塑性流動を利用したアルミニウム合金/鋼板の新たな異種金属点接合*

－摩擦アンカー接合によるアルミニウム合金と鋼の接合－

大石 郁**, 坂村 勝**, 大田 耕平**, 藤井 英俊***

Novel Dissimilar Spot Welding of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stirring*

- Friction Anchor Welding of Aluminum Alloy and Steel -

by OHISHI Kaoru**, SAKAMURA Masaru**, OTA Kohei** and FUJII Hidetoshi***

Friction Stir Spot Welding (FSSW) has been applied to a dissimilar metal lap joint of an aluminum alloy and steel by stirring only the upper aluminum alloy sheet. Therefore, FSSW cannot be used to weld a lap joint composed of three or more sheets and a lap joint with an adhesive interlayer. In the present work, we propose a novel spot welding process for dissimilar metal lap joints using a new tool with the tip made of spherical ceramics. When this process is applied to the lap joint of the aluminum alloy and steel, the tool can be plunged into the lower steel sheet, then a steel projection is formed in the aluminum alloy sheet. The height of this steel projection increases with the plunge depth, and accordingly, the weld strength increases; the tensile shear strength and the cross tensile strength reached about 3.6 kN/point and 2.3 kN/point, respectively.

Key Words: Dissimilar metals, Friction stirring, FSSW, Projection, Steel, Aluminum alloy

1. 緒 言

近年、地球温暖化防止策として自動車業界では排出ガスに対する規制が厳しくなっており、燃費向上が急務となっている。燃費向上にはエンジンのハイブリッド化、アイドリングストップ機能の付加など様々な技術が導入されている^{1, 2)}。また、車体構造材料に関する対策としてハイテン化やアルミ化といった車体重量の軽量化が推進されている³⁾。この中で、アルミ化では、ルーフやボンネットといった外板パネルに対して、従来の鋼板の代わりに軽金属であるアルミニウム合金を用いることが検討されているが、アルミニウム合金は従来の鋼板と比較して強度が低いことや材料コストなどの観点から全てをアルミニウム合金に変えるのではなく、鋼による補強を加えたアルミ化、すなわちアルミニウム合金と鋼のハイブリッド構造が推進されている。これに伴い、アルミニウム合金と鋼の異種金属接合が必要となっている。現在、アルミニウム合金と鋼の異種金属接合に対してセルフピアッシングリベットや摩擦攪拌点接合などの様々な接合技術が検討され、実用化されている^{4, 5)}。

この中の摩擦攪拌点接合技術による異種金属接合は、重

ねて配置された2枚（アルミニウム合金／鋼板）の供試体に、接合ツールを回転させながら押し当てる接合手法である。本接合手法では、上板のアルミニウム合金のみを攪拌し接合している事例⁶⁻¹³⁾が多いが、この場合、3枚以上の複数枚の重ね継手に適用することができず、電食対策としてアルミニウム合金と鋼の間にシール剤などを挟んだ条件では接合が困難という課題が残る。また、一部に下板の鋼まで接合ツールを押し込んで接合する事例¹⁴⁻¹⁷⁾も認められるものの、摩擦攪拌点接合用として一般的に用いられている、プローブとショルダから形成される接合ツールが用いられており、多数点を接合しようとした場合にプローブが欠損・摩耗することが懸念される。しかし、これらの報告では、このことについて議論されていない。そこで、著者らは、先端が、応力集中が少なく、高耐久性が期待できる球面の接合ツールを考案した。本接合手法は、接合ツールを回転させながら下板の鋼側まで押し込むことにより下板の鋼からなる突起部を上板のアルミニウム合金内へ形成し、その突起部のアンカー効果により接合する方法である（摩擦アンカー接合）。本論文では基礎的調査として、2枚の重ね継手における接合断面の観察や接合強度評価、接合時の供試体の温度変化や接合ツールの供試体への押し込み挙動の測定結果について報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材及び接合方法

本実験では汎用フライス盤の基板上に Fig. 1 に示すエアシリンダを含めた治具を配置した。供試体には板厚 1.0 mm

*受付日 平成25年 8 月16日 受理日 平成25年12月6日 平成22年度秋季全国大会で発表

**正 員 広島県立総合技術研究所 Member, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute

***正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental setup.

Fig. 2 Appearance of the experimental setup.

