

氏名	佐藤裕
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成13年12月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成9年3月 東北大学大学院工学研究科材料加工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	アルミニウム合金Friction Stir接合部の材料組織学的研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 粉川博之 東北大学教授 池田圭介 東北大学教授 丸山公一

論文内容要旨

第1章 序論

近年、鉄道車両、自動車などの輸送機器の軽量化が命題となっている。これを達成する方法の1つに、軽量かつ高比強度を有するアルミニウム (Al) 合金への材料置換が挙げられる。Al合金を用いて大型輸送機器を作製する場合、溶接施工が必要不可欠なプロセスとなるが、Al合金に対する溶融溶接では、溶接欠陥が発生しやすい、溶接ひずみが多い、機械的特性が著しく低下するなどのさまざまな問題点が存在する。そのため、Al合金による大型構造物の作製は敬遠されてきた。

しかし、1991年にこれら問題点を一気に解決しうる画期的な接合法が開発された。この接合法は、Friction Stir接合と呼ばれており、図1に示すように、突き合わせた接合面に、ピンとショルダーから構成される特殊ツールのピンが押し入る過程で摩擦熱が発生維持され、材料が軟化すると同時に接合面に沿ってツールを動かすというものである。この方法は、摩擦熱と塑性流動に特徴付けられる固相接合法であり、溶接欠陥が発生せず、溶接ひずみも少ないなどのさまざまな特長を有する。それゆえ、開発と同時に国内外で盛んに応用研究が進められ、開発から10年足らずの間に製品に適用されはじめている。

その一方で、Friction Stir接合の接合機構や接合部のマイクロ組織などに関する基礎的知見は、未解決のまま残されている。接合部のマイクロ組織は、局部的に導入される摩擦熱と塑性流動によって複雑な影響を受けて形成され、接合部に極めて不均一な諸特性分布をもたらす。この局部的なマイクロ組織の特徴ならびに形成機構を、諸特性分布と関連づけて解

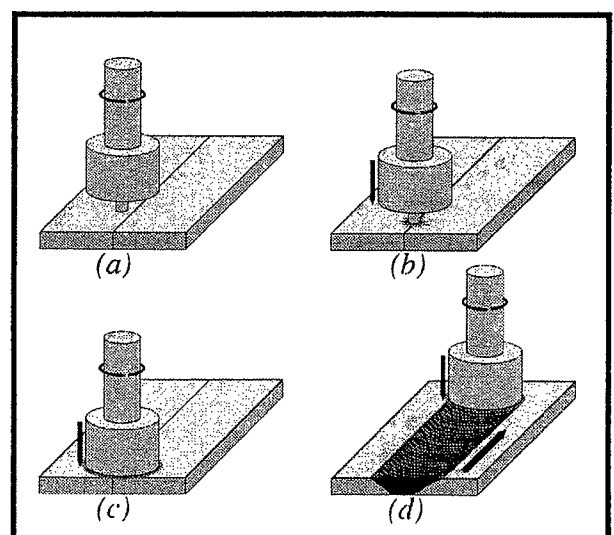


図1 Friction Stir 接合の模式図

明することは、接合部の諸特性向上ならびに接合プロセスの最適化に関する指針を提示しうるばかりでなく、Friction Stir接合自体ならびにFriction Stir接合部を含む構造物全体の信頼性向上のためにも極めて重要である。

本研究は、このような背景に基づいて、各種Al合金Friction Stir接合部の材料組織学的特徴とその形成機構を、局所的な機械的特性と関連づけながら世界に先駆けて調査し、本接合法に関する基礎的知見と諸特性を制御するための指針を提供することを目的に行われた。

第2章 純Alおよび固溶強化型5083Al合金Friction Stir接合部の硬度分布とマイクロ組織

本章では、Friction Stir接合部の機械的特性が結晶粒径や転位密度などに影響を受ける純Alおよび固溶強化型Al合金Friction Stir接合部の硬度分布とマイクロ組織の関係について検討した。

工業用純Al (1080Al合金) のFriction Stir接合部の場合、攪拌部で母材よりも若干高い硬度を示し、攪拌部と母材部の間に位置する加工熱影響部 (以後、TMAZと略す) では最高硬度値を示した。組織観察の結果、攪拌部では転位密度の低い微細な等軸粒を、TMAZでは微細なsubgrain組織を観察した。すなわち、接合時の摩擦熱と塑性流動の影響により、Friction Stir接合部の攪拌部は再結晶粒組織、TMAZはよく発達した回復組織となることを明らかにした。硬度分布との関係としては、攪拌部およびTMAZにおける硬度上昇は微細な再結晶粒およびsubgrainによって得られることを示した。

