研究論文

インサートメタルを用いた6061アルミニウム合金と S45C 炭素鋼の摩擦圧接

越智 秀*・小川 恒一**・山本 義秋***
波部 光利****・菅 泰雄*****

Friction welding of 6061 aluminum alloy and S45C carbon steel using insert metal

Hiizu OCHI*, Koichi OGAWA**, Yoshiaki YAMAMOTO***
Mitsutoshi HABE**** and Yasuo SUGA*****

Friction welding of a 6061 aluminum alloy to a S45C carbon steel was carried out using the insert metal of a 1050 aluminum. Optimum thickness of the insert metal, friction pressure, forge pressure, friction time and rotational speed of welding conditions were determined as 4 mm, 90 MPa, 300 MPa, 1.2 s and 2250 rpm, respectively. When the insert metal turned into a thin (20~30 μm) and homogeneous layer at the weld interface, the maximum joint efficiency of tensile strength was obtained and was about 95%. Successful welds were obtained by taking each optimum welding condition even if the thickness of the insert metal was varied from 2 to 6 mm.

Keywords: friction welding, insert metal, 6061 aluminum alloy, S45C carbon steel, joint strength.

(Received September 29, 1993)

1. 緒 言

摩擦圧接法は異種材料の接合が容易であるという特徴を有している。しかしながら、材料によっては添加元素の影響で完全な接合が困難な組み合わせもある¹⁾。従来、こうした材料の組み合わせは、実用上継手として使用されていない。しかし昨今、こうした材料の摩擦圧接の要求が高まっており、何らかの方法で接合することが必要となってきた。実際にこうした接合では、インサートメタルを用いて間接的に接合する方法がとられつつある。そこで著者らは昨今、こうした間接接合法の研究に着手した^{2),3)}。本報告では、接合困難な材料である炭素鋼とアルミニウム合金をインサートメタルを用いて摩擦圧接し、インサートメタルの厚さや圧接条件がインサートメタルの界面における挙動や継手強度に及ぼす影響について検討した。また、インサートメタルを用いない直接接合法とも比較検討した。

2. 実験方法

本研究に用いた供試材は、S45C 炭素鋼および6061-T6 アルミニウム合金であり、インサートメタルには1050BD 工業用純アルミニウムを用いた。それらの化学組成と機械的性質を Table 1 および Table 2 に示す。これらの供試材から Fig. 1 に示す圧接母材を作製し、ブレーキ式の実験用摩擦圧接機を用いて圧接した。

インサートメタルを用いない S45C と A6061 の直接接合は、応答曲面法^{4),5)}を用いて引張強さ σ_B を最大にする圧接条件を求めた。なお、引張試験は圧接した継手か

Fig. 1 Shape and dimensions of base material.
(unit: mm)

* 大阪工業大学共同研究センター (大阪市)。Joint Research Center, Osaka Institute of Technology (Osaka-shi, Osaka).

** 大阪府立大学総合科学部 (堺市)。College of Integrated Arts and Sciences, University of Osaka Prefecture (Sakai-shi, Osaka).

*** 摂南大学工学部 (寝屋川市)。Faculty of Engineering, Setsunan University (Neyagawa-shi, Osaka).

**** 摂南大学大学院 (寝屋川市)。Graduate Student, Setsunan University (Neyagawa-shi, Osaka).

***** 慶應義塾大学理工学部 (横浜市)。Faculty of Science and Technology, Keio University (Yokohama-shi, Kanagawa).

Table 1 Chemical composition of base materials (mass%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	C	P	S	Ni
A1050	0.13	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	Bal	—	—	—	—
A6061	0.59	0.16	0.20	0.01	0.95	0.06	0.01	0.01	Bal	—	—	—	—
S45C	0.26	Bal	0.02	0.78	—	0.059	—	—	—	0.46	0.019	0.016	0.028

Table 2 Tensile properties of base materials

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
A1050	107.8	108.8	25.3
A6061	299	319.8	17.7
S45C	422	727	19

Fig. 2 Welding mode.

