

論文審査の結果の要旨

氏名：荒 深 純 一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：摩擦攪拌接合における初期接合条件に関する研究

審査委員：（主査） 教授 加藤 数 良

（副査） 教授 久保田 正 広

教授 高橋 進

摩擦攪拌接合(Friction stir welding : FSW)は1991年英国溶接研究所(The Welding Institute : TWI)で発明された板材に適した接合方法であり、発明されて以来急速に実用化が進められた技術である。FSWは先端にプローブと呼ばれる突起を持つ工具を回転させた状態で、突合せあるいは重ね合わせた素材の中にプローブ部を挿入し、接合線に沿って移動することにより接合するもので、固相状態での接合が行われる。このため、接合作業が簡単で環境負荷が小さくエネルギー効率が高い。異種材料の接合が可能など種々の利点を持つことが実用化を急速に推し進めた要因である。しかし、この接合法も万能ではなく、接合終端部において回転工具を持ち上げた際にプローブによる穴が残存する。溶融溶接のごとく溶加材を使用しないために隅肉溶接ができない。など幾つかの欠点もあり、これらの問題点を解決するための方策は種々検討され解決されているものも多い。また、従来の研究の多くは、接合条件の中で回転工具材質、形状、回転数および接合速度と継手の組織、機械的性質との関係を検討したものである。しかしながら、接合部は製品や部品の一部となるため、終端部のみならず接合開始点もその一部となるが開始点近傍に関しては終端部と異なりプローブによる穴の残存のように外観的な問題がないため、問題視されておらず、その検討もほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、このような現状からFSWの接合開始点に係わる初期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たものである。初期の接合条件として考えられる工具挿入速度および予熱時間を種々変化させてその特性を組織および機械的性質などにより評価した結果について報告している。本論文は全8章から構成されている。

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章は、FSWの原理と接合方法およびその特徴を説明した。まず、接合の手順を説明するとともにその際に設定する条件をあげ、継手組織の特徴などを詳細に説明した。

第3章は、本研究で使用した供試材および実験装置、実験方法および継手の評価方法について記述した。

第4章では、非熱処理材であり、実用的に広範囲に使用されておりFSWにおいては接合条件範囲が広く、広範囲に接合条件が設定できる5052-H34アルミニウム合金を用いた同種材のFSWを行い、初期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た。その結果、工具挿入速度90mm/s、予熱時間0.1sの条件では、継手始点端部の開口、継手端部の浮上り、塑性流動不足によるキッシングボンドおよび空隙が発生するが、予熱時間5s~15sの範囲では、接合欠陥のない健全な継手が得られる。攪拌部の組織は母材に比較して著しく微細となり、予熱時間の増加に伴って攪拌部に生成される同心楕円状のオニオンリングと呼ばれる組織を示す部分の幅が広がる。予熱時間の減少に伴い接合開始点では軟化域は狭くなり、オニオンリングに相当する位置での軟化割合が減少した。工具挿入速度が速い条件では予熱時間の減少に伴う軟化域の縮小が顕著であった。引張強さは、工具挿入速度が遅い条件では、予熱時間の違いによる差は小さく約200MPaの値を示した。工具挿入速度が速い条件では予熱時間0.1sおよび20sの条件で継手強度は低下するが、予熱時間5s~15sとすることで引張強さは向上する。

本実験の範囲では、工具挿入速度90mm/s、予熱時間5sの条件で引張強さは最高値205MPaを示し母材の83%、同条件での伸びは14.2%であり母材と同等の値が得られた。工具挿入速度が遅い場合には予熱時間を

付与する必要がなく、工具挿入速度が速い条件で良好な継手を得るためには必要最低限の予熱時間(5～15s)が必要となる。また、FSWにおける初期条件である工具挿入速度および予熱時間の影響範囲は継手始点部近傍のみであることを明らかにした。

第5章は、熱処理合金のなかで強度が高いがFSWの接合条件範囲が狭いとされている2024-T6アルミニウム合金を用いてFSWを行い、初期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た。その結果、適正条件範囲は狭いが、実験の範囲内では5052アルミニウム合金継手の始点端部に認められた開口などの欠陥のない継手が得られ、工具挿入速度および予熱時間の増加に伴い接合部表面は平滑となること示した。攪拌部の組織形態は5052アルミニウム合金と類似の傾向にあり、著しく微細な組織を呈した。工具挿入速度1mm/s、予熱時間0.1sの条件では接合界面底部に突合せ部表面の酸化膜が継手内部に残存したキッシングボンドと呼ばれる欠陥が認められたが、予熱時間を長くすることによりキッシングボンドの発生は抑制できることを示した。工具挿入速度および予熱時間の減少に伴い軟化域は狭くなり、軟化割合は減少した。また、予熱時間の減少に伴い、時効硬化による硬さの回復は大きくなった。工具挿入速度0.1mm/sの条件では予熱時間の違いによる引張強さに差は認められないが、工具挿入速度1mm/sの条件では予熱時間が0.1sおよび10sの条件において引張強さは著しく低下する。しかし、予熱時間20sとすることで引張強さおよび伸びが向上した。

