アルミニウム合金と炭素鋼の摩擦圧接

篠田 剛*・河田 真一**・竹上 弘彰**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 53, No. 9 (2003), pp. 385-389

Friction welding of an 6061 aluminum alloy and a S45C carbon steel

Takeshi SHINODA*, Shiniti KAWATA** and Hiroaki TAKEGAMI**

Friction welding of dissimilar metals was performed to evaluate the formation of intermetallic compound during welding. In our research, A6061 aluminum alloy and S45C carbon steel were applied to investigate effect of friction welding parameters on the strength of welded joint. A continuous drive vertical friction welding machine was employed. Tensile test results revealed that the maximum tensile strength was achieved at extremely short friction time and high upset pressure, that was friction time 1 s and upset pressure about 250 MPa. The joint strength reached 92% of the tensile strength of A6061 base metal. Tensile strength of friction welding was increasing with increasing upset pressure under friction time 1 s. However, tensile properties were deteriorated with increasing friction time. Prolonged friction time to 3 s was given less joint strength 52% than that of 1 s. It was observed that the amount of intermetallic compound was increasing with increasing friction time at weld interface. Partly formed intermetallic compound on weld interface were recognized at friction time 1 s. However, intermetallic compound layer were severely developed with longer friction time at weld interface. Consequently it was concluded intermetallic compound layer deteriorated the tensile properties of weld joints.

(Received April 9, 2003)

Keywords: friction welding, 6061 aluminum alloy, S45C carbon steel, joint efficiency, intermetallic compound

1. 緒 言

近年、省資源・省エネルギーという観点から構造物の軽量化に対する必要性は高まっている。特にアルミニウム合金は加工性、リサイクル性に優れており¹⁾ 軽量化材料としてその需要は高まってきている。ここで、軽量化を目的としたアルミニウム合金と構造物に多く用いられる鋼材との異種材料接合技術が必要不可欠となる。また、軽量化以外にも構造物の複雑化により単一材料での作製が困難な場合、高価な金属のコストダウンと材料節約を必要とする場合、異なった熱伝導率や電気特性を必要とする場合などアルミニウム合金と異種材料の接合技術²⁾ は様々な点でその重要性を増している。

アルミニウム合金と異種材料の接合に対してはアーク溶接などの熔融溶接法が挙げられる。しかし、これらの方法は接合部において溶融を伴うため、凝固割れの発生やブローホールの形成が起こり易く健全な溶接部が得にくいという問題点がある³⁾。また、アルミニウム合金と炭素鋼の接合を行う場合、最大の問題となるのが接合界面に形成する金属間化合物である。この金属間化合物そのものの結合はかなり強いが、この層がある程度厚くなり安定化すると金属間化合物相と母相との界面、金属間化合物同士の界面強度は必ずしも高くない。熔融溶接を行うと両部材が溶融・拡散するため多くの金属間化合物が形成する。それに対し、摩擦圧接法は固相接合であるため接合界面の到達温度が低く、接合が短時間である

などの点から金属間化合物の形成量を抑えることができる。

本研究では、アルミニウム合金 A6061 と炭素鋼 S45C の摩擦圧接を行い、摩擦圧接パラメータが接合強度にどのように影響を及ぼすのかを調査することを目的とした。評価には引張試験、接合界面の温度測定、接合界面の顕微鏡観察、硬度測定を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

本実験では、供試材として直径 20 mm 中実丸棒の炭素鋼 S45C およびアルミニウム合金 A6061 をそれぞれ長さ 95 mm に旋盤加工したものを使用した。なお、両部材とも接合面の脱脂、洗浄等を行っていない。

2.2 摩擦圧接装置および実験条件

摩擦圧接装置として、日東機械製プレーキ式縦型摩擦圧接装置を用いた⁴⁾。実験は回転側に A6061、固定側に S45C を取付けて行った。

摩擦圧接条件を Table 1 に示す。摩擦圧接条件のうち回転数 N 、摩擦圧力 P_1 、アプセット時間 t_2 を固定し、アプセット圧力 P_2 、摩擦時間 t_1 を変化させて継手を作成した。なお、接合時の入熱量を抑えることを目的として回転数は従来の文献値^{5),6)} よりも高い 4000 rpm (66.7 s^{-1}) を用いた。

2.3 引張試験

引張試験片は JISZ2201 4号試験片に準じて平行部長さ

* 名古屋大学工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)。Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603). E-mail: shinoda@numse.nagoya-u.ac.jp

** 名古屋大学大学院工学研究科 (名古屋市)。Graduate School of Engineering, Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi).

Table 1 Friction welding conditions

Friction pressure, P_1 (MPa)	19.1
Friction time, t_1 (s)	1, 3, 5
Upset pressure, P_2 (MPa)	19.1–296.5
Upset time, t_2 (s)	10
Rotational speed, N (rpm)	4000

Fig. 1 Specimen dimensions for thermal cycle measurement during friction welding.