のアルミニウム合金板（A5052）と冷間圧延鋼板（SPCC）を用い、供試体の接合される表面を500番の耐水研磨紙で研磨した後、アルコールで脱脂した。そして、上板にアルミニウム合金を、下板に鋼板を配置して、Fig. 2に示すような、中心に $\phi 22$ mmの貫通穴を有する厚さ3 mmの工具鋼SK5製押え治具によって固定した。また、Fig. 3に示すように、実験に用いた接合ツールは $\phi 12.7$ mmの窒化ケイ素製の球体を炭素鋼S45C製の円柱端部の凹部に焼き嵌めすることによって作製した。一般的な摩擦攪拌点接合ツールにおけるショルダと言われる部分はなく、本実験では窒化ケイ素球体の一部のみを供試体に押し込むことで異種金属接合を試みた。また、接合ツールの供試体への押し込み操作は、エアシリンダへ圧縮空気を出し入れすることによって供試体を取り付けた裏当て治具ごと上下させ、回転する接合ツールに供試体を所定の位置まで押し当てる機構を採った。また、本論文で記す接合時間とは、エアシリンダへの圧縮空気の供給時間を示しており、“供試体上昇する時間”と“回転する接合ツールが供試体に押し込まれている時間”を合わせた時間である。なお、押し込み量を変化させる方法としては、エアシリンダによる供試体の上下移動

(a) Side view

(b) Top view

Fig. 3 Appearance of the tool for the novel welding process.

距離が12 mmと一定であるため、土台となるフライス盤の基板を上下させて押し込み量を変化させた。そのため、厳密には供試体と接合ツールとの距離は設定する押し込み量によって変化し、接合ツールを供試体に押し込み攪拌する時間は変わってくるが、本実験の最大値と最小値の差が0.002秒とわずかな時間差であるため考慮しないこととした。

2.2 接合材の断面評価及び接合強度測定

本実験では、Table 1に示すように、接合ツールの押し込み量をパラメータとした。接合材の断面評価については、切断、研磨後、オリンパス製倒立型金属顕微鏡PMG3及び日立製作所製静電界放射型走査電子顕微鏡S-4100（堀場製作所製エネルギー分散型X線分析装置EMAX-ENERGY付属）を用いて行った。また、接合界面近傍の面分析については、日本電子製X線マイクロアナライザーJXA-8500FSを用いて行った。強度試験については、JIS-Z3136に従って引張せん断試験を、JIS-Z3137に従って十字引張試験を実施した。両引張試験は島津製作所製オートグラフAG-10TBを用い、引張速度0.08 mm/sで行った。な

Table 1 Welding conditions.

Tool rotating speed, rpm	970
Joining time, sec	2.5
Pressure of the compressed air, MPa	0.6
Plunge depth, mm	1.2 ~ 1.75

Fig. 4 Schematic illustration of temperature measurement positions.

お、本論文で用いる“接合ツールの押し込み量”は、レーザ変位計を用いて接合材に残る接合痕を測定して求めた実測値としている。

2.3 接合時の荷重及び温度変化測定

接合時の供試体の温度変化と供試体に作用する垂直荷重を把握するため、Fig. 4 に示すように所定の位置に 4 本の熱電対をセットし、裏当て治具とエアシリンダの間に荷重測定用ロードセルをセットした。今回使用したエアシリンダは、0.6 MPa の圧縮空気を入れた際に最大 12 kN の垂直荷重が発生する。また、接合中の押し込み挙動の測定は、裏当て治具の下面に接触式変位測定装置を対角位置に 2 器セットして、供試体を含めた治具の移動（変位）を読み取った。そして、実際に接合ツールが供試体に当たった時を 0 として、そこからの変位を押し込み量として算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 接合部の断面観察