らバリのみを取り除いた後、万能試験機を用いて行った。インサートメタルを用いる間接接合は、Fig. 2に示すように、まずS45CとA1050を母材破断となる圧接条件（摩擦圧力 P_1 : 20 MPa, アプセット圧力 P_2 : 130 MPa, 摩擦時間 t_1 : 0.5 s, 回転数 N : 2500 rpm, ブレーキ時間 t_B : 0.8 s）で接合した。つぎに、圧接継手のA1050を所定の厚さ l_c に旋盤加工した後、A1050側をA6061と摩擦圧接した。

継手の金属組織は、S45C側をナイトル液（メチルアルコール100 ml, 硝酸5 ml）, A6061側を1/10希釈のケラー液（蒸留水20 ml, 塩酸20 ml, 硝酸20 ml, ふっ酸5 ml）で腐食した後、走査電子顕微鏡（SEM）を用いて観察した。

3. 結果と考察

3.1 直接接合

応答曲面法により求めたA6061とS45Cの最適摩擦圧

(a) Central part

(b) 1/2 radius

(c) Peripheral part

Fig. 3 SEM images of tensile fractured surface of welded joint by direct welding.

Fig. 4 Changes in tensile strength and total burn off quantity with thickness of insert metal.

接条件は、摩擦圧力69 MPa、アプセット圧力77 MPa、摩擦時間1.2 s、回転数2237 rpm、ブレーキ時間0.8 sであり、継手の引張強さは175.1 MPaであり、破断は接合面であった。この条件で圧接した継手の引張破面(S45C側)のSEM像をFig. 3に示す。軸中心部付近ではディンプルパターンがみられ、比較的良好に接合されていることがわかる。しかしながら、1/2半径部から外周部では摩擦の痕跡が観察され、界面での接合が不完全であると考えられる。これは、摩擦過程終了時にはとくに摩擦面の半径方向の圧接条件の差異が顕著に現れ、圧接面全域にわたって様な接合条件にならないためと考えられる。著者らは、形状、寸法を変化させて種々の圧接実験を行ったが、現在のところ、完全に接合させることは困難である。

一部の異種材の摩擦圧接ではごく薄い合金層を介して接合が行われる。しかしながら、鋼とアルミニウム合金の直接接合では、界面に脆弱な金属間化合物が形成され継手強度が低下するといわれている^{6)~8)}。今回のS45CとA6061の直接接合では、金属間化合物層が成長し界面に脆弱な化合物層が生成されたために継手強度が低下したと考えられる。

3.2 インサートメタルを用いた間接接合

インサートメタルの最適厚さについて検討した。

Fig. 4に、A1050とA6061を母材破断となる圧接条件で、最初のインサートメタルの厚さを変えて圧接した場合のインサートメタルの厚さと引張強さおよび寄りしとの関係を示す。図より、一定圧接条件においてはインサートメタルの最適厚さが存在することがわかる。図中

Fig. 5 Changes in tensile strength and total burn off quantity with forge pressure (a), friction time (b), rotational speed (c) and friction pressure (d). Thickness of insert metal: 4 mm.

Fig. 6 Changes in tensile strength and total burn off quantity with rotational speed. Thickness of insert metal: 2 mm.

Fig. 7 Changes in tensile strength and total burn off quantity with rotational speed. Thickness of insert metal: 6 mm.

比較的強度の高い条件である摩擦圧力70 MPa, アブセッ圧力80 MPa, 摩擦時間1.2 s, 回転数2250 rpmでインサート金属の厚さを8, 4, 2 mmに変えて圧接した場合, 継手界面に残存したインサート金属層の厚さは, それぞれ約150 μm , 70 μm , 30 μm であった。なお, インサート金属の厚さ2 mmの場合, 1/2半径部から外周部にかけて残存層がとぎれた部分もみられた。また, 引張試験による破断は, インサート金属の厚さにかかわらず, いずれも残存層内で起こった。これらのことから, インサート金属が厚い場合は, 界面の残存層は厚くなりインサート金属自体の強度に左右されて引張強さは低下し, インサート金属が薄い場合は, イン

Fig. 8 SEM images of welded joints with insert metal.

サート金属の効果がなくなり強度が低下したと考えられる。また, 寄りしろについては明確な傾向は認められなかった。そこで, インサート金属の厚さは Fig. 4に示した実験の範囲内で最も高い引張強さが得られた4 mmとして最適摩擦圧接条件を求めた。

