摩擦攪拌を用いた Al / Fe 突合せ接合におけるツール形状が 界面形態および継手強度に与える影響

石田 将^{*1}, 下田 陽一朗^{*2}, 椿 正己^{*3}, 安井 利明^{*3}, 福本 昌宏^{*3}, 藤田 智行^{*4}

Effect of tool shapes on weld interface and strength in Al / Fe butt joint made by friction stir welding

Sho ISHIDA^{*1}, Yoiciro SHIMODA^{*2}, Masami TSUBAKI^{*3}, Toshiaki YASUI^{*3},
Masahiro FUKUMOTO^{*3} and Tomoyuki FUJITA^{*4}

^{*1} Toyohashi University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Hibarigaoka 1-1, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

Key Words : Friction stir welding, Dissimilar metal, Tool shapes, Joint strength, Plastic flow, Intermetallic compound

1. 緒 言

地球環境問題から輸送機器の軽量化が強く求められており, 軽量材料と高強度材料を組合せたハイブリッド構造体が注目されている. しかし, 従来の熔融溶接による異材接合では界面に厚い金属間化合物を生成し, 接合が困難とされている. そこで固相接合法である摩擦攪拌接合法(FSW: Friction Stir Welding)に着目した. 図1にFSWによる異材接合の概略図を示す. FSWにおいて接合方向と接合ツール回転方向が一致する面を前進側(Advancing side: AS), 逆の面を後退側(Retreating side: RS)と呼ぶ. 本研究室では Al/Fe 異材接合においてツールを接合界面ではなく Al 側にオフセットさせて挿入し, Fe 側に押し当てて FSW を行うことにより, 界面の金属間化合物層の生成を抑制して接合が可能であることを明らかにした⁽¹⁾. 本方法では, ツールの回転と移動により基材とプローブとの間で発生する摩擦熱により軟化した Al が塑性流動を起こし, 同時にプローブが Fe の酸化膜を削り取ることで露出した新生面に軟化した Al が押付けられて接合される.

FSW においてツール形状は塑性流動状態を変化させるため, 非常に重要である. しかし, FSW による異材接合では, ツールが接合界面に直接影響するため, ツール形状が接合性に大きな影響を与えるものと考えられる. そこで異なるプローブ形状を持ったツールを用いて接合実験を行い, 接合性評価を行うと共に, 塑性流動状態や接合界面に与える影響について調査を行った.

Fig. 1 Schematic figure of FSW.

^{*1} 学生員, 豊橋技術科学大学 工学研究科機械工学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

^{*2} 非会員, 豊橋技術科学大学

^{*3} 正員, 豊橋技術科学大学

^{*4} 非会員, 武蔵精密工業株式会社

E-mail: sishida@isf.me.tut.ac.jp

2. 供試材および実験方法

供試材として寸法 $200 \times 20 \times 6 \text{ mm}$ の Al 合金 (A6061) および炭素鋼 (S45C) を使用した。接合実験は汎用マシニングセンタにプローブ (直径: $\phi 5$, M5, 長さ: 4 mm) とショルダー (直径: $\phi 20$) から成る回転ツールを使用した。表 1 に示す接合条件で接合実験を行い、ストレートプローブを使用した接合では内部欠陥の発生しない適正条件の範囲が狭く、その改善としてネジプローブを使用した接合を試みた結果、適正条件の範囲は広がったが、平滑な接合体表面が得られなかった。そのためストレートプローブの長所である平滑な表面とネジプローブの長所である広い適正条件を併せた部分ネジプローブ (ストレート先端 3 mm にネジ施工) を採用し、その中で全てのツール形状で欠陥の発生しないツール回転数 2000 rpm , 接合速度 500 mm/min を基本条件として評価を行った。接合後の評価として継手強度の評価のため接合体を $40 \times 7 \times 2 \text{ mm}$ (R6-4) にフライス加工した試験片を用いて引張強度試験を行った。接合部の詳細な調査として SEM を使用して界面の観察を行い、X 線 CT 装置を使用して攪拌部におけるプローブにより削り取られた Fe 断片を可視化することで塑性流動を観察した⁽²⁾。また、ツール形状が接合界面状態に与える影響を調べるため、熱電対を内蔵したツールと無線温度計を用いてツール温度およびマシントルクの測定を行った。

Table 1 Welding conditions.

