当するAl合金が用いられる。6000系なら、例えば、JISに規定されているA6022、A6016、A6N01、A6061、A6082等に相当するAl合金が用いられる。なお、本明細書でいうAl合金には、A1000系も含まれる。

【0024】

鉄基体が鋼板の場合、その板厚は、例えば0.4～2.5mmさらには0.6～1.8mmである。アルミニウム基体がAl合金板の場合、その板厚は、例えば0.8～3mmさらには1～2mmである。各板厚は同じでも異なってもよい。

【0025】

《接合層》

鉄基体とアルミニウム基体の間に形成される接合層は、少なくとも、鉄基体側にできた第1金属間化合物からなる第1層と、アルミニウム基体側にできた第2金属間化合物からなる第2層とを有する。以下、第1層と第2層について、それぞれ説明する。

【0026】

(1) 第1層

第1層は、接合層の鉄基体側にあり、第1金属間化合物と第1突起を有する。第1金属間化合物は、例えば、 Al_5Fe_2 から主になる。第1突起は、鉄基体から一体的に連なっており、層状の第1金属間化合物中に杭状に突出してなる。換言すると、第1突起は鉄基体から歯状に延びており、第1金属間化合物が第1突起間を埋めつつ、鉄基体の接合界面を覆っている。なお、第1突起は鉄基体と同様に鉄基材からなるが、それらの成分組

10

20

30

40

50

成は同一でなくてもよい。例えば、第1突起は、鉄基体自体よりも、Alやめっき成分（例えばZn）を多く含む鉄合金でもよい。

【0027】

第1金属間化合物層中に複数（多数）の第1突起が均一的に分布しているほど、第1層は鉄基体と強固に接合されると共に、第1層に生じ得る亀裂の伝播や進展が抑止され得る。このような第1突起は、例えば、第1層に沿う基準長（ $50\ \mu\text{m}$ ）あたりの本数（「突起分布」という。）が2～60本、10～55本、20～50本さらには30～45本あるとよい。突起分布が過小であると、第1突起（pile）間隔が広くなり、第1層に生じた亀裂が進展し易くなる。突起分布が過大であると、第1金属間化合物（特に Al_5Fe_2 ）からなる第1層の成長が不十分となり、接合強度の安定性が低下し得る。

10

【0028】

第1突起は、第1金属間化合物を貫通していても、第1金属間化合物内に埋設された状態でもよい。いずれの場合でも、第1層の厚さと第1突起の太さ（断面でいうなら「幅」）が所望範囲内であるとよい。例えば、第1突起の幅（ w ）に対する第1層の厚さ（ t_1 ）の比率（「幅厚比」という。）は1～20、2～10さらには3～5であるとよい。幅厚比（ t_1/w ）が過小であると、第1金属間化合物（特に Al_5Fe_2 ）からなる第1層の成長が不十分となり、接合強度が低下し得る。幅厚比が過大であると、第1突起（pile）が細くなり、第1層に生じた亀裂が進展し易くなる。

【0029】

安定した接合性を確保するため、第1層の厚さは、例えば、 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 7\ \mu\text{m}$ さらには $3\sim 5\ \mu\text{m}$ である。また、第1層と第2層を合わせた厚さは、例えば、 $2\sim 15\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ さらには $4\sim 8\ \mu\text{m}$ である。

20

【0030】

本明細書でいう突起分布、幅厚比、各層の厚さ、突起の形態等は、特に断らない限り、接合部（特にナゲットの中央域（例えばナゲット径の40%以内）を除く外周域）の断面を顕微鏡で観察した画像（SEM像）に基づいて決定される。詳細は後述する（図3C～図3E参照）。

【0031】

(2) 第2層

第2層は、接合層のアルミニウム基体側にあり、第2金属間化合物からなる。第2金属間化合物は、例えば、 Al_3Fe から主になる。第2層は、厚さが略一定な層状でも、歯状でもよい。歯状の第2層は、例えば、第2金属間化合物からなる基層に加えて、アルミニウム基体側へ柱状に延びる第2突起をさらに有する。第2突起は、アンカー効果を高めて、第2層をアルミニウム基体に強固に接合する。また、複数（多数）の第2突起間に存在するアルミニウム基体が、第2層（特に第2金属間化合物層）に生じ得る亀裂の伝播や進展を抑止し得る。

30

【0032】

《製造方法》

金属接合体は、例えば、鉄基体の固相上にアルミニウム基体の液相を生成させる加熱工程と、加熱工程後の被接合部を冷却する冷却工程とを経て得られる。以下、加熱工程と冷却工程について、それぞれ説明する。なお、説明の便宜上、適宜、鋼板とAl合金板をスポット接合（溶接）する場合を例示しつつ説明する。