本実験範囲内では、引張強さは工具挿入速度1mm/s、予熱時間20sの条件で最高値423MPaを示し、母材の約90%であった。工具挿入速度が速い条件では適切な予熱時間の付与により接合欠陥のない良好な継手が得られた。また、初期接合条件は接合開始部より離れた位置には大きな影響はなかった。

第6章は、熱処理合金の中では2024アルミニウム合金に比較して高強度ではあるが、接合可能条件範囲は若干広い7075-T651アルミニウム合金を用いてFSWを行い、初期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た。その結果、工具挿入速度および予熱時間の増加に伴い接合部表面は平滑となり、実験の範囲内では外観上の欠陥はなく、攪拌部の組織は母材に比較して著しく微細となった。継手の硬さ分布は、軟化域の幅および硬さは入熱量の影響を受け開始部では挿入速度の遅い条件、および予熱時間の長い条件で軟化域の幅は広くなり、軟化割合が大きくなる。継手の引張強さは、開始部では工具挿入速度2mm/sでは0.1mm/sに比較して高い値を示した。

本実験の範囲内では、工具挿入速度1mm/s、予熱時間20sの条件で最高値で492MPaと母材の84%の値が得られた。また、引張強さには、工具挿入速度の大小に比較して予熱時間の影響は小さく、伸びは実験の範囲内で最高値は6.3%と母材の約50%と低下した。5052アルミニウム合金と同様に工具挿入速度および予熱時間の影響は接合開始点より離れた位置にはほとんどなかった。

第7章では、2024-T6アルミニウム合金と7075-T651アルミニウム合金を組合せた異種材料のFSWについて前章までと同様の検討を行い、異種材料の組合せにおいても同様の結果が得られるかを検討した。その結果、素材の配置に関係なく攪拌部の組織は母材に比較して著しく微細となり、オニオンリングの幅は予熱時間の増加に伴って大きくなる。2024アルミニウム合金を工具の回転方向と接合方向が同一となる側(AS側)に配置した場合は工具挿入速度2mm/s、予熱時間0.1sの条件で、7075アルミニウム合金を配置した時は工具挿入速度1mm/sおよび2mm/s、予熱時間0.1sの条件で接合界面底部においてキッシングボンドが認められた。予熱時間を長くすることでキッシングボンドの発生は抑制された。AS側に2024アルミニウム合金を配置し、予熱時間0.1sとした場合には、工具挿入速度の大小により軟化域の幅と位置に差異はあるが、その違いによる差は小さい。AS側に7075を配置した条件では、予熱時間0.1sの場合、工具挿入速度の違いはAS側の最軟化部の位置と硬さに差が認められたが、逆側の配置では工具挿入速度の違いによる硬さの差異は小さい。AS側に2024アルミニウム合金を配置し、予熱時間を20sとした場合、工具挿入速度の違いによる軟化域の幅と硬さには大差ないが、中心部では挿入速度0.1mm/sの場合に攪拌過剰が原因とみられる硬度低下があった。AS側に7075アルミニウム合金、予熱時間20sの場合、予熱時間0.1sの場合と同様に、AS側最軟化部の位置と硬さは異なるが、逆側では挿入速度の違いによる大きな違いはない。AS側が2024アルミニウム合金の場合は、工具挿入速度と予熱時間の組合せによる継手始点部の引張強さには大差ない。AS側が7075アルミニウム合金では、最軟化部の硬さは予熱時間が短く、工具挿入速度が速いほど高くなった。

また、工具挿入速度 0.1mm/s では、予熱時間 10s で引張強さは最小となり、挿入速度 1mm/s と 2mm/s においては予熱時間 10s で引張強さは最大となる。さらに工具挿入速度と予熱時間の組合せによっては塑性流動不足や攪拌過剰の現象が生じ、継手の引張強さに大きな影響がある。

異種材料の組合せでは素材の配置により継手性能が異なることを示し、工具の回転方向と接合方向が同一となる側に接合しにくい 2024 アルミニウム合金を配置することにより、工具挿入速度および予熱時間の選択範囲は広範囲に選定が可能となる。逆の配置とすると工具挿入速度および予熱時間の選択範囲が狭く、適正な組合せが存在することを明らかにした。

第 8 章の結論では、第 4 章から第 7 章までの実験結果の総括的結論を述べ、今後に残された事項を示した。各実験結果より初期接合条件の適正範囲を示し、初期接合条件は接合開始部より離れた部分に与える影響は小さく、初期接合条件を適切に選定することにより強度差の少ない均一な継手が得られることを示した。

さらに、その他の物性値の大きく異なる素材を用いた同種、異種の組合せについて検討し、データベースを構築することを今後の検討課題としている。

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

平成 28 年 3 月 10 日