20 mm, 直径 14 mm に加工したものを使用した。

2.4 接合界面の温度測定

Fig. 1 に温度測定の概略図を示す。温度測定には直径 0.3 mm のクロメル-アルメル熱電対を使用し、絶縁管には直径 3 mm の丸型 2 穴絶縁管を用いた。温度測定用試験片は S45C 試験片を **Fig. 1** のように加工し、接合界面とドリル穴 (直径 3.2 mm) 先端との距離が 0.3 mm となるようにした。その後、熱電対を丸棒の中心部 (以後センタと称する) および半径方向 1/2 (以後ハーフセンタと称する) の位置にパークッション溶接し、温度測定用試験片を作成した。摩擦圧接終了後、熱電対の取付け位置をマクロ断面観察で確認したところ、熱電対先端は接合界面から約 0.3 mm の位置であった。

2.5 硬度測定

硬度測定は接合界面の中心から軸方向に 0.2 mm 間隔、試験力 0.98 N、保持時間 15 s で行った。S45C 側の硬度に変化はみられなかったため、A6061 側の硬度分布について検討した。

A6061 側軟化域の傾向を明確に調査するために硬度が母材まで回復した点ではなく、**Fig. 2** に示すように最軟化域の平

Fig. 2 Definition of softened zone width: d . ($P_1=19.1$ MPa, $t_1=1$ s, $P_2=19.1$ MPa, $t_2=10$ s, $N=4000$ rpm) **Fig. 3** Appearance of friction welded joint. ($P_1=19.1$ MPa, $t_1=3$ s, $P_2=95.5$ MPa, $t_2=10$ s, $N=4000$ rpm)

均硬度と母材硬度 (109.1 HV) の中間まで達した点までを軟化域幅: d と定義し、この d を用いて評価を行うこととした。

2.6 接合界面の顕微鏡観察

摩擦圧接接合試験片の断面を切出し、バフ研磨した。3% Nital でエッチングを行い、レーザ顕微鏡による接合界面の組織観察を行った。また、接合界面における金属間化合物の分布を調査するため、接合界面近傍に界面と平行に 0.5 mm 間隔で位置標定の圧痕を打った。そして、レーザ顕微鏡を用い倍率 2000 倍で各圧痕間の金属間化合物分布を調査した。金属間化合物の層が形成されている領域 (Precipitated), 部分的に形成している領域 (Partly precipitated), 形成がまったく見られない領域 (Not precipitated) に分類し評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 継手強度

Fig. 3 に本実験で得られた代表的な継手外観を示す。摩擦圧接条件によりばりの形状は異なるが、変形は A6061 側の

Fig. 4 Relationship between upset pressure and joint efficiency.

み生じ、S45C 側の変形はなかった。

引張試験では、すべての条件において破断位置は接合界面となったが、最大で A6061 母材引張強さの 92% 程度の継手強度が得られた。摩擦時間 $t_1=1$ および 3s におけるアプセット圧力と継手効率の関係を Fig. 4 に示す。ここで、継手効率は A6061 母材引張強さ (308 MPa) を 100% とした。同図より、アプセット圧力の増加に伴い継手効率が上昇する。摩擦時間 $t_1=1$ s では、高アプセット圧力において継手効率にばらつきが見られるが、 $P_2=250$ MPa 付近で最大値を示した。摩擦時間 $t_1=3$ s では、 $P_2=95.5$ MPa 以上で継手効率はほぼ一定の約 50% となった。また、アプセット圧力 47.7 MPa 以下の条件を除き、摩擦時間 $t_1=1$ s の方が摩擦時間 $t_1=3$ s と比べて継手効率は高い傾向が認められる。