40

【0033】

(1) 加熱工程

加熱工程は、例えば、接合する鉄基体とアルミニウム基体の各外表面に圧接させた電極から通電してなされる。この通電は、アルミニウム基体自体が抵抗加熱だけで直接溶融しない範囲でなされるとよい。つまり、抵抗加熱された鉄基体からの伝熱も併せて、アルミニウム基体が接合界面近傍で液相を生じる範囲で通電がなされるとよい。

【0034】

加熱工程により、アルミニウム基体の液相と鉄基体の固相との溶融反応（固液相互拡散

50

層反応)が生じる。こうして、第1金属間化合物(例えば Al_5Fe_2)から主になる第1層(固液相互拡散層)が被接合部の鉄基体側に生成される。

【0035】

被接合部を流れる電流値は、例えば、 $10 \sim 15 \text{ kA}$ (さらには 15 kA 未満)、 $11 \sim 14.5 \text{ kA}$ 、 $11.5 \sim 14 \text{ kA}$ さらには $12 \sim 13 \text{ kA}$ である。 Al 合金板側にある電極(第2電極)の先端面積(第2先端面積)で電流値を除して算出される電流密度なら、例えば、 $50 \sim 300 \text{ A/mm}^2$ さらには $100 \sim 250 \text{ A/mm}^2$ でもよい。

【0036】

通電時間は、例えば、 $200 \sim 500 \text{ ms}$ 、 $250 \sim 450 \text{ ms}$ さらには $300 \sim 400 \text{ ms}$ である。また、通電時間に対して電流値が変化してもよい。例えば、電流値が単調増加(微分係数 0)するアップスローブ通電を行ってもよい。これにより、スパッタやチリを抑制しつつ、接合界面近傍で、アルミニウム基体の液相を効率的に生成させ得る。

【0037】

なお、電流値が変化するとき、その上限値と下限値が上記範囲にあるとよい。指標となる電流値として、例えば、通電時間に関する電流値(絶対値)の積分値を、その通電時間で除した平均値を用いることができる。この際、その平均値が上記範囲にあるとよい。

【0038】

上記の通電(加熱工程)前に、鉄基体とアルミニウム基体の接触状態を馴染ませるプレ通電工程を行ってもよい。プレ通電工程は、接合界面近傍で液相を生じない程度の通電によりなされるとよい。例えば、プレ通電工程は、加熱工程よりも小さい電流値(例えば、 $3 \sim 10 \text{ kA}$ 未満さらには $5 \sim 9.5 \text{ kA}$)で通電されるとよい。プレ通電工程後(加熱工程の本通電前)は、電極への通電を遮断(非通電)または低減し、接合界面近傍を降温させて、その電気抵抗値を低下させるとよい。その期間は、例えば、 $10 \sim 200 \text{ ms}$ さらには $50 \sim 150 \text{ ms}$ である。

【0039】

(2)冷却工程

冷却工程は、加熱工程後に通電を遮断(非通電)したり、小さい電流値(一定でも、単調減少等してもよい。)で通電したりして、加熱工程後の被接合部を電極を通じて冷却する。冷却工程により、第1層の生成後またはその生成と併行して、少なくとも Fe と Al を含む残存液相が凝固したり、その液相がアルミニウム基体とさらに熔融反応する。こうして第2金属間化合物(例えば Al_3Fe)から主になる第2層が被接合部のアルミニウム基体側に生成され得る。

【0040】

《電極》

鉄基体とアルミニウム基体への通電は、通常、それらに圧接した電極を通じてなされる。鉄基体やアルミニウム基体の特性(形状、サイズ、材質等)に適した電極が用いられるとよい。一例として、鋼板と Al 合金板のスポット接合(溶接)に用いる電極を取り上げて説明する。

【0041】

(1)形態

スポット溶接用の電極は、シャンクに着脱できるもの(キャップチップ型)でも、シャンクと一体化したもの(一体型)でもよい。通常、コストを低減するため、キャップチップ型の電極(「チップ」ともいう。)が用いられる。

【0042】

電極(チップ)は、例えば、有底略円筒状の先端部と、その先端部から連なる略円筒状の胴部とを有する。先端部の外表面(圧接面)は、凸状の他、窪んだ凹状でもよい。電極の大きさは問わない。胴部の外径(呼び径/ D_2)は、例えば、 $10 \sim 20 \text{ mm}$ さらには $12 \sim 18 \text{ mm}$ である。先端径(D_1)は、例えば、 $6 \sim 14 \text{ mm}$ さらには $8 \sim 12 \text{ mm}$ である。

【0043】

10

20

30

40

50

電極は、その先端部内側にある内筒部に冷媒（冷却液／冷却水）が導入されるとよい。冷媒が強制的に循環されると、電極の昇温抑制や電極を通じた板材の冷却を安定して行える。

【0044】

電極（特に凸状電極）の先端部の基本形状は、JIS C9304（1999）に規定されている。例えば、平面形（F形）、ラジラス形（R形）、ドーム形（D形）、ドームラジラス形（DR形）、円錐台形（CF形）、円錐台ラジラス形（CR形）等がある。鋼板とAl合金板のスポット溶接には、汎用性の観点から、例えばDR形、R形の電極を用いるとよい。