次に、Friction Stir接合による微細な再結晶粒およびsubgrainの生成という特徴を活かして、微細結晶粒Al合金に対するFriction Stir接合の効果を検討した。本研究では、微細結晶粒Al合金としてECAPを施した1050Al合金を用いた。ECAPにより1050Al合金中にはサブミクロンオーダーの転位セル組織が形成され、その硬度はECAPを行う前の2倍近い値を示した。この材料にFriction Stir接合を施すと、攪拌部およびTMAZにサブミクロンオーダーの再結晶粒およびsubgrainが形成され、その接合部にECAP材並みの高い値を維持することができた。攪拌部における硬度と結晶粒径の関係は、Hall-Petchの関係式に従い、硬度に及ぼす粒径の影響 (Hall-Petchの関係式の傾き k_H) として $k_H = 19 \text{ Hv } \mu\text{m}^{1/2}$ を導出した。

5083Al合金Friction Stir接合部の場合、硬度分布はばらつきが大きいもののほぼ均一となった。組織観察により、攪拌部およびTMAZにおいて、微細な再結晶粒組織および回復組織の存在を確認した。また、接合部全体に100nm以下の微細な分散粒子を多数観察した。この接合部の硬度分布は、Hall-Petchの関係では説明できず、微細分散粒子による分散強化の影響 (Orowan機構) によって説明できることを示した。

本章から、固溶強化型Al合金Friction Stir接合部の硬度分布は、微細分散粒子を含まない場合には結晶粒径分布によって決まるが、微細分散粒子が多数存在する場合にはこの分散状態が支配的となることを明らかにした。

第3章 析出強化型6063Al合金Friction Stir接合部のマイクロ組織形成機構

本章では、Friction Stir接合部の機械的特性が微細析出物による析出強化に影響される場合について検討した。

6063Al合金Friction Stir接合部の硬度分布は、接合中心付近の広い領域で低下した。組織観察により、析出強化型Al合金Friction Stir接合部の硬度分布は、結晶粒径ではなく、強化析出物の密度によって説明できることを示した。

接合時の摩擦熱の影響を、さまざまなピーク温度を有する擬似熱サイクルを母材に付与し、その後の硬度および析出物分布を接合部と比較することにより調べた。ピーク温度が473K以上になると強化析出物の粗大化が生じ、その結果硬度が低下した。623K以上では強

化析出物の溶解が生じて、著しい硬度低下が起こった。この結果から、接合中心付近の軟化領域は、接合時に623K以上に加熱されていることを示した。

さらに、6063Al合金Friction Stir接合部に対して、接合後人工時効熱処理を行うと、as-welded接合部の軟化領域において強化析出物の再析出により著しい硬度上昇が生じた。その結果、接合部全体で供試材以上の硬度を得たが、as-welded状態で過時効組織となった領域では、人工時効熱処理に伴う硬度上昇量が小さく最低硬度値を取ることを示した。

第4章 6063Al合金Friction Stir接合部の硬度およびミクロ組織

に及ぼす接合条件および初期組織の影響

本章では、接合時の析出状態および硬度分布に及ぼす接合条件や母材の析出状態の影響を、6063Al合金T5材（析出物あり）とT4材（析出物なし）に対して特殊ツールの回転数のみを変化させたFriction Stir接合を適用することにより調べた。また、接合中の最高加熱温度と再結晶粒径との関係を議論し、攪拌部の再結晶粒組織の形成機構についても検討した。

接合時の最高加熱温度は回転数とともに増加した。攪拌部の結晶粒径は最高加熱温度とともに指数関数的に増加することを示した。この結果から、攪拌部の再結晶粒組織が、再結晶粒の核発生後に静的粒成長を経て形成されることを示唆した。

異なった回転数で接合したT5材接合部の硬度分布は、前章と同じ傾向を示した。軟化領域の硬度値は回転数に依存しないが、軟化領域の幅は回転数とともに増加した。接合後再時効熱処理を行うと、前章と同様、軟化領域の硬度は著しく増加した。しかし、過時効領域と低い回転数にて接合した攪拌部では、再時効熱処理に伴う硬度上昇が少なかった。一方、T4材接合部の場合、as-welded状態および再時効後とも極めて均一な硬度分布を得た。しかし、低い回転数にて接合した攪拌部のみ、再時効熱処理に伴う硬度上昇が少なかった。材料組織学的検討の結果、この低回転数で接合した攪拌部の場合、他の領域よりも結晶粒径が小さく、これに起因してPFZの体積が増加するため、再時効熱処理に伴う硬度上昇が他の領域よりも低くなることを示唆した。

第5章 6063Al合金Friction Stir接合部の引張特性とミクロ組織

第2章から第5章において、Friction Stir接合部における局所的なミクロ組織と機械的特性の関連性について議論した。本章では、Friction Stir接合部全体が示す引張特性とそれに起因するミクロ組織的因子について検討した。