Fig. 5 に押し込み量（Plunge depth; Pd）1.6 mm における接合部断面の光学顕微鏡（Optical Microscopy; OM）写真を示す。回転する球面の接合ツールを下板の鋼側まで押し込むことによって、接合ツールに沿って鋼が塑性流動し、上板のアルミニウム合金側へ鋼からなる突起部が形成されることが分かった。一般的には、摩擦攪拌点接合に用いられる、プローブとショルダから構成されるツールで上下の供試体を攪拌させても、Fig. 5 に示すような接合ツールに沿った顕著な突起部は形成されないため^{6, 18)}、角形状の突起部の形成は本接合手法の特徴と言える。また、突起部のアルミニウム合金と鋼の接合界面（以下、突起部接合界面とする）を EPMA で面分析した結果を Fig. 6 に示す。突起部接

Fig. 5 Cross-sectional OM image of the specimen (Pd: 1.6 mm). **Fig. 6** EPMA images of the specimen (Pd: 1.6 mm).**Table 2** Chemical composition of the joint interface.

	Fe	Al
① Aluminum alloy side	0.4	99.6
② Reaction layer	24.0	76.0
③ Steel projection side	98.9	1.1

合界面には顕著な酸化物層は認められず、接合時にアルミニウム合金及び鋼の表面酸化物層が破壊分散されたことが示唆される。一方、接合界面には金属間化合物層が認められ、この金属間化合物層を EDX 分析した結果を Table 2 に示す。Table 2 の結果から金属間化合物層は FeAl_3 または Fe_2Al_5 から構成される可能性が大であると考えられ、その厚さが 2~5 μm であるため、接合強度への影響が懸念される¹⁹⁾。また、Fig. 5 中の領域 A 及び領域 B、つまり、突起部底部からアルミニウム合金と鋼を重ねた水平箇所（以下、突起部ルート界面とする）において、アルミニウム合金と鋼の間にわずかな隙間が認められることから、突起部ルート界面は接合されていない、すなわち、突起部側面のみにアルミニウム合金と鋼が接合されていることが分かった。

次に、接合ツールの押し込み量を 1.2~1.75 mm と変化した際の接合部の断面及び突起部接合界面の SEM 観察結果

Fig. 7 Cross-sectional OM and SEM images of the specimens with various plunge depths.

を Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示す通り、押し込み量の増加とともに突起部高さが大きくなっていることが分かる。また、突起部接合界面では、いずれの条件においても金属間化合物層の厚さは2~5 μ mであり、顕著な差は認められなかった。これは、接合時間が短かったためであると考えられる。

一方、突起部ルート界面については押し込み量が1.2 mmの条件では突起部の底部から0.3 mm程接合していたが、押し込み量が増加するとともに接合領域が小さくなった。これについては以下のように考えた。上板のアルミニウム合金のみを攪拌して接合する摩擦攪拌点接合技術による異種金属接合同様に、回転する球面ツールが鋼に到達する前にアルミニウム合金のみの攪拌でアルミニウム合金と鋼が接合される領域が形成され^{6,7)}、その後、接合ツールが鋼に押し込まれ、突起部が形成されても、押し込み量が小さい場合は、接合した突起部ルート界面の一部の領域が残る。しかし、押し込み量が増加すると突起部ルート界面の接合領域は突起部側へと移動するため、突起部ルート界面の接合領域は小さくなっていったと考えられる。なお、本推察については、今後、実験による詳細な解析を行っていく予定である。