【0045】

（2）材質

電極（少なくとも先端部）は、熱伝導性、導電性、強度等に優れる材質からなるとよい。例えば、導電率が75～95% IACSさらには80～90% IACSである銅合金からなる電極が用いられる。銅合金は、例えば、クロム銅、ジルコニウム銅、クロム・ジルコニウム銅、アルミナ分散銅、ベリリウム銅等である。

【0046】

なお、鋼板に接する電極とAl合金板に接する電極は、形態（形状、サイズ（径））や材質が同じでも、異なってもよい。

【0047】

（3）加圧力

鋼板またはAl合金板に電極を圧接する加圧力は、例えば、2～6 kNさらには3～5 kNである。加圧力が過小であると、チリやスパッタが発生し易くなる。加圧力が過大になると、電極による深い打痕（陥没）が生じたり、電極の変形や摩耗が生じ易くなる。なお、電流密度の算出に必要な板材と電極の接触面積（電極の先端面積）は、接合後の板材にできる圧痕の投影面積で代替され得る。

【0048】

《その他》

（1）通電する電流値（電流密度）は一定でもよいが、所望のパターンに沿って変化してもよい。例えば、通電開始時（通電初期）に、通電量を緩やかに増加させる上昇過程（アップスロープ過程）を設けることで、電流値の急上昇によるチリの発生等が抑止され得る。また、通電終了時（通電終期）に、通電量を緩やかに減少させる下降過程（ダウンスロープ過程）を設けることで、電流値の急降下による溶接割れ（熔融池の凝固収縮に伴う凝固割れ、再結晶温度付近で生じ得る熱間割れ等）が抑止され得る。

【0049】

電極の加圧力は、通電や冷却に必要な接触状態を維持でき、過度な板厚減少等を生じない範囲内であれば足る。その加圧力は工程中に変化してもよいが、通常、工程を通じて略一定であれば足る。

【0050】

（2）鉄基体とアルミニウム基体は、接合後に、焼鈍または焼戻し等の熱処理がなされてもよい。熱処理により、接合部（ナゲット）やその近傍（熱影響部）の組織調整や残留応力除去等がなされ得る。その加熱温度は、例えば、120～250さらには150～200である。その加熱時間は、例えば、10～180分さらには30～120分である。加熱範囲は、接合体の全体でもよいし一部（接合部等）でもよい。

【0051】

《用途》

本発明の金属接合体は、種々の部材や構造物に用いられる。例えば、本発明の金属接合体で車両用パネル等を構成すると、車両の軽量化等が図られる。車両用パネルは、例えば、鋼板からなる骨格（プラットフォーム等）に、外表面を構成するAl合金板を接合してなる。車両の上部構造物である車両用パネルとして、例えば、ルーフパネル、サイドアウトパネル等がある（図9参照）。

10

20

30

40

50

【実施例】

【0052】

鋼板とA1合金板を重ねた板組をスポット溶接した金属接合体を製作し、その接合組織や接合強度等を評価した。このような具体例を例示しつつ、本発明をさらに詳しく説明する。

【0053】

[第1実施例]

本実施例に係るスポット溶接の概要を図1に示した。図1には、被溶接材として、第1鋼板、第2鋼板およびA1合金板を順に積層した板組を例示した。スポット溶接は、板組の各表面（第1鋼板の下面とA1合金板の上面）に圧接された一对の電極へ通電してなされる。なお、本実施例では、説明の便宜上、特に断らない限り、図1に示した矢印の方向を、上下方向または左右方向とする。

10

【0054】

《試料の製作》

(1) 板材

第1鋼板には非めっき鋼板である冷間圧延鋼板（440MPa級/板厚：1.4mm）を、第2鋼板には合金化溶融亜鉛めっき鋼板（270MPa級/板厚：0.8mm）を、A1合金板には（JIS A6022相当の展伸材/板厚：1.2mm）を用いた。なお、亜鉛めっき鋼板には、厚さ約8 μ mの亜鉛めっき層（金属層）が形成されている。亜鉛めっき層自体の融点は約420、A1合金板の融点は約650である。

20

【0055】

各板材は、表面研磨等を行わず、そのままスポット溶接に供した。また、各板材は短冊状（30mm×100mm）に切断加工して用いた。

【0056】

(2) 電極

第1鋼板側の第1電極とA1合金板側の第2電極には、同じDR形（JIS C9304）の市販チップ（OBARA株式会社製）を用いた。チップの内側（内円筒部）には強制循環された冷却水（流量：2.7L/min）を供給して、チップを強制冷却した。電極はクロム銅（Cr：1質量%、Cu：残部）製であり、その電気伝導度は80%IACSであった。

