5052アルミニウム合金摩擦圧接継手の 機械的性質に及ぼす摩擦面の傾きの影響

加藤 数良*・時末 光*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 11 (1999), pp. 553-558

Effects of inclination angle of faying surface on the mechanical properties of friction welded joints of 5052 aluminum alloy

Kazuyoshi KATOH* and Hiroshi TOKISUE*

Effect of inclination of faying surface on the mechanical properties of 5052 aluminum alloy joints, which were welded by a brake type friction welding machine, has been investigated. The inclination angle of faying surface to the specimen axis was 0° to 25° . The axial shortening increases at first rapidly and then slowly with increase in the welding time. It is found that the initial axial shortening speed increases with increasing the inclination angle. Regardless of the friction time, both burn off length and total loss increased with increasing inclination angle. Heat affected zone of welded joints became narrower with increasing inclination of faying surface. The inclination of faying surface had no effects on the microstructures of joint. Hardness of weld zone was lower than that of the base metal. The width of softening zone tended to decrease with increase in the inclination angle. Tensile strength of the welded joints was 84% as large as that of the base metal independent of the inclination angle of faying surface. Regardless of both welding condition and inclination of faying surface, the elongation of welded joints was 81% as large as that of the base metal. All joints fractured at the heat affected zone.

(Received April 30, 1999)

Keywords: friction welding, inclination of faying surface, mechanical properties, 5052 aluminum alloy

1. 緒 言

固相接合の一種である摩擦圧接は、溶融溶接に比べて溶接条件の設定が比較的容易で、ラインに組込めるなど利点も多く、自動車産業を始めとした種々の産業分野で利用されている。一般に摩擦圧接を行う際に組合せる素材の断面形状は同一で、摩擦面は回転軸に対して垂直であることが望ましいとされている¹⁾。このため、摩擦圧接に関する研究の多くは異径材料を対象とした一部の研究^{2),3)}以外は、そのほとんどが形状、状態ともに理想的な摩擦面に加工して圧接した継手について検討されている⁴⁾。

しかし、一般の構造物を考えると断面形状は必ずしも同一であるとは限らず、圧接素材の製作工程を考えると鋸盤などで切断した状態では摩擦面には凹凸があり、軸心に対する傾きを持った状態となることが多い。傾きを生じたままの状態では接合が可能であれば、圧接素材の前加工は容易となり、作業性も向上し経済的にも有利であると考えられる。摩擦圧接における異形断面の組合せについては、鉄鋼材料^{2),3)}やアルミニウム合金⁵⁾などの報告があるが、摩擦面に傾きがある組合せに関しては、鉄鋼材料に関する2,3の報告^{6)~8)}のみであり、アルミニウム合金に関しては見当たらないのが現状である。

本研究では、アルミニウム合金の摩擦圧接において、摩擦

面の傾きが継手の機械的性質に及ぼす影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材には、市販の5052BDS-Fアルミニウム合金丸棒(直径20 mm)を長さ80 mmに機械加工したものを用いた。供試材の化学組成および機械的性質をTable 1およびTable 2に示す。

圧接は、摩擦面を回転軸に対して垂直としたものと、Fig. 1に示すように機械加工により回転軸方向に対して 0° ~ 25° の傾きを付したものを組合せて行った。また摩擦面

Table 1 Chemical compositions of specimen (mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.09	0.18	0.01	0.00	0.23	0.16	0.00	bal.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness HV0.3	Impact value (kJ/m ²)
250	17.3	83.7	1324

* 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)。College of Industrial Technology, Nihon University (1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba, 275-8575)。

Fig. 1 Shape and size of specimen.