接合界面の組織観察から、摩擦時間によらずアプセット圧力 47.7 MPa 以下において接合界面に多数のボイド状欠陥が確認された。さらに、この欠陥数はアプセット圧力の増加とともに減少し、アプセット圧力 95.5 MPa 以上においては観察されなかった。したがって、アプセット圧力 47.7 MPa 以下における継手効率の上昇は接合界面での欠陥減少によるものと考えられる。

以後、摩擦時間が継手効率に及ぼす影響について考察を行った。

3.2 硬度分布

A6061 側の硬度分布と継手効率の関係について考察を行った。Fig. 5 に軟化域幅: d と全寄り代の関係を示す。図より全寄り代が増加するに伴い、 d は減少する。これは、全寄り代の増加により、ばりとして排出される軟化域が増加するためであると考えられる。ただし、摩擦時間 $t_1=1$ s で全寄り代約 5 mm 以上の場合、軟化域幅: d は減少しなかった。これは、摩擦時間 $t_1=1$ s で全寄り代約 5 mm 以上の条件では、界面近傍の軟化域はばりとして排出されずに残り、増加した寄り代がばりとして排出されるためだと考えられる。摩擦時間 $t_1=1$ s と比べ摩擦時間 $t_1=3$ s では、入熱量が大きいため軟化域幅: d は大きく、その減少率も大きくなった。

Fig. 6 に継手効率と軟化域幅: d の関係を示す。摩擦時間 $t_1=1$ s では軟化域幅: d の減少に伴い継手効率が上昇した。摩擦時間 $t_1=3$ s では軟化域幅: d は大きく減少したが、継手効率はあまり上昇しなかった。しかしながら、軟化域幅: d で継手効率を整理すれば摩擦時間の相違も同一傾向に入るようである。したがって、軟化域幅: d を減少させることが継

Fig. 5 Relationship between softened zone width: d and total upset distance.

Fig. 6 Relationship between joint efficiency and softened zone width: d .

手効率増加に有効である。

3.3 接合界面温度

摩擦時間に対する接合界面センタおよびハーフセンタでの温度測定結果を、Fig. 7 および Fig. 8 に示す。図中には、摩擦圧力 = アプセット圧力で摩擦時間 $t_1=1$ および 5s の温度曲線を示した。接合界面温度は試験片の接触と同時に急速に上昇していき、その後定常状態となり回転停止と同時に減少した。また、すべての条件において、得られた接合界面の最高到達温度は A6061 アルミニウム合金の固相線温度 855 K⁷⁾ を超えていなかった。

測定位置センタでは、摩擦時間 $t_1=1$ s で最高到達温度が 781 K、摩擦時間 $t_1=5$ s で最高到達温度が 819 K となり、摩擦時間 $t_1=3$ s 程度ではほぼ定常状態の約 813 K となった。それに対し、測定位置ハーフセンタではセンタよりも温度上昇勾配が急であり、摩擦時間 $t_1=1$ s のときすでに最高到達温度は約 813 K となり、その後その温度に保持された。測定位置ハーフセンタでは摩擦時間 $t_1=1$ s で定常状態となった。接合界面ではセンタよりもハーフセンタの方が定常状態に達するまでの時間が短く、高温に保持される時間も長いことがわかった。これは、外周ほど周速が大きく発熱が大きいためであると考えられる。

3.4 接合界面組織

摩擦時間 $t_1=1, 3$ および 5s における接合界面の組織写真を Fig. 9 に示す。図中では、上側が A6061 アルミニウム合金、下側が S45C 炭素鋼である。組織観察はセンタ付近および

Fig. 7 Results of measured friction welding thermal cycle at center. ($P_1=P_2=19.1$ MPa, $t_2=10$ s, $N=4000$ rpm)

Fig. 8 Results of measured friction welding thermal cycle at half center. ($P_1=P_2=19.1$ MPa, $t_2=10$ s, $N=4000$ rpm)

Fig. 9 Microstructures of weld interface. (upper side: A6061, downside: S45C)

ハーフセンタ付近で行い、金属間化合物形成の有無は倍率2000倍で確認した。得られた金属間化合物の同定は行っていないが、アルミニウム合金と炭素鋼を供試材とした摩擦圧接に関する論文^{(6),(8)~(10)}より、 Fe_2Al_3 あるいは $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ と考えられる。