30

【0057】

電極のサイズは、図1の拡大図に示すように、チップ径（呼び径D2）：16mm、先端底部の厚さは12mm、先端肩部の曲率半径（R）：8mm、先端面の曲率半径（R1）：40mmとし、先端径（D1）は12mmとした。

【0058】

(3) 溶接条件

スポット溶接はサーボ加圧式スポット溶接機（ARO社製PA235KVAMF）を用いて行った。通電パターンの一例を図2に示した。この場合、電極による板組の加圧力（F）は4kNで一定とした。通電は、直流電流を制御して次のように行った。

【0059】

第1電流値（ I_1 ）：8kA、通電時間：100msとする第1通電工程（プレ通電工程）を行った。この通電後、100ms間を非通電状態として、両電極を通じて板組を冷却した（第1冷却工程）。これにより、各板材間（特に第2鋼板とA1合金板の間）の電気抵抗値を所定範囲まで低下させ、後続の第2通電工程を安定して行えるようにした。

40

【0060】

第1冷却工程後、第2電流値（ I_2 ）：10～14kA（電流密度：88～123.8A/mm²）、通電時間：400msとする第2通電工程（加熱工程/本通電工程）を行った。第2通電工程は、初期値（ I_{2i} ）：10kAから終期値（ I_{2f} ）：14kAまで、電流値が直線的に単調増加するアップスローブ通電により行った。これにより、チリの発生等を抑止しつつ通電量を確保して、接合層やナゲットを成長させた。こうして得られた

50

金属接合体を「試料1」という。

【0061】

《観察》

(1) 試料1の接合部の断面を倒立金属顕微鏡(オリンパス株式会社製GX53)で観察した写真を図3Aに示した。図3Aから明らかなように、第1鋼板と第2鋼板はそれらの対面間にある第1ナゲットを介して接合されており、第2鋼板とAl合金板はそれらの対面間にある第2ナゲットを介して接合されていることが確認された。

【0062】

図3Aから、第1ナゲットは、第1鋼板と第2鋼板が共に溶融した後に凝固して生成したことがわかる。また第2ナゲットは、溶融したAl合金板が第2鋼板と反応(固液相互拡散/溶融反応)して生成したことがわかる。図3Aからわかるように、第1ナゲットも第2ナゲットも十分な大きさ(径)および厚さ(板厚方向の長さ)を有していた。なお、電極によるAl合金板側の圧痕(窪み、陥没)は、深さが約0.3mm程度(板厚減少:約25%)に留まっていた。

10

【0063】

(2) 第2鋼板とAl合金板の接合界面付近の組織を走査電子顕微鏡(株式会社日立ハイテク製S-3600N)で観察した写真(SEM像)を図3Bに示した。また、その組織をその顕微鏡に付属のエネルギー分散型X線分光器(EDX)で観察したところ、金属間化合物として、 Al_5Fe_2 相および Al_3Fe 相の他、 $Fe-Al-Zn$ 相(主に Al_5Fe_2 にZnが固溶)または $Al-Zn$ 相も観察された。

20

【0064】

もっとも、第2鋼板とAl合金板の接合層は、第2鋼板側にある Al_5Fe_2 相(第1金属間化合物)からなる第1層と、Al合金板側にある Al_3Fe 相(第2金属間化合物)からなる第2層とにより、主に構成されていることが確認された。

【0065】

図3Bから明らかなように、第1層は、 Al_5Fe_2 相中に、第2鋼板から一体的に延びる細長い杭状の第1突起(適宜、「pile」と表記する。)が略均一的に分布していた。一方、第2層は、第1層(Al_5Fe_2 相)上に形成された Al_3Fe 相から一体的に延びて、Al合金板中へ食い込むように成長した比較的太い柱状の第2突起が略均一的に分布していた。

30

【0066】

(3) 一般的に、金属間化合物層(界面反応層)は脆弱であるため、その厚さは1~2μm以下であると好ましいといわれる。しかし、本実施例の場合、金属間化合物からなる接合層の厚さは約4.6μm(第1層(Al_5Fe_2 相)の厚さ:約3.5μm、第2層(Al_3Fe 相)の厚さ:約1.1μm)あった。

【0067】

また、pileの分布(突起分布)は、第1層の面方向に沿った長さ50μm(基準長:L)あたり41.6本あり、十分であった。さらに、pileの幅(w)に対する第1層の厚さ(t1)の比率(幅厚比:t1/w)は3.1あり、所望範囲内であった。

【0068】

上述した各層の厚さ、突起分布、幅厚比は次のように特定した。まず、図3Cおよび図3Dに示すように、鉄基体とアルミニウム基体の接合部(ナゲット)について、その外周域の接合層付近を拡大観察する。次に、その観察像(SEM像)から切り取った所定サイズの視野(例えば25μm×40μm)内で、層の厚さ、pileの幅、pileの本数を特定する。具体的には次の通りである(図3E参照)。