Tool rotation [rpm]	1000 – 4000
Welding speed [mm/min]	100 - 800
Offset [mm]	+0.05

3. 実験結果および考察

図 2 に本研究における引張試験結果および接合時の平均トルク、平均温度、接合部の観察結果を示す。引張試験の結果、標準ネジの強度が最も高く、ネジ部が少なくなるに連れて強度が低下している。しかし、母材破断には至らず、最も高い強度で A6061 の母材強度 (310 MPa) の約 67%と低い。

接合体表面から 1 mm の位置において SEM による接合界面の観察を行った。SEM 像よりストレートでは厚さ 400 nm 程度の金属間化合物と考えられる反応層の生成が確認できたが、部分ネジのネジ部および非ネジ部、標準ネジではその存在は確認できなかった。この結果からストレートとネジ付きで継手強さに差が出たのは界面における反応層の厚さの差が原因であると考えられる。また、ツール形状による流動状態への影響を観察するため、X 線 CT 装置による流動の可視化を行った。可視化像よりストレートでは Fe 破片がプローブ通過部分の中央付近にかたまっているのに対し、部分ネジおよび標準ネジでは Fe 破片が全体に分散しており、ストレートよりも攪拌力大きいことが考えられる。また、標準ネジでは Fe 破片が底部に堆積しており、ネジにより下方へ流動が発生していると考えられる。

接合時の入熱状態は反応層生成に大きく影響する。そこで接合時の温度を測定するため、熱電対を内蔵したツールを用いて接合を行った。その結果、接合時におけるプローブおよびショルダー近傍の温度は共にストレートが最も高く、次いで部分ネジ、標準ネジの順となった。特にショルダー温度においてストレートと標準ネジでは約 200 K の差が見られた。このことからストレートは摩擦入熱が大きいため、界面に比較的厚い反応層が生成されたと考えられる。

接合時の負荷もまた接合状態に影響を与える因子である。そこでマシニングセンタの主軸トルクの測定を行った結果、全てのツールでトルクは 1.3 Nm 前後の値を示していたため、ツール形状の違いによる負荷の影響なく接合出来ていたことがわかる。

以上の結果から接合に伴うエネルギーについて考える。接合におけるエネルギーの入力は接合装置からのみであり、出力されるエネルギーはツールから基材に与えられる熱エネルギーおよび攪拌に伴う運動エネルギーである。接合装置から与えられるエネルギーをマシントルク、熱エネルギーをツールからの摩擦入熱、運動エネルギーをツールの攪拌力とすると、トルクはツール形状によらず一定であったため、ツールからの入熱が大きいほどツールの攪拌力は小さくなる。よって、ツール温度の高いストレートプローブは攪拌力が小さく、部分ネジ、標準ネジの順に攪拌力が大きくなると考えられる。これは図 3 の可視化像から確認できる。

このことからストレートプローブでは攪拌力が小さいため、内部の Al が接合体表面へ流出し、それをショルダーが押さえつけることで摩擦熱が発生、プローブと基材間で発生する摩擦熱に接合体表面から熱が加わるため、厚い反応層を生成し、継手強度が低くなったと考えられる。ネジ付きプローブでは攪拌力が大きく、下方への塑性流動が発生することで内部の Al が接合体表面へ流出するのを防ぎ、標準ネジは部分ネジに比べ、攪拌力が大きく、界面への入熱が小さくなるため、反応層の生成を抑制でき、継手強度が高くなったと考えられる。

		Probe type		
		Straight	Partial screw	Screw
SEM image
CT-X image
Tensile strength [MPa]		177	190	207
Temp. [K]	Probe	783	770	757
	Shoulder	681	554	480
Torque [N·m]		1.36	1.31	1.29

Fig. 2 Result of evaluation experiment.

7. 結 言

ツール形状を変えて継手強度および接合部への影響の調査を行った結果、標準ネジプローブを使用した接合体で最も高い継手強度が得られた。これはストレートプローブによる接合は界面への摩擦入熱が大きく、それにより接合界面に反応層が生成されるのに対し、ネジ付きプローブは下方への流動を発生させるため Al が接合体表面に流出するのを抑え、ショルダーによる摩擦入熱が低下するためであると考えられる。

文 献

- (1) 下田陽一郎ら, “摩擦攪拌作用を用いた異種金属材料の接合評価”, 溶接学会全国大会講演概要, Vol.2003f (2003), pp.131-132.
- (2) 安井利明ら, “摩擦攪拌作用を用いた Fe/Al 接合における塑性流動”, 溶接学会全国大会講演概要, Vol.2006s (2006), pp.87-88.