Table 3 Friction welding conditions

Rotational speed, n (s^{-1})	58
Friction pressure, P_1 (MPa)	30
Friction time, t_1 (s)	2, 4
Upset pressure, P_2 (MPa)	60
Upset time, t_2 (s)	5

に傾きを付した素材の最長側を L 側, 最短側を S 側と称す。

圧接には制動式摩擦圧接機を使用し, 著者らの研究結果^{9)~12)}より, アルミニウム合金の摩擦圧接で良好な継手が得られた摩擦圧力, アブセット圧力を選定して予備実験を行い, 摩擦寄り代が約0.5 mm および 3 mm となる Table 3 に示す圧接条件により傾きを付した素材を固定側として圧接を行った。また圧接時の各圧力は摩擦面に傾きがないものとして設定した。

得られた継手の組織観察, 硬さ試験および接合面をゲージ部中央とした JIS 4 号試験片による引張試験を行った。また寄り代の変化をデジマチックインジケータを用い, その出力をカセット式データレコーダにより記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 継手外観および組織観察

圧接継手の外観の一例を Fig. 2 に示す。継手のばりは摩擦面の傾きが増大するに伴い L 側と S 側に差が認められ, L 側のばりが若干大きくなった。また得られた継手の S 側のばりは傾きのない素材を用いて同一条件によった継手のばりに比べて小さかった。これは摩擦面に傾きのない素材を用いた場合に比較して, 傾きがあるときには全面が接触するまでに時間を要し, 全面で摩擦発熱する時間が短く, 全発熱量が減少するためである。この傾向は摩擦時間 2 秒および 4 秒ともに同様に観察され, 特に摩擦時間が短い条件で顕著に認められた。

圧接継手の巨視的組織の一例を Fig. 3 に示す。写真はいずれも上部が L 側である。L 側では摩擦開始から摩擦面全面が接触するまでは, ばりは外部および S 側に排出される。このため傾きのある素材を用いた継手の L 側の接合面は傾きのない継手に類似した様相を呈したが, S 側には L 側より排出されたばりが継手内部に残存しているのが確認された。L 側から S 側へ排出されたばりは摩擦開始当初は S 側に生じた相手素材との空隙を埋め, 摩擦面全面が接触するまでの時間を短縮する効果をもたらすものと考えられる。

継手の L 側から S 側に排出されたばりが接合部内に残存

Fig. 2 Appearances of friction welded joints.

Fig. 3 Macrostructures of friction welded joints. The upper side is L side.

する現象をより明確に観察するために, 摩擦面の傾きを45°として圧接した継手の外観と巨視的組織を Fig. 4 に示す。ばりは明らかに外部と L 側から S 側へ排出され, 接合部内に残存していることが明瞭に観察された。また摩擦面の傾きが45°と大きい場合には, S 側に未接合部が認められる。摩擦時間を長くすることにより後述する継手の硬さ分布に認められる軟化域を拡大する可能性はあるが, 全面で接合した継手を得ることは可能であると考えられる。

Fig. 4 Appearance and macrostructure of friction welded joint. Inclination of faying surface: 45° . Friction time: 2 s.

圧接継手の微視的組織の一例としてS側接合面近傍の組織をFig. 5に示す。傾きのない素材を用いた継手の接合面には未接合部は観察されず、良好な接合面が得られ、接合界面および熱影響部の組織形態は他の組成のアルミニウム合金摩擦圧接継手^{8),9)}と類似した様相であった。すなわち、接合界面近傍は微細で接合面に平行に繊維状組織が観察され、接合面よりわずかに離れた部分にはばりの排出方向に沿って繊維状組織が変化する様相が観察された。傾きがある素材を用いた継手においては、摩擦過程で最も遅く摩擦されるS側は中心部に比べて組織変化の認められるいわゆる熱影響部の幅が狭く、摩擦面の傾きが大きい場合には一部に微小な未接合部が観察されるものもあった。このことは傾きが大きくなると、S側は摩擦される時間が短くなるために十分に加熱されず、未接合部が生じやすくなるためと考える。また摩擦面の傾きが増加するに伴い未接合部の観察される範囲も拡大する傾向が認められた。この傾向は摩擦時間の長短にかかわ