6063Al合金Friction Stir接合部のas-welded状態における硬度分布は、第3章と同じ傾向を示した（この接合部をas接合部と呼ぶ）。再時効熱処理を行うと、軟化部の硬度が著しく上昇するが、過時効領域でのみ硬度上昇量が少ない傾向を示した（この接合部をA接合部と呼ぶ）。また、溶体化処理+時効処理を行った結果、全体に均一な硬度分布を達成できた（この接合部をSHTA接合部と呼ぶ）。これら接合部に対して引張試験を行うと、as接合部およびA接合部では最小硬度部で破断した。降伏強度は、最小硬度値と比例関係にあることを示した。一方、SHTA接合部は母材部で破断した。OIMによる結晶方位解析の結果、母材部は他の領域よりもTaylor因子の平均値が小さい結晶粒を多く含んでいることが明らかとなった。すなわち、Friction Stir接合部の硬度分布が不均一な場合、破断は最小硬度部で生じるが、均一な場合にはTaylor因子に依存することを示唆した。

第6章 Al合金Friction Stir接合部の局部集合組織と塑性流動

前章で、Friction Stir接合部の硬度分布が均一な場合、破断はTaylor因子分布に依存することを示唆した。Taylor因子はひずみテンソルと結晶方位の関数である。Friction Stir接合部

の結晶方位分布は、接合時の塑性流動挙動に起因するため、接合部に形成される局部集合組織を解析することによって塑性流動に関する検討を行った。

Friction Stir接合部の接合中心上では、典型的なせん断集合組織を検出した。このせん断面は特殊ツールのピン円柱表面に、せん断方向は回転方向にほぼ平行であった。すなわち、Friction Stir接合の塑性流動は、ピンの円柱表面に沿って回転方向に向かうせん断応力によってもたらされることを解明した。Friction Stir接合部に対して773K付近に10s保持する熱処理を施すと、このせん断集合組織成分が<111>軸回りに40°回転した。加工集合組織の<111>軸回りの40°回転関係は、一般的な静的再結晶の特徴であるため、Friction Stir接合部は接合時に静的再結晶を経験することなく、動的再結晶粒の核が静的に粒成長する、いわゆる準動的再結晶によって形成されることを明らかにした。

第7章 結 言

第2章から第6章の内容の要約し、全体をとおした総括並びに今後の展望について示した。

論文審査結果の要旨

Friction Stir接合は、溶接が難しいAl合金の接合を容易に達成できる新接合法として注目され、輸送機器をはじめとした実機への適用が現在盛んに進められている。しかし、Friction Stir接合部の諸特性を支配する材料組織学的知見は未だほとんど得られていない。本研究は、Al合金Friction Stir接合部の材料組織的特徴を明らかにし、接合部の機械的特性を支配する材料組織的因子ならびにマイクロ組織形成機構を解明することを目的としている。論文は全編7章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、固溶強化型Al合金接合部のマイクロ組織分布を調べ、接合中心から離れるに従って、微細な再結晶粒組織、回復組織、母材組織と遷移することを示している。一般に固溶強化型Al合金接合部では微細再結晶粒組織により硬度が上昇するが、微細分散粒子を多数含有する場合には、接合部の硬度は粒子の微細分散にも支配されることを示している。

第3章では、析出強化型6063Al合金接合部の硬度分布とマイクロ組織の関係を調べ、硬度が結晶粒径よりも強化析出物の密度に主に依存することを示している。また、接合時ならびに接合後熱処理時に生じる析出現象を明らかにし、硬度変化との対応について述べている。

第4章では、6063Al合金接合部のマイクロ組織と硬度分布に及ぼす接合条件ならびに初期組織の影響について調べている。接合条件の変化によって、再結晶粒径が変化し、人工時効熱処理時の析出現象に大きな影響を及ぼすことを明らかにしている。また、溶体化状態の6063Al合金をFriction Stir接合後人工時効熱処理を行うと、均一かつ高い硬度分布が得られることを示している。

第5章では、6063Al合金接合部のマイクロ組織と引張特性の関係を調べ、最小硬度値が引張強度に比例することを示している。破断は、接合部の硬度分布が不均一な場合には最小硬度部で、均一な場合にはTaylor因子の最小領域で生じることを明らかにしている。

第6章では、6063Al合金接合部の局部集合組織を調べ、接合ツールのピン表面で誘起されるせん断変形が接合の主要な役割を果たしていることを明らかにしている。また、接合部の再結晶粒が準動的再結晶により形成していることを明らかにしている。

第7章は本研究の結果をまとめた総括である。

以上要するに本論文は、強化機構の異なるAl合金Friction Stir接合部の機械的特性とマイクロ組織の関係およびマイクロ組織形成機構を明らかにしたものであり、材料加工プロセス学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。