

論文審査の結果の要旨

氏名： 高 橋 正 詞

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：異種アルミニウム合金インサート材を用いた

半溶融成形アルミニウム合金板の摩擦攪拌接合に関する研究

審査委員：(主査) 教授 前 田 将 克

(副査) 教授 松 島 均 教授 安 藤 努

摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding: FSW) は、低入熱の固相接合法であることから、溶融溶接が適用困難とされているダイカストを含む鋳造用アルミニウム合金や熱影響を受けやすい熱処理型アルミニウム合金に利用でき、接合に伴う変形も少ないとされている。現在では航空機、鉄道車両、船舶等輸送機器や土木・建築構造物にも適用されている。FSW は板材の突合せ接合に適していることから鋳造材と展伸材の接合に利用できれば両材料の特長を生かしたものづくりを実現できる。しかし、重力鋳造したアルミニウム合金やダイカスト材と展伸材の接合に FSW を適用した研究報告はあるが、半溶融成形材の FSW に関する報告は少なく、さらに展伸材との異材接合はごくわずかし報告例がない。同一の化学組成、熱処理であっても鋳造方法が異なると、冷却速度の違いから組織や機械的性質が大きく異なるため、接合性に影響すると予想される。さらに、鋳造用アルミニウム合金にはシリコンが高濃度で添加されており、硬質な共晶組織を形成する。アルミニウム合金の FSW には一般に鋼製工具が使用されるため、接合中の工具摩耗とアルミニウム合金への工具成分、特に鉄成分の混入による継手特性の劣化が懸念される。

本研究は、これまでに幅広くアルミニウム合金で FSW の研究が行われている中で、少数である鋳造材、さらに特殊な鋳造法である半溶融成形したアルミニウム合金に適用した際に接合条件が組織や機械的性質におよぼす影響について明らかにしている。その中で、展伸材との異材接合性およびシリコン含有量が少ない展伸材をインサート材として利用して工具摩耗を抑制した FSW を試行し、継手特性と接合条件の相関を報告している。

本論文は全 7 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の背景、従来の研究について述べ、本研究の目的と本論文の構成を述べている。

第 2 章では、供試材である半溶融成形した AC4CH 材について各種鋳造法と比較して説明している。また、その供試材の接合に使用する摩擦攪拌接合の技術概要をその他の接合法と比較している。

第 3 章では、本研究で使用した供試材および実験装置、実験方法について記述している。

第 4 章「半溶融成形 AC4CH-T6 の同種材摩擦攪拌接合」では、今回使用する半溶融成形した AC4CH 材の直接摩擦攪拌接合において接合条件が継手の組織および機械的性質に及ぼす影響について検討し、基準となる FSW 継手の状態と性能を把握する。本研究で用いた半溶融成形したアルミニウム合金組織は、他の鋳造アルミニウム合金と異なりこれまでに FSW した研究例は少ない。特に初晶 α -Al や共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。

半溶融成形した AC4CH 材どうしの接合は、接合条件は工具回転数 600~1800 rpm、接合速度 1~15 mm/s と変化させ、前進角 3°、予熱 15 s 一定とした。回転工具は合金工具鋼 (SKD61) 製とし、ショルダー直径 20 mm、ショルダー角 4°、プローブは M6 ねじ形状、プローブ長さ 4.5 mm とした。

接合部横断面の板厚中央の硬さ分布は工具回転数に関係なく軟化が認められ、接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の接合部が著しく軟化しており、AS に比較して RS の軟化が大きくなっている。また、SZ に相当する RS、AS それぞれ 5 mm までの範囲の硬さ分布は、接合速度の高い条件と同程度となった。接合速度が高くなるのに伴い、熱影響部 (Heat Affected Zone: HAZ) および熱加工影響部 (Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ) の軟化量は少なくなる傾向にあった。

継手の引張強さは接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方、工具回転数には依存しない。工具回転数 1000 rpm および 1400 rpm、接合速度 10 mm/s の接合条件において母材の 82% となる 230 MPa の値が得られた。伸びも接合速度が高くなるのに伴って上昇し、工具回転数 1800 rpm を除く各工具回転数で最高接合速度の条件で母材を超える値が得られた。継手の破断は全条件で AS、RS いずれかの熱影響部であり、接合条件に依存せず AS および RS のいずれかで破断する。