らず同一であるが、摩擦面の傾きが同一ならば摩擦時間が長い条件では未接合部が観察される範囲は狭くなった。また熱影響部はその軸方向の範囲は若干異なるが、組織には摩擦面の傾きによる明瞭な差異は認められなかった。

3.2 寄り代の挙動

摩擦圧接過程における寄り代の挙動を連続記録した一例をFig. 6に示す。傾きのない素材を用いた場合には摩擦過程での寄り代は一定の速度で変化し、アプセット過程の初期に寄り代は急激に増大し、以後一定値を示す。傾きのある素材を用いたときには摩擦過程初期に急激に寄り代は増大し、以後摩擦過程終了まで一定速度で寄り代は増加する。またアプセット過程の寄り代の変化は摩擦面に傾きがある素材を用いた場合も、摩擦面に傾きのない素材を用いたときと類似の変化を示した。ここで、摩擦面に傾きのある素材を用いた摩擦圧接において、摩擦過程初期の急激な寄り代の変化を示す部分を第1ステージと呼び、このときの摩擦寄り速度を初期摩擦寄り速度と呼ぶ。また寄り代の変化が定常状態となった部分を第2ステージ、このときの摩擦寄り速度を定常摩擦寄り速度と呼ぶ。

第1ステージおよび第2ステージ終了直後の継手外観の一例をFig. 7に示す。第1ステージ終了時にはL側外周部にばりの張出しがわずかに観察され、S側にもばりの張出しが認められた。第2ステージ終了時、すなわち摩擦過程終了時には摩擦面は全面で接触しており、外部に排出されたばりはL側に比較してS側は非常に小さい。

摩擦面の傾きの大小による寄り代の挙動を記録した一例をFig. 8に示す。初期摩擦寄り速度で寄り代が増加する第1ステージに要する時間は摩擦面の傾きが大きくなるのに伴い長くなる傾向にある。例えば、摩擦面の傾きが 7° の場合には初期摩擦寄り速度で変形を示す時間は約0.5秒程度であるが、傾きが 25° となると摩擦面全面で接触した定常摩擦寄り速度となるまでに約1.5秒も要することが明らかとなった。この全面接触までに要する時間は使用する素材の摩擦面の傾きが同一であれば、使用する素材の高温変形抵抗の大きさに比例して変化するものと考えられる。

第1ステージの初期摩擦寄り速度および第2ステージの定常摩擦寄り速度を求めた結果をFig. 9に示す。初期摩擦寄

Fig. 5 Microstructures of S side of friction welded joints. Friction time: 4 s.

Fig. 6 Axial shortening histories of friction welding process. Friction time: 4 s.

Fig. 7 Appearances of friction welded joints. Inclination of faying surface: 15°.

り速度は摩擦面の傾きが増大するのに伴い大きくなる傾向が認められた。このことは、摩擦圧力の設定を摩擦面に傾きがないものとして設定しており、摩擦過程初期には摩擦推力を受持つ部分の面積が小さいことによるものと考えられる。定常摩擦寄り速度には摩擦面の傾きの大小による差異はほとんど認められず、摩擦面に傾きのない素材を用いた場合とほぼ同一の寄り速度であった。定常摩擦寄り速度に摩擦面の傾きの大小による差が認められなかったのは、第1ステージでL側よりS側へ排出されたばりが接合部の空隙を埋め全面接触状態と同一の状態になるためと考える。

寄り代の変化より初期摩擦寄り速度から定常摩擦寄り速度へ変化する時点、すなわち第1ステージ終了時の摩擦面積を幾何学的に求めた結果を Fig. 10 に示す。第1ステージ終了時の接触面積には若干のばらつきはあるが、摩擦面の傾きの大小にかかわらず幾何学的に求めた摩擦面積はほぼ一定値を示し、傾きのない素材を用いたときの接触面積すなわち全面接触時の約1/2であった。

Fig. 8 Axial shortening histories of friction welding process. Friction time: 2 s.