3.2 引張せん断強度と押し込み量の関係

Fig. 8 に引張せん断試験において初期亀裂が発生した直後の外観写真を示す。押し込み量は1.6 mmである。また、その模式図を Fig. 9 に、引張せん断試験後の接合部の断面写真を Fig. 10 に示す。Fig. 10 に示す通り、引張せん断試験時の初期の亀裂は突起部内部を貫通するのではなく、引張荷重が加わる突起部接合界面に沿って進行することが分かった。引張せん断荷重が突起部に負荷されると、引張側の突起部接合界面には Fig. 9 (c) に示すように引き剥がしの荷重が加わり、一方、反対の圧縮側では Fig. 9 (b) に示すように押しつけ合う荷重によって突起部が立つ状態となる。すなわち、突起部全周でせん断荷重を受け止め、各箇所によって負荷される荷重が異なる機構となる。そして、突起部接合界面には金属間化合物層が形成されているため、亀裂は突起部引張側 Fig. 9 (c) の接合界面に沿って進行したものと考えられる。

Fig. 8 Appearance of the specimen after the initial crack occurrence in the tensile shear strength test (Pd: 1.6 mm).

Fig. 9 Schematic illustrations of initial crack occurrence in the tensile shear strength test. (a) Tensile shear strength test image, (b) Compression side, (c) Tension side.

Fig. 10 Cross-sectional OM image of the specimen after the tensile shear strength test (Pd: 1.6 mm).

Fig. 11 Cross-sectional OM images of the specimens with various plunge depths after the tensile shear strength tests. (Upper images: Tension side. Lower images: Compression side.)

Fig. 12 Relationship between the plunge depth and the tensile shear strength.

次に、押し込み量を変化させた際の引張せん断試験後の接合部の断面写真を Fig. 11（上段が引張側、下段が圧縮側）に、接合ツールの押し込み量と引張せん断強度の関係を Fig. 12 に示す。なお、押し込み量を 1.8 mm 以上になると接合痕の底部（最も薄い箇所）が剥がれ、供試体に貫通穴が形成されるため、本実験では押し込み量を 1.75 mm までとした。Fig. 12 に示すように、引張せん断強度は押し込み量が増加するとともに高くなった。また、引張せん断試験による亀裂は、押し込み量 1.2 mm の条件では突起部ルート界面の一部が接合している影響により、突起部ルート界面の接合部の端からアルミニウム合金の内部を通り、そして突起部上部を貫通して進行した。一方、押し込み量が大きくなると突起部ルート界面の接合領域が小さくなるため、ほぼ突起部の底部から突起部接合界面に沿って亀裂が進行することが分かった。いずれの押し込み量においても、引張せん断試験における亀裂は突起部周辺を進行しており、突起部の高さが亀裂の進行に大きく影響する、すなわち、突起部の高さは接合強度に影響を与えることが分かった。

以上により、突起部接合界面には金属間化合物層が形成され接合強度への影響が懸念されたが、引張せん断強度約 3.6 kN/点を達成した。

3.3 十字引張強度と押し込み量の関係

押し込み量 1.6 mm の条件で接合した供試体を十字引張試験した後の接合部の断面写真（下板の鋼のみ）を Fig. 13 に示す。Fig. 5 と Fig. 13 の比較より、十字引張試験によって突起部が立つことが分かる。また、突起部接合界面だけをクローズアップすると、突起部が立つことによってアルミニウム合金と鋼との接合界面には、せん断荷重が負荷されていたと考えられる。

次に、それぞれの押し込み量における十字引張試験後の外観写真及び接合部の断面写真を Fig. 14 に、接合ツールの

Fig. 13 Cross-sectional OM image of the specimen after the cross tensile test (Pd: 1.6 mm).

Fig. 14 Appearances and cross-sectional OM images of the specimens after the cross tensile tests with various plunge depths.

Fig. 15 Relationship between the plunge depth and the cross tensile strength.

