

摩擦攪拌接合 (FSW) 用ツール合金

平野 聡*

1. はじめに

摩擦攪拌接合⁽¹⁾ (以下, FSW : Friction Stir Welding) は接合材料を固相状態で線接合できる特殊な接合技術である。アルミニウム合金や銅合金に対して, 実用化^{(2)~(6)}が進んでいる。アルミニウム合金や銅合金は600°C程度で容易に塑性変形するため, FSW ツール(以下, ツール)に工具鋼が使用できたことも実用化が進んだ一因とも考えられる。

一方, 鉄鋼材料のFSWでは接合部の温度は900°C以上⁽⁷⁾になるとされており, この場合, 工具鋼製のツールは使用できない。これまでに, 鉄鋼やチタン合金など融点の高い材料(以下, 高融点材料)に対し, 高温耐久性の高い材料でツールを製作し, FSWする試みが報告されている。ここでは, FSW ツールが使用される過酷な環境を実験データに基づいて紹介するとともに, これまでに試験されているFSW ツール材料の情報をまとめてみた。

2. ツールが曝される環境

図1にFSWの概念図を示す。FSWは回転するツールと接合材との摩擦熱および加工熱で接合部を局所的に加熱し, これによって材料が容易に塑性変形できる状態にしている。塑性変形能が高まった接合部の材料はツールの回転で攪拌され, 接合界面が破碎されると同時に新生面が現れて金属結合すると考えられている。

図2にCo合金製のツール⁽⁸⁾で炭素鋼(SS400)をFSWしたときの写真を示す。接合欠陥等が発生しない典型的な接合条件でFSWした場合の例であるが, 接合材料と接しているツール先端部が赤熱状態になっていることが確認できる。

図3に同じくCo合金製のツールでTi-6Al-4V合金をFSWした際の攪拌部の温度を浸漬型光ファイバ温度計で測定した結果⁽⁹⁾を示す。接合深さ約6mmの接合で, 深さ6mm温度測定位置は突合せ面の測定位置は図中の230~1170秒が定常接合に当たるが, このときの攪拌部温度は約900~

1000°Cであった。この接合でツールは1000°C近くの温度に約940秒(約16分)曝されていたことになる。また, この接合において同時に測定したツール押し付け荷重(垂直方向荷重)は26kN程度であった。このように, 高融点系材料のFSWでツールは高温環境で大きな力学的負荷を受けている。これに加え, 化学的な摩耗も顕在化すると考えられる。

図4に図3の接合前後のツール形状測定結果を示す。プ

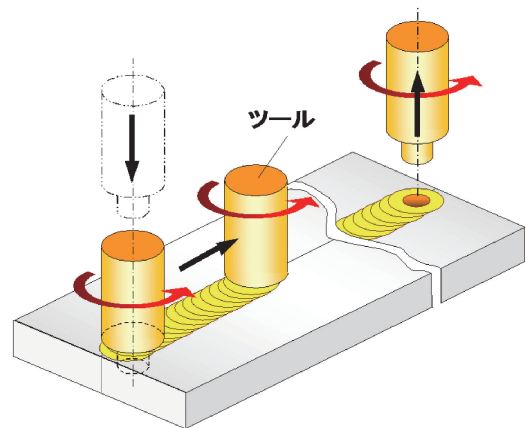


図1 FSW 概念図.

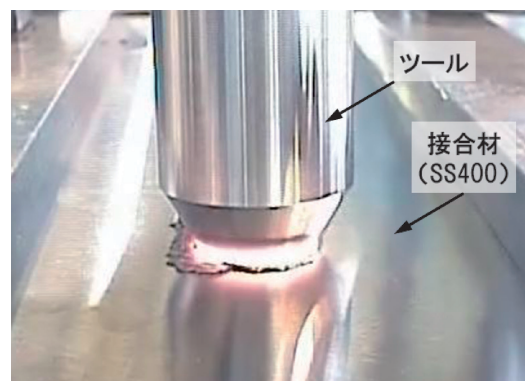


図2 炭素鋼 FSW 中の写真.

* 株式会社製作所 研究開発グループ材料イノベーションセンタ材料応用研究部; 主任研究員(〒319-1292 日立市大みか町 7-1-1) Alloys for Friction Stir Welding Tool; Satoshi Hirano(Hitachi, Ltd