Fig. 9 Relation between inclination of faying surface and axial shortening speed on first stage and second stage.

Fig. 10 Relation between inclination and calculated results of frictional area.

このことより、摩擦面に傾きのある素材を用いた場合に摩擦面全面が接触するためにはL側よりS側に向かって発生するばりが両素材の未接触部を埋める必要がある。しかし、実際の摩擦過程では摩擦面外部へもばりの発生があるために摩擦面の傾きが大きい場合には全面接触状態となるまでに要する時間が長くなり未接合部が観察される確率が高くなるものとする。このことは、寄り代の挙動より幾何学的に摩擦面全面が接触する状態となる寄り代を算出した結果に比較し

Fig. 11 Relation between inclination of faying surface and total loss.

Fig. 12 Hardness distributions of friction welded joints. Friction time: 4 s.

て第1ステージ終了時の寄り代は若干大きい値を示したことからも推定できることである。

摩擦圧接継手の全寄り代は素材の全長と継手の全長の差で与えられ、継手の強度とよい相関を示すことから、生産現場では全寄り代を継手の品質保証の一手段として用いている¹⁰⁾。この全寄り代の測定結果を Fig. 11 に示す。ただし、傾きのある素材を用いた場合には素材の全長はL側の長さを用いて求めた。全寄り代は摩擦時間の長短によらず摩擦面の傾きが大きくなるのに伴い増大する傾向を示した。このことは、前述のように摩擦面の傾きが増加するのに伴い摩擦開始時に摩擦圧力を受持つ部分の面積が小さくなる。このため、摩擦面が全面で接触するまでにばりとして排出される素材の量が多くなるためと考える。

3.3 硬さ試験結果

継手軸心上の硬さ分布の測定結果を Fig. 12 に示す。摩擦面の傾きの大小によらず接合面の硬さは母材より低い値を示し、接合面の両側に軟化域が認められた。この軟化域は摩擦時間が短い場合には、摩擦面の傾きが大きくなるのに伴い最軟化部の位置は接合面に近づく傾向にあり、軟化域の幅も狭くなり最軟化部の硬さは高くなる傾向にあった。摩擦時間が長い継手も類似した硬さ分布を示すが、摩擦面の傾きの大小による軟化域の幅の差異は小さかった。また摩擦面の傾きが同一ならば摩擦時間が長い継手の最軟化部の硬さは小さくなった。継手の熱影響部に軟化域が認められることは加工硬化

Fig. 13 Relation between inclination of faying surface and tensile strength and elongation.

や熱処理により硬度を高めた素材を用いた継手に共通して認められる現象であり、摩擦過程の発熱量に依存するものと考えられる。

3.4 引張試験結果

摩擦面の傾きと継手の引張強さとの関係を Fig. 13 に示す。摩擦時間4秒では摩擦面に傾きのある素材を用いた継手の引張強さは、摩擦面の傾きの大小に関係なくほぼ一定の値を示した。摩擦時間2秒では、摩擦面の傾きが増加するのに伴わずかに引張強さは向上するが、傾きが7°以上では引張強さに差異は認められず、摩擦面に傾きのない素材を用いた継手の引張強さと同等の値を示し、最大値を示した継手では母材の84%の継手効率が得られた。

引張試験片の破断は、摩擦時間2秒で圧接した継手は摩擦面の傾きの有無によらず最軟化部でありカップアンドコーン状の破断であったが、一部に引張軸に対して斜めに破断するものも認められた。また摩擦時間4秒の継手は摩擦時間2秒の継手と比べて、軟化域の幅が若干広くなるためにいずれの条件でも破断は熱影響部でカップアンドコーン状の破断形態であった。