インサート金属の厚さが4 mmの場合, 摩擦圧力, アブセッ圧力, 摩擦時間および回転数について検討した代表的な結果を Fig. 5に示す。摩擦圧力90 MPa, アブセッ圧力300 MPa, 摩擦時間1.2 s, 回転数2250 rpmで, 最大継手強度305.6 MPaの継手が得られ, 破断位置は残存層内であった。また, そのときの寄りしろは22.7 mmである。なお, 直径10 mmの圧接母材で300 MPa以上のアブセッ圧力を負荷した場合には, 継手強度は低下した。つぎに, インサート金属の厚さを2および6 mmと変化させた場合の最適摩擦圧接条件について検討した。その結果の一部を Fig. 6および Fig. 7に示す。インサート金属の厚さが2 mmの場合には, 摩擦圧力50 MPa, アブセッ圧力300 MPa, 摩擦時間1.7 s, 回転数2000 rpmの条件で最大引張強さ302.7 MPaの継手が得られた。インサート金属の厚さが6 mmの場合には, 摩擦圧力70 MPa, アブセッ圧力300 MPa, 摩擦時間1.7 s, 回転数2000 rpmの条件で最大引張強さ300.1 MPaの継手が得られた。なお, インサート金属の厚さにかかわらず, 引張試験による破断はいずれも残存層内で起こった。また, 最適摩擦圧接条

Fig. 9 X-ray diffraction patterns for tensile fractured surface of welded joint.

件における全寄りしろは、インサート金属の厚さが厚いほど大きくなっている。引張強さには、インサート金属の厚さが4 mmの場合とほとんど差異がみられないことから、最初のインサート金属の厚さが異なっても、それぞれに対応した最適摩擦圧接条件で圧接すれば、良好な継手を得られるものと考えられる。

最大継手強度が得られた条件（インサート金属の厚さ4 mm、摩擦圧力90 MPa、アブセット圧力300 MPa、摩擦時間1.2 s、回転数2250 rpm）で圧接した継手界面のSEM像をFig. 8に示す。また、比較のために強度の低い継手（摩擦圧力20 MPa、アブセット圧力40 MPa、摩擦時間0.5 s、回転数4000 rpm、引張強さ173.7 MPa）についても併せて示した。図から、強度の高い継手ではインサート金属が界面全域に20~30 μmの幅で均一に存在していることがわかる。強度の低い継手では、インサート金属がA6061と混在し、残存層が厚くなっている。このほかにも強度の低い継手では、インサート金属が途切れているものも観察された。すなわち、インサート金属であるA1050は、マグネシウムなどの阻害元素を遮断する役目をしていてと考えられる。したがって、良好な継手を得るためには、インサート金属を界面全域に薄く一様に存在させる必要があると考える。

最適条件で圧接した継手の引張破面のX線回折図をFig. 9に、S45C側破面のSEM像をFig. 10に示す。X線回折図からは、S45CおよびA6061側破面ともにアルミニウムによる回折線が観察され、A6061の添加元素に基づく回折線が認められないことから、インサートメタ

Fig. 10 SEM image of tensile fractured surface of welded joint.

ルであるA1050で破断していることが推測される。また、SEMによる破面観察では、アルミニウムがほぼS45C全面に付着し、図のようなディンプルパターンが観察され、Fig. 3に示した直接接合よりも接合状態は良好であると推測される。

4. 結 言

インサート金属として1050工業用純アルミニウムを用いてS45C炭素鋼と6061アルミニウム合金を摩擦圧接した結果、インサート金属の厚さが4 mm、摩擦圧力90 MPa、アブセット圧力300 MPa、摩擦時間1.2 s、回転数2250 rpmの条件で最大継手強度305.6 MPa（A6061に対する継手効率約95%）の継手を得られた。このときの全寄りしろは22.7 mmであった。また、最初のインサート金属の厚さが異なっても、適切な圧接条件で接合することにより良好な継手を得られることが明らかとなった。さらに、良好な継手を得るためには、インサート金属を界面全域に薄く一様に存在させる必要のあることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 今泉重威：軽金属溶接，22（1984），408.
- 2) 小川恒一，山口 博，越智 秀，菅 泰雄：溶接学会全国大会講演概要集，第52集，（1993），92.
- 3) 小川恒一，山本義秋，波部光利，岩本卓也，越智秀，菅 泰雄：軽金属溶接構造協会第24回研究発表会講演概要集，（1993），13.
- 4) 山口 博，小川恒一，坂口一彦：軽金属，41（1991），716.
- 5) 小川恒一，高 裕美，山口 博，山本義秋，坂口一彦，高島修直：軽金属溶接，29（1991），561.
- 6) 菊池 迪夫，武田裕正，諸住正太郎：軽金属，34（1984），165.
- 7) 蓮井 淳，小川正幸，田中英樹：溶接学会誌，46（1977），858.
- 8) 川勝一郎，北山誠二：日本金属学会誌，40（1976），96.