40

【0069】

層の厚さは、鉄基体と第1層の境界(「基底ライン」という。)と、第1層と第2層の境界(「層界面」という。)との間の最短距離とする。一視野毎に定まる「層の厚さ」は、基底ラインに沿って連続的または離散的(例えば0.5μm間隔)に測定される最短距離の最大値とする。

50

【0070】

pileの幅は、基底ラインに接するpileの根元長（接点間距離）とする。一視野毎に定まる「pileの幅」は、基底ラインに沿って測定される各pileの根元長の算術平均値とする。一視野毎に定まる「pileの本数」は、同視野内でカウントされる総数とする。

【0071】

接合部の外周域から適当に選択した10視野それぞれについて、上記した層の厚さ、pileの幅、pileの本数をそれぞれ求める。10視野に関する各算術平均値をそれぞれ、本明細書でいう層の厚さ（ t_1 、 t_2 ）、pileの幅（ w ）、pileの本数（ N ）とする。本明細書でいう突起分布および幅厚比は、それらに基づいて算出される。なお、観察視野の幅が $x \mu\text{m}$ （ $50 \mu\text{m}$ ）のとき、pileの本数（ N ）に係数（ $50/x$ ）を掛けた換算値を求め、その10視野分の平均値を突起分布とする。

10

【0072】

《評価》

上述した条件でスポット溶接を行い、図8（a）、（b）に示す2種類の試験片を製作した。各試験片を用いて引張試験を行ったところ、引張せん断強度（5回の平均値）は4780 N、十字引張強度（5回の平均値）は1080 Nであった。上述したように、厚い接合層が形成される場合でも、十分な接合強度が得られることが確認された。なお、各接合強度は破断時の荷重である。

【0073】

[第2実施例]

第1実施例で用いた合計3枚の板組からなる被溶接材を、1枚の鋼板（第1鋼板）と1枚のAl合金板を順に積層した合計2枚の板組に替えてスポット溶接した。鋼板とAl合金板には、それぞれ、冷間圧延鋼板（440 MPa級 / 板厚：1.0 mm）とアルミニウム押出材（6N01 / 板厚：3.0 mm）を用いた。

20

【0074】

《試料の製作》

図1に示したスポット溶接装置を用いて、下記に示す溶接条件で、試料2と試料Cを製作した。なお、いずれの場合も、直流通電を行い、加圧力（ F ）は4 kN（一定）とした。

【0075】

試料2は、試料1と同様に、第1電流値（ I_1 ）：8 kA、第1通電時間：100 ms、第1冷却時間：100 ms、第2電流値（ I_2 ）：10～14 kA（電流密度：88～123.8 A/mm²）、第2通電時間：400 msとした。第2通電工程は、第1実施例と同様に、図2に示したチャートに沿って、初期電流値（ I_{2i} ）：10 kAから終期電流値（ I_{2f} ）：14 kAまでアップスローブ通電とした。

30

【0076】

試料Cは、第1電流値（ I_1 ）：8 kA、第1通電時間：100 ms、第1冷却時間：100 ms、第2電流値（ I_2 ）：13 kA（電流密度：115 A/mm²）、第2通電時間：500 msとした。第2通電工程は、第2電流値を一定にして通電した。

【0077】

《観察》

各試料の接合部の断面を既述した倒立金属顕微鏡で観察した。また、各試料について、鋼板とAl合金板の接合界面付近の組織を既述した走査電子顕微鏡により拡大して観察した。一例として、試料2に係る各観察像を、図4A、図4B（両図を併せて単に「図4」という。）にそれぞれ示した。

40

【0078】

図4から明らかのように、鋼板とAl合金板の2枚組からなる金属接合体でも、第1実施例に係る金属接合体と同様な接合層が確認された。つまり、第1実施例と同様にEDXで観察したところ、Al₅Fe₂相（第1金属間化合物）から主になる第1層が鋼板側で確認され、Al₃Fe相（第2金属間化合物）から主になる第2層がAl合金板側で確認

50

された。

【0079】

さらに、その第1層では、鋼板から一体的に延びる杭状の第1突起 (pile) が Al_5Fe_2 相中に略均一的に分布していた。また第2層では、第1層上に形成された Al_3Fe 相から一体的に延びて Al 合金板中へ成長した柱状の第2突起が略均一的に分布していた。

【0080】

一方、試料Cの第1層には、第1突起 (pile) が観られなかった (図5参照)。長時間の通電により、pile が消滅して、第1層の全体が Al_5Fe_2 相になったと考えられる。なお、試料Cの第2層には、 Al_3Fe 相から一体的に延びて Al 合金板中へ成長した細かな突起が多数観られた。

10

【0081】

《評価》

(1) 試料2と試料Cについても、図8に示した引張試験を行った。試料2の場合、引張せん断強度：4870Nであった。試料Cの場合、引張せん断強度：4230N、十字引張強度：500Nであった。試料2は接合強度が十分に大きかったが、試料Cは試料2によりも接合強度が小さくなった。