押し込み量と十字引張強度の関係を Fig. 15 に示す。Fig. 15 に示す通り、押し込み量 1.4 mm 付近まで十字引張強度はほぼ 0 kN に近い値であったが、1.4 mm 以上になると押し込み量の増加とともに十字引張強度は高くなる傾向を示した。これは押し込み量が小さい条件では形成する突起部が小さいこと、また、突起部ルート界面の接合領域はアルミニウム合金の攪拌のみで接合した箇所であり、引き剥がしの荷重に対して弱いと推定されることから⁷⁾、このような結果になったと考えられる。一方、押し込み量が大きくなってくると突起部高さは大きくなり、突起部側面の接合領域も大きくなっていく。すなわち、亀裂の進行する長さが増大する。その結果、押し込み量が大きくなるとともに十字引張強度は高くなったと考えられる。

以上により、突起部側面の金属間化合物層の影響が懸念されたが、突起部のアンカー効果により十字引張強度約

Fig. 16 Variations in temperature, vertical load and plunge depth during welding (Pd: 1.75 mm).

2.3 kN/点を達成できた。

宮川らは A5052 と SPCC をプローブ無しツールで重ね点接合し、引張せん断強度約 2.7 kN を達成しているものの、十字引張強度は約 0.6 kN にとどまっている⁷⁾。この結果と比較すると、アンカー効果を利用した本接合手法の接合継手の強度は明らかに高く、鋼突起部のアンカー効果が強度向上に寄与したものと考えられる。

3.4 接合時の垂直荷重と温度変化

接合ツールの供試体への押し込み量 1.75 mm の条件で接合実験した際の、押し込み量、接合時温度及び垂直荷重の挙動を Fig. 16 に示す。これらの挙動については以下のように考えた。エアシリンダへ圧縮空気を供給後、供試体を固定した治具が上昇し、約 0.2 秒後に供試体と接合ツールが接触する。そして 0.2～0.5 秒の短時間で垂直荷重は急激に 12 kN まで上昇し、接合ツールは供試体に約 1.3 mm 押し込まれる (Step 1)。これは、供試体の上板は 1.0 mm のアルミニウム合金であり柔らかいため接合ツールが進入しやすく、また、下板の鋼については供試体の温度が 400℃ 以下であり鋼が軟化しておらず、12 kN の垂直荷重ではわずかしこ進入できないためと考えられる。

続いて 0.5～1.5 秒では、垂直荷重は 12 kN を維持した状態で供試体の各点の温度は、回転する接合ツールと供試体との摩擦により徐々に上昇する (Step 2)。また、1.5 秒付近から測定箇所①が約 500℃ から急激に温度が上昇すると同時に押し込み量も上昇し、一方で垂直荷重は低下する (Step 3)。これは、回転する接合ツールと供試体との摩擦熱により供試体の温度が上昇して鋼板が軟化し、接合ツールがさらに供試体へ押し込まれることによって鋼の塑性流動が始まり、さらに多くの熱が発生し温度が急上昇するためと考えられる。一方、供試体が軟化することにより垂直荷重は低下する。

そして、約 1.8 秒で接合ツールが設定した押し込み量に到達し、その後、供試体の温度は微増する (Step 4)。これは、設定押し込み量に到達後も、接合ツールは供試体に接触した状態で回転を続けており、その際に発生する摩擦熱

が原因であると考えられる。また、垂直荷重はエアシリンダが伸びきった状態、すなわち、エアシリンダ内でリミッタが働いた状態となり、エアシリンダ内で垂直荷重が緩和されることによって 1.8 秒後も減少し続ける。そしてその後、接合時間 2.5 秒でエアシリンダの圧縮空気をリークすると同時に、垂直荷重及び温度は減少する。

以上より、アルミニウム合金と鋼の重ね継手の供試体に対して、回転する球面の接合ツールを下板の鋼板まで押し込むことにより点接合を実施すると、押し込み量、垂直荷重及び供試体の温度は 4 段階の工程を示すことが分かった。また、本接合手法では供試体の温度が最大約 900℃ を示しており、一般的な摩擦攪拌点接合による上板のアルミニウム合金のみを攪拌した接合手法の供試体温度が最大 400～500℃ である^{7, 10)}ことと比較すると、本接合手法は高い接合温度となっていることが分かった。