摩擦時間2秒の条件で摩擦面の傾きが増大するのに伴わずかではあるが継手の引張強さが向上することは、引張試験片の破断部となった熱影響部の軟化域が、摩擦面の傾きが大きくなることで摩擦過程での総発熱量が小さくなるために、軟化域の幅が狭くなり、かつ最軟化部の硬さの低下が抑制されることによるものと考えられる。

継手の伸びは摩擦面の傾きが小さいときには若干のばらつきが認められるが、ほぼ一定値を示し、いずれの継手も伸びは母材より若干低下し、母材の約81%であった。

4. 結 言

5052アルミニウム合金の摩擦圧接において、摩擦面の傾きを種々変化させた素材と傾きのない素材を組合せて摩擦圧接を行い、得られた継手の機械的性質に及ぼす摩擦面の傾きの影響について検討した結果、次の結論を得た。

(1) 継手のばりは、摩擦過程初期には傾きを付した素材の最長側から外部および最短側へ発生し、摩擦過程初期の摩擦寄り速度は全面接触時の摩擦寄り速度に比較して大きくなった。

(2) 摩擦面に傾きのある素材を用いた継手では、傾きが

きい場合に素材最短側の熱影響部は狭く、摩擦面の傾きや圧接条件によっては未接合部が観察されるものもあった。

(3) 継手の硬さ試験の結果、熱影響部に軟化域が認められ、摩擦時間 2 秒では摩擦面の傾きが大きいほど軟化域の幅は狭くなり、最軟化部の硬さは高い値を示した。摩擦時間 4 秒では摩擦面の傾きの大小が継手の硬さ分布に及ぼす影響は小さく、摩擦時間 2 秒に比べ軟化の割合は大きかった。

(4) 継手の引張強さに及ぼす摩擦面の傾きの影響は摩擦時間 4 秒ではほとんど認められなかったが、摩擦時間 2 秒のときに摩擦面の傾きが大きい継手の引張強さがわずかに向上し、最高値を示した条件では、継手効率は母材の 84% の値が得られた。伸びはいずれの条件においても母材の約 81% の値を示した。

以上の結果より、アルミニウム合金の摩擦圧接において、摩擦面の傾きは本実験の範囲内では、圧接条件が適切であれば摩擦面の傾きが継手の強度に及ぼす影響は小さく、摩擦面全面が接触した状態となる圧接条件を選択することで良好な継手が得られることが明らかとなった。

本研究の一部は財団法人軽金属奨学会教育研究資金によった。特記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) JIS Z 3607 (1994).
- 2) 沖田耕三, 有年雅敏, 岸本和一郎, 山田桑太郎, 平 博仁: 溶接学会誌, 50 (1981), 189.
- 3) 沖田耕三, 有年雅敏, 山田桑太郎, 平 博仁: 溶接学会誌, 50 (1981), 764.
- 4) 例えば, S. D. Bhole: Welding Journal, 70 (1991), 168s.
- 5) 加藤数良, 時末 光: 軽金属, 41 (1991), 809.
- 6) 蓮井 淳, 河本守人, 野寺康弘, 宮田貴之, 村山弘信, 金子善弘, 田上義徳: 摩擦圧接協会研究会資料 No. 350 (1993), 1.
- 7) 蓮井 淳, 河本守人, 野寺康弘, 宮田貴之, 村山弘信, 金子善弘, 田上義徳: 摩擦圧接, 1 (1994), 47.
- 8) 蓮井 淳, 荒井智宏, 酒井 渉, 島貫英典, 菅原 功, 小川徳裕, 金子善弘, 田上義徳: 摩擦圧接, 2 (1995), 53.
- 9) 加藤数良, 時末 光: 軽金属, 40 (1990), 351.
- 10) 摩擦圧接研究会編: 摩擦圧接, (1979), 122.
- 11) 加藤数良, 時末 光: 軽金属溶接, 32 (1994), 147.
- 12) 加藤数良, 時末 光: 軽金属, 48 (1998), 400.