【0082】

(2) 試料1と試料Cについて、破壊した十字引張試験片 (図8(b)) の接合部の外周付近を、既述した走査電子顕微鏡で観察した。両観察像を図5に併せて示した。図5から明らかなように、試料1では、破壊時に接合層で生じる亀裂がpileを迂回して進展し、pileにより亀裂の進展が抑制されていた。このような破壊過程により、試料1は高い接合強度を発揮したと考えられる。このようは破壊過程は、試料2についても同様であった。

20

【0083】

一方、試料Cは、第1層中にpileがないため、破壊時に生じる亀裂が第1層を伝播して長く進展し、鋼板まで到達していた。このため、試料Cは接合強度が低くなったと考えられる。

【0084】

[考察]

本発明に係る接合層が形成される機序を検討した。

30

【0085】

(1) 温度分布

試料1 (第1実施例) のスポット溶接時における被接合部の温度分布を、抵抗溶接シミュレーションソフトSORPASを用いて数値解析した。このとき用いた解析モデルと、解析結果例 (第2通電中の温度分布) を図6にまとめて示した。

【0086】

図6から明らかなように、第2通電により、第1鋼板と第2鋼板の接合界面間で、それらが溶融した第1液相が生じることがわかる。第1液相は、第2通電後の第2冷却により凝固して第1鋼板と第2鋼板を接合する第1ナゲットとなる。

40

【0087】

また第2通電により、第2鋼板と Al 合金板の接合界面間で、 Al 合金板が溶融した第2液相が生じることがわかる。ここで、第1実施例で示した溶接条件下 (第2電流値) では、 Al 合金板が抵抗加熱 (ジュール加熱) のみで直接溶融することはない。従って、 Al 合金板は、それ自身の抵抗加熱と第2鋼板側からの伝導熱とにより溶融したと考えられる。その第2液相は、第2通電後の第2冷却により凝固して、 Al 合金板と第2鋼板を接合する第2ナゲット (接合部) となる。

【0088】

(2) 接合層の生成

上述したシミュレーション結果に基づいて、 Al 合金板と鋼板間の接合層 (第1層と第

50

2層)は、次のようにして生成されたと考えられる。

【0089】

まず、第2通電による加熱工程において、Al合金板が溶融してできたAl合金の液相(第2液相)は、鋼板(固相)表面と接触して、溶融反応(固液相互拡散反応:SLID)を生じる。具体的にいうと、Al合金の液相は鋼板の結晶粒界から浸透して拡散し、鋼板側に第1金属間化合物からなる第1層が形成される。このとき、加熱工程から冷却工程への移行時期(第2通電の終期/第2冷却の始期)を調整することにより、鋼板のFe基結晶粒の一部が未反応な状態で残存し、鋼板と一体化したpile(第1突起)となる。

【0090】

次に、第2通電後の冷却工程において、鋼板上に残存するFeとAlを含む液相が凝固する。これによりAl合金板側に、第2金属間化合物からなる第2層が形成される。この際、その液相はAl合金板と反応しつつ凝固するため、第2金属間化合物からなる柱状の第2突起がAl合金板へ食い込むように形成される。

10

【0091】

こうして、第1層と第2層からなる接合層が、Al合金板と鋼板の接合界面近傍に形成されるようになったと考えられる。このような接合層を有する異種金属接合体は、安定した接合強度を発揮し、信頼性に優れる。