Fig. 10 Effect of friction time t_1 on intermetallic compound distribution at weld interface. ($P_1=P_2=19.1$ MPa)

摩擦時間 $t_1=1$ s では、ハーフセンタ付近に金属間化合物が部分的に形成したが、センタ付近に金属間化合物は確認されなかった。摩擦時間 $t_1=3$ s になると、ハーフセンタ付近に数 μm 程度の金属間化合物の層が確認され、センタ付近にも部分的な形成が見られるようになった。さらに摩擦時間 $t_1=5$ s では、センタ・ハーフセンタ付近ともに金属間化合物の層が確認された。しかし、金属間化合物層の厚さはセンタ付近よりもハーフセンタ付近の方がわずかに厚かった。これは界面温度の測定結果より、測定位置ハーフセンタでの温度上昇勾配は測定位置センタよりも大きく、測定位置ハーフセンタの方が高温に保持される時間は長い。結果として、Fe の Al マトリックス中および Al の Fe マトリックス中への拡散距離が増加したと考えられる⁹⁾。

3.5 摩擦時間による金属間化合物分布への影響

摩擦時間の違いによる接合界面の金属間化合物分布の様子を Fig. 10 に示す。この場合、アプセット圧力負荷により接合界面に形成した金属間化合物のばりへの排出等による影響を防止する目的でアプセット圧力を摩擦圧力と同値にした。さらに、各条件における継手効率を示す。図中では接合界面の中心からの距離に対する金属間化合物分布の様子を3領域に分けて示した。摩擦時間が増加するにしたがい金属間化合物が増加していくのがわかる。摩擦時間 $t_1=1$ s の場合、接合界面の金属間化合物は部分的な形成しか見られなかった。しかし、摩擦時間 $t_1=3$ および 5 s となると、金属間化合物が部分的に形成している領域は少なく、金属間化合物層の領域が多く見られるようになった。さらに、摩擦時間 $t_1=5$ s の方が化合物層の領域は広がった。

金属間化合物の形成位置を検討すると、摩擦時間 $t_1=1$ s の場合、ハーフセンタ付近を中心に部分的な形成が見られる。摩擦時間 $t_1=3$ s になると、摩擦時間 $t_1=1$ s の際に部分的な形成であった領域とさらにセンタよりの領域に層が形成され、センタ付近においては部分的な形成が確認されるようになった。摩擦時間 $t_1=5$ s では、摩擦時間 $t_1=3$ s のときに部分的な形成であったセンタ付近においても層が形成され、部分的な形成領域はさらに狭まった。しかし、図中で摩擦時間 $t_1=5$ s のハーフセンタ付近片側に金属間化合物の形成がまったく見られない。これは接合界面の組織観察から、この位置において巨視的なボイド状の欠陥が接合界面に存在していたため、金属間化合物が形成されなかったと考えられる。また、どの条件においても接合界面外周部には金属間化合物の形成が見られなかった。これは、接合界面外周部では空気中へと摩擦熱を放熱することから、センタあるいはハーフセンタに比べ

Fig. 11 Effect of upset pressure on intermetallic compound distribution at weld interface. (Friction time $t_1=1$ s)

て見掛けの熱伝導が大きく、温度上昇が低かったためと考えられる。

各条件の継手効率を比較すると、摩擦時間が増加し接合界面の金属間化合物形成量が増加するにしたがい継手効率は減少した。

3.6 アプセット圧力による金属間化合物分布への影響

Fig. 11 に摩擦時間 $t_1=1$ s でアプセット圧力を摩擦圧力の 15 倍まで変化させた際の接合界面における金属間化合物の分布および各条件の継手効率を示す。アプセット圧力と摩擦圧力の比が 3, 10 および 15 の場合、センタ付近において金属間化合物の部分的な形成、アプセット圧力と摩擦圧力比が 5 の場合、接合界面の一部に金属間化合物の層が確認できた。しかし、金属間化合物の形成量・形成位置に対し、アプセット圧力の変化による明確な影響はみられなかった。著者の純アルミニウムと低炭素鋼の摩擦圧接に関する研究⁹⁾において、アプセット過程での発熱による接合界面温度上昇は、アプセット圧力を負荷する直前に比べ 10 度程度しかないことを報告している。したがって、この程度の温度上昇ではアプセット圧力が金属間化合物の形成に影響を与えることはほとんどないと考えられる。