3.5 引張せん断、十字引張強度と界面化合物層の関係

田中らは A5052 と SS400 の突合せ継手を摩擦攪拌接合し、接合界面の金属間化合物層の厚さが 0.2 μm を超えると接合強度が急激に低下すると指摘している^{20, 21)}。また、及川らは A5052 と SS400 を熱間で圧延接合し、接合界面の金属間化合物層の厚さが 2 μm を超えると引き剥がし強度はほぼ 0 kN になるという結果を提示している²²⁾。一方、前述のとおり、アンカー効果を利用した本接合手法による接合継手では、接合界面に 2～5 μm の金属間化合物層が存在している。また、接合時において Fig. 16 中の Temp. ①、② (Fig. 4 中の測定箇所①、②) は約 900℃ まで温度上昇していることから、接合界面近傍でも温度がアルミニウム合金の融点近傍あるいは融点以上にまで上昇しており、そのため、接合界面に金属間化合物層が形成、成長したものと予想される。田中ら、及川らの結果と合わせて考察すると、ツール回転速度の低減や接合時間の短縮により、化合物層の厚さを低減できれば、接合強度をさらに高めることが可能であると思われる。

4. 結 言

本研究では、アルミニウム合金と鋼の重ね継手の供試体に対して、回転する球面の接合ツールを下板の鋼板まで押し込むことにより点接合 (摩擦アンカー接合) を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 球面の接合ツールを下板の鋼側まで押し込むことにより、下板の鋼が接合ツールに沿って上板のアルミニウム合金内部へ押し出され、角形状の突起部が形成されることが分かった。従って、本接合手法は、摩擦攪拌点接合とくしめ接合を併せた新しい接合手法と言える。
- 2) 突起部側面のアルミニウム合金と鋼の接合界面には金属間化合物層が 2～5 μm 形成されるが、突起部のアンカー効果により、引張せん断強度約 3.6 kN/点、十字引張強

度約 2.3 kN/点の高強度な異種金属の重ね継手の作製が可能であることが分かった。

- 3) 引張せん断試験及び十字引張試験ともに、試験時の亀裂は、主として突起部側面のアルミニウム合金と鋼の接合界面あるいは突起部近傍のアルミニウム合金内を進行することから、突起部の高さが各接合強度に大きく影響を与えることが分かった。
- 4) 回転する接合ツールが供試体に押し込まれる際、一定の押し込み速度では押し込まれず 4 段階の挙動を示すことが分かった。すなわち、Step 1: 押し込み量の上昇とともに垂直荷重が急激に上昇する過程、Step 2: 垂直荷重一定で押し込み量及び供試体の温度が徐々に上昇する過程、Step 3: 押し込み量の急上昇に伴い供試体の温度が急激に上昇し、一方で垂直荷重が低下する過程、Step 4: 設定押し込み量に到達し、供試体温度が微増する過程の 4 段階である。