20

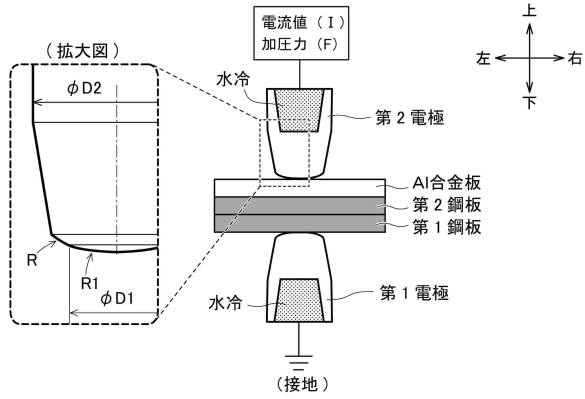
30

40

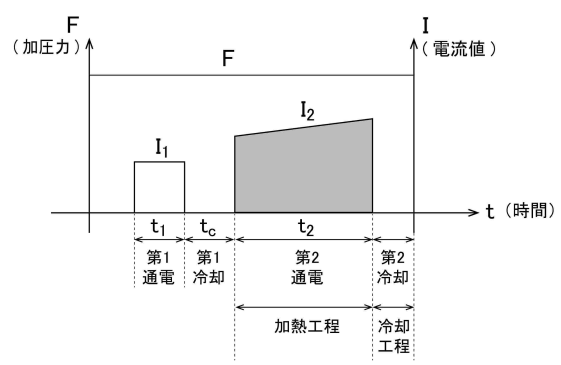
50

【図面】

【図 1】

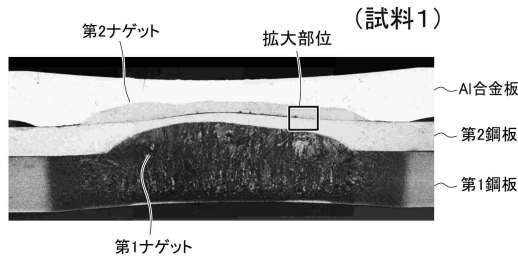


【図 2】

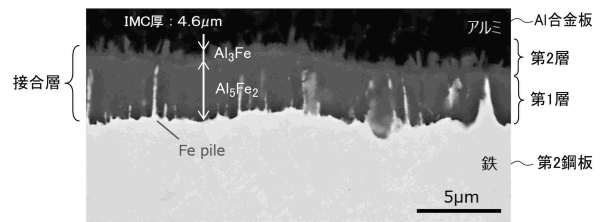


10

【図 3 A】



【図 3 B】



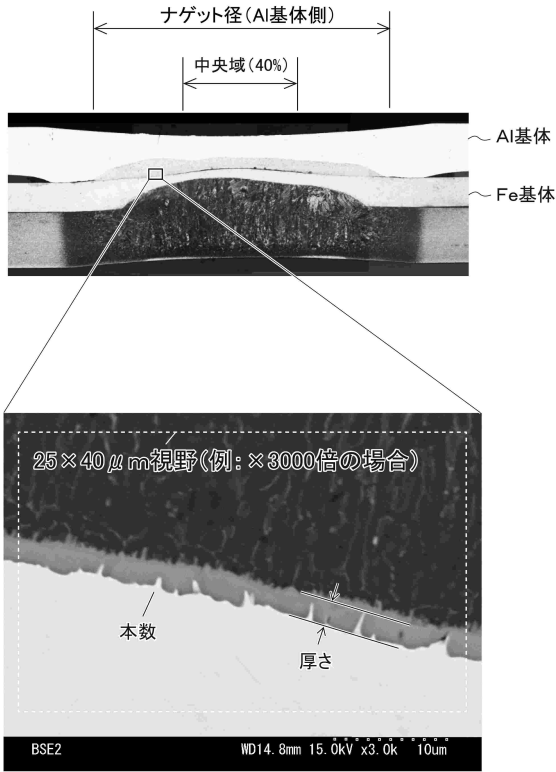
20

30

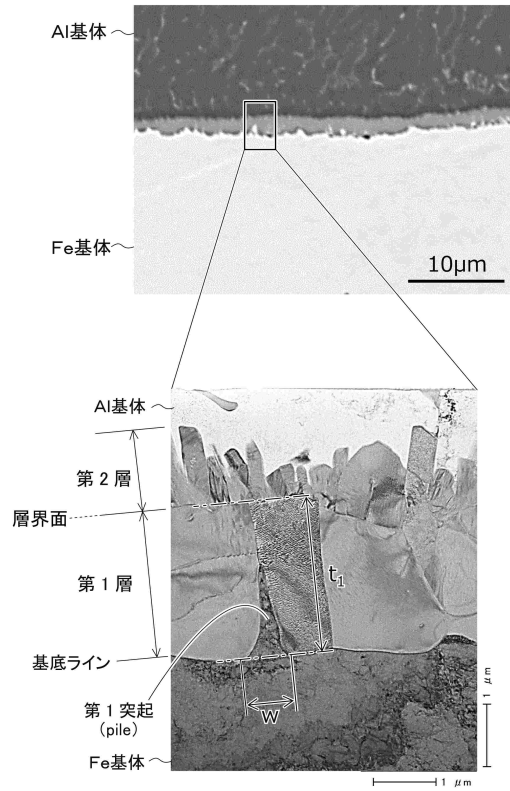
40

50

【図 3 C】



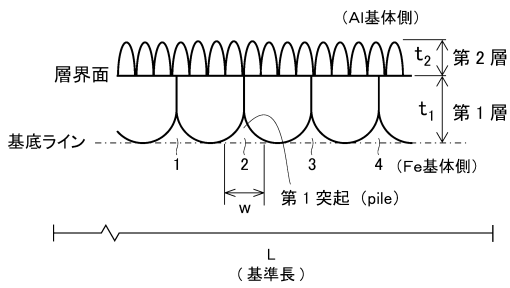
【図 3 D】



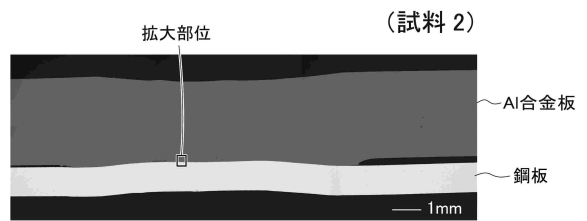
10

20

【図 3 E】



【図 4 A】

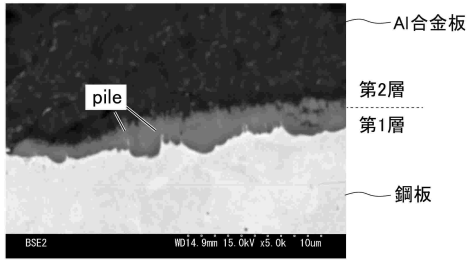


30

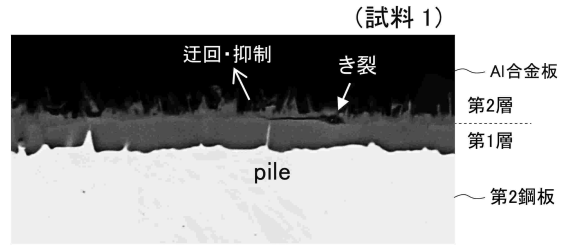
40

50

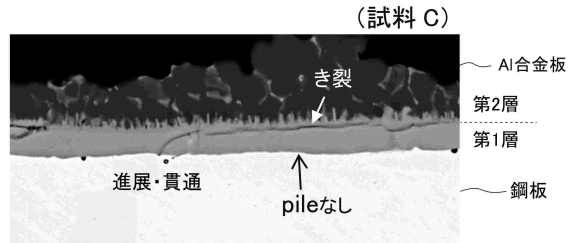
【 図 4 B 】



【 図 5 】

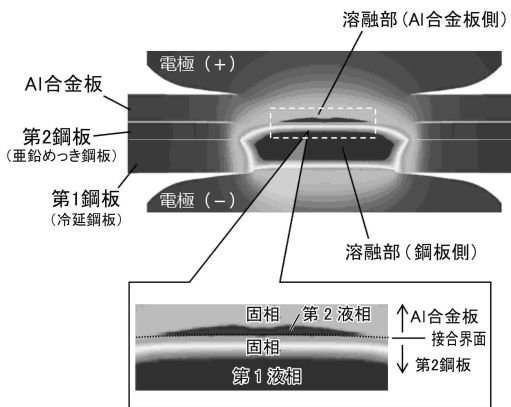


10

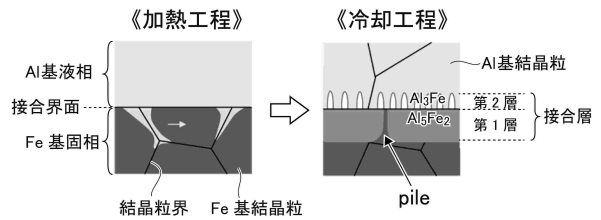


20

【 図 6 】



【 図 7 】



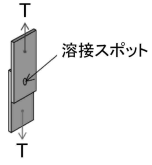
30

40

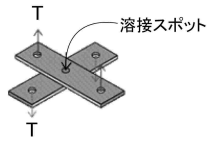
50

【 図 8 】

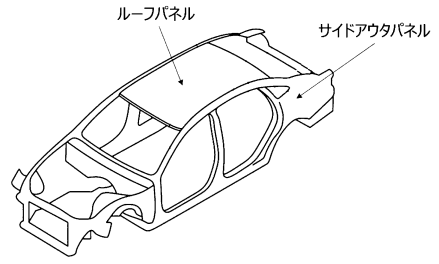
(a) 引張せん断強度



(b) 十字引張強度