第5章「半熔融成形 AC4CH と A6061 の異種材摩擦攪拌接合」では、半熔融成形した AC4CH 材と A6061 で異種材料接合した、前章同様に半熔融成形したアルミニウム合金組織は、他の鑄造アルミニウム合金と異なりこれまでに FSW した研究例は少ない。展伸材との攪拌により、初晶 α -Al や共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。

半熔融成形した AC4CH 材と A6061 の接合は継手において AS、および RS では一般的な溶融溶接と異なり左右非対称の接合組織となるため、AC4CH を AS に配置した場合および RS に配置した場合の両方について接合を試みた。回転工具はプローブ長さを 4.7 mm とし、その他は AC4CH 材どうしの接合同様の形状とした。接合条件は、接合速度を 1~15 mm/s に変化させ、工具回転数を 1400 rpm、前進角を 3°、予熱 15 s 一定とした。

AS に AC4CH を配置した条件で接合速度を変化させた継手板厚中央における硬さ分布は、全ての接合速度の条件で SZ から TMAZ、HAZ に亘って軟化が認められる。特に、接合速度が低い 1 mm/s の条件では HAZ が拡大し、軟化域幅および軟化量も大きい。また、最軟化部の硬さは A6061 側より AC4CH 側の方が低くなる。接合速度 5 mm/s 以上の条件では、AS、RS とともに大きく軟化域幅および軟化量は減少し、最軟化部の硬さの差は小さくなる。

AS に A6061 を配置した条件で接合速度を変化させた硬さ分布においても HAZ 及び TMAZ に軟化が認められる。特に接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の熱影響部付近の軟化が著しい。また、AS に比較して RS の軟化が大きくなっている。

継手の引張強さは接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方、材料配置には依存しない。接合速度 15 mm/s の AS に A6061 を配置した接合条件において継手効率も AC4CH の 85% が得られた。伸び率も接合速度が高くなるのに伴って上昇し、AC4CH の 90% が得られた。継手の破断は全条件で AS、RS いずれかの熱影響部であり、接合速度の低い 1 mm/s の条件においては材料配置に関係なく AC4CH 側の熱影響部で破断する。接合速度 5 mm/s 以上では材料配置に依存せず AS および RS のいずれかで破断する。

第6章「A6061 インサート材を用いた半熔融成形 AC4CH-T6 の摩擦攪拌接合継手におけるインサート材幅と攪拌量の効果」では、第4章、第5章の結果をもとにインサート材を用いた半熔融成形した AC4CH の FSW を行う。接合条件による FSW 継手の状態と性能を把握する。インサート材を使用することから接合界面が 2 つとなり、それを同時に接合することから接合界面底部に欠陥が発生する可能性があるため組織にも着目して評価する。本研究で定義した攪拌量とインサート材、オフセット量、機械的性質の関係性明らかにして機械的性質が良好な最大のインサート材幅が有効となる攪拌量と接合条件を調査する。前章で良好な継手効率が得られた A6061 材をインサート材として半熔融成形した AC4CH 材を FSW し、インサート材幅により変化する攪拌量を指標として最適な接合状態を達成した。

第7章では、第4章から第6章までの研究成果の総括的な結論を述べ、今後に残された課題を示している。半熔融成形した AC4CH-T6 材どうしおよび展伸材 A6061-T6 材の異種材の FSW 適用が有効であり、材料配置にも依存せず高い継手効率、伸び率が得られることを示した。A6061-T6 をインサート材として利用した FSW において適切な接合条件とそれから求める攪拌量を指標とすることで、高い継手効率と伸び率が得られることを示した。今後の課題として、他のアルミニウム合金や接合条件に攪拌量を適用して攪拌量の有用性を示すこと、他のアルミニウム合金でもインサート材を適用する FSW が有用であるかを検討事項として挙げた。

この成果は、生産工学、特に機械工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 4 年 3 月 3 日