謝 辞

本研究は、(独) 科学技術振興機構 (JST) の産学共創基礎基盤研究「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」による成果の一部であり、ここに謝意を表します。また、本研究を遂行するに当たり、X 線マイクロアナライザーによる分析にご協力頂いた岡山県工業技術センターの村上浩二氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Chiba: Technology trend of improvement fuel efficient, the Japan Institute of Light Metals Symposium, 78 (2006), 1-5. (in Japanese)
- 2) M. Ota: クリーンエネルギー車のための先進加工技術の展望, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 53-613 (2012), 93-97. (in Japanese)
- 3) H. Utsu: 自動車ボディのアルミ化と適用技術, ENGINEERING MATERIALS, 52-8 (2004), 26-30. (in Japanese)
- 4) E. Nakanishi: Weight Reduction of Automotive Vehicle Body and Joint Technologies, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 23-1 (2005), 151-156. (in Japanese)
- 5) M. Fujimoto: Development of New Joining Technology for Weight Reduction in Automotive Industries, Journal of Light Metal Welding and Construction, 47-11 (2009), 12-18. (in Japanese)
- 6) K. Tanaka, M. Kumagai and H. Yoshida: Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheets by friction stir spot welding, Journal of Japan Institute of Light Metals, 56-6 (2006), 317-322. (in Japanese)
- 7) K. Miyagawa, M. Tsubaki, T. Yasui and M. Fukumoto: Spot Welding between Aluminum Alloy and Low Carbon Steel by Friction Stirring, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 26-1 (2008), 42-47. (in Japanese)
- 8) K. Aota, M. Takahashi, K. Ikeuchi: Friction Stir Spot Welding of Aluminum to Steel by Rotating Tool without Probe, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 26-3 (2008), 227-234. (in Japanese)
- 9) Y. Shoji, K. Takase, T. Gendo, K. Tao, K. Morikawa, T. Noguchi: Development of Spot Friction Welding Technology of Aluminum Alloy and Steel, MAZDA Engineering Reports, 24 (2006), 90-94. (in Japanese)
- 10) CY. Lee, DH. Choi, YM. Yeon, SB. Jung: Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al-Mg alloy by formation of IMCs, Science and Technology of Welding & Joining, 14 (2009), 216-20.
- 11) KY. Feng, M. Watanabe, S. Kumai: Microstructure and Joint Strength of Friction Stir Spot Welded 6022 Aluminium Alloy Sheets and Plated Steel Sheets, Materials Transactions, 52 (2011), 1418-1425.
- 12) M. Watanabe, KY. Feng, Y. Nakamura, S. Kumai: Growth manner of intermetallic compound layer produced at welding interface of friction stir spot welded aluminum/steel lap joint, Materials Transactions, 52 (2011), 953-959.
- 13) YF. Sun, H. Fujii, N. Takaki, Y. Okitsu: Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique, Materials and Design, 47 (2013), 350-357.
- 14) S. Bozzi, A.L. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Cricqui and J.G. Kerbiguet: Intermetallic compounds in Al6016/IF-steel friction stir spot welds, Materials Science and Engineering A, 527 (2010), 4504-4509.
- 15) T. Liyanage, J. Kilbourne, AP. Gerlich, TH. North: Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds, Science and Technology of Welding & Joining, 14 (2009), 500-508.
- 16) AAM. Da Silva, E. Aldanondo, P. Alvarez, A. Echeverria: Friction stir spot welding of AA 1050 Al alloy and hot stamped boron steel (22MnB5), Science and Technology of Welding & Joining, 15 (2010), 682-687.
- 17) YC. Chen, A. Gholinia, PB. Prangnell: Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminum alloy to steel automotive sheet, Materials Chemistry and Physics, 134 (2012), 459-63.
- 18) A. Ikuta, Y. Yin and T. H. North: Influence of Tool Thread on the Mechanical Properties of Dissimilar Al-alloy Friction Stir Spot Welds, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 28-3 (2010), 346-354. (in Japanese)
- 19) S. Kuroda, K. Saida and K. Nishimoto: Microstructure and Properties of Directly Bonded Joint of A6061 Aluminum Alloy to SUS Stainless Steel, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 17-3 (1999), 484-489. (in Japanese)
- 20) T. Tanaka, T. Hirata, T. Morishige, N. Shinomiya, N. Shirakawa, Study on Dissimilar Joining of Aluminum and Steel Sheet by Friction Stir Welding, Journal of light metal welding and construction, 50-3 (2012), 93-99. (in Japanese)
- 21) T. Tanaka, T. Morishige, T. Hirata, Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys, Scripta Materialia, 61 (2009), 756-759.
- 22) H. Oikawa, T. Saitoh, T. Nagase, T. Kiriya, Formation and Growth of Intermetallic Compound at Interface of Steel/Aluminum Bonding Sheet, Tetsu to Hagane, 83-10 (1997), 641-646. (in Japanese)