【 図 9 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 愛知県長久手市横道 4 1 番地の 1 株式会社豊田中央研究所内
(72)発明者 浅田 崇史
- 愛知県長久手市横道 4 1 番地の 1 株式会社豊田中央研究所内
(72)発明者 森 広行
- 愛知県長久手市横道 4 1 番地の 1 株式会社豊田中央研究所内
(72)発明者 尼子 龍幸
- 愛知県長久手市横道 4 1 番地の 1 株式会社豊田中央研究所内
(72)発明者 各務 綾加
- 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内
(72)発明者 泉野 亨輔
- 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内
(72)発明者 小倉 修平
- 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内
(72)発明者 関口 智彦
- 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内
審査官 松田 長親
- (56)参考文献 国際公開第 2 0 1 8 / 1 8 1 2 3 1 (W O , A 1)
米国特許出願公開第 2 0 1 5 / 0 0 5 3 6 5 5 (U S , A 1)
特表 2 0 1 9 - 5 0 8 2 5 3 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 2 8 9 4 5 2 (J P , A)
特開 2 0 1 9 - 1 2 6 8 2 6 (J P , A)
特開 2 0 0 5 - 2 8 8 5 2 4 (J P , A)
特開 2 0 2 1 - 1 3 7 8 2 2 (J P , A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
B 2 3 K 1 1 / 0 0 - 1 1 / 3 6