3.1 節の結果より、摩擦時間 $t_1=1$ s の条件で得られる継手効率はアプセット圧力の増加に伴い増加することがわかった。したがって、接合界面で金属間化合物が部分的な形成であること、また金属間化合物の分布がアプセット圧力によりほとんど影響を受けていないことから、継手効率の増加はアプセット圧力の増加により、接合界面で A6061 と S45C の金属結合力が大きくなったためだと考えられる。ここで、金属結合力は接合界面の金属間化合物が形成されていない領域において、A6061 と S45C が金属間化合物を介さずに結合する結合力である。

次に、摩擦時間 $t_1=3$ s と長くしアプセット圧力を摩擦圧力の 7.5 倍まで変化させた際の接合界面における金属間化合物の分布および各条件の継手効率を Fig. 12 に示す。摩擦時間 $t_1=1$ s の場合と同様に、金属間化合物の形成量・形成位置に対するアプセット圧力の影響は見られなかった。3.1 節の結果より摩擦時間 $t_1=3$ s の場合、アプセット圧力の増加に伴い継手効率が增加するのはアプセット圧力 47.7 MPa 以下であり、アプセット圧力が 95.5 MPa 以上では継手効率はほぼ一定となった。これは、金属間化合物の形成がアプセット圧力の影響をほとんど受けていないこと、また摩擦時間 $t_1=1$ s の

Fig. 12 Effect of upset pressure on intermetallic compound distribution at weld interface. (Friction time $t_1=3$ s)

場合と異なり接合界面に多くの金属間化合物層が形成されていることから、接合界面における A6061 と S45C の金属結合力の上昇が金属間化合物層によって阻害されたためだと考えられる。また、Elliot らによって行われた調査¹¹⁾から、アルミニウム合金と炭素鋼あるいはステンレス鋼の異種材の摩擦圧接において、金属間化合物層の形成厚さが $1\mu\text{m}$ 以下では機械的性質への影響はないとしている。本実験では、摩擦時間 $t_1=3$ s で得られた金属間化合物層厚さが $1\mu\text{m}$ より大きく、金属間化合物層の形成が継手強度に影響を与えたとも考えられる。

4. 結 論

A6061 アルミニウム合金と炭素鋼 S45C の摩擦圧接を行い、以下の結論を得た。

- (1) 接合界面に金属間化合物層が形成された場合、アプセット圧力を加えても 50% 以上の継手効率は得られなかった。
- (2) 接合界面に金属間化合物が部分的に形成した場合、アプセット圧力の増加に伴い継手効率は向上した。
- (3) 金属間化合物はセンタよりもハーフセンタに多くの形成が見られた。
- (4) 接合界面の温度上昇勾配はセンタよりもハーフセンタの方が急であった。

謝辞

本研究の一部は文部科学省の 21 世紀 COE プログラム「自然に学ぶ材料プロセッシングの創成」の援助を受けた。記してここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 沖田耕三, 有年雅敏, 富田友樹, 福本信次, 椿野晴繁: 摩擦圧接, 3-3 (1996), 110.
- 2) 摩擦圧接, (摩擦圧接協会編集), 摩擦圧接協会, (1979), 8.
- 3) 軽金属協会: アルミニウム技術の基礎と工業技術.
- 4) Hiroaki Takegami, Takeshi Shinoda and Yoshiaki Wakana: Proc. 05 Material Science International, Special Technical Publication-2, (2001), 439.
- 5) 越智 秀, 小川恒一, 山本義秋, 菅 泰雄: 材料 (J. Soc. Mat. Sci. Japan), **45** (1996), 459.
- 6) 川井五作, 小川恒一, 越智 秀, 時末 光: 軽金属溶接, **37** (1999), 295.
- 7) アルミニウム合金の組織と性質, (編集 40 周年記念事業委員会記念出版部会), 軽金属学会, (1991), 477.
- 8) 横山 隆, 山口真司: 軽金属, **49** (1999), 535.
- 9) 篠田 剛, 宮原一哉, 小川雅史, 遠藤誠一: Welding international, **15** (2001), 438.
- 10) 菊池廻夫, 武田裕正: 軽金属, **34** (1984), 165.
- 11) S. Elliott and E. R. Wallach: Metal Construction, **13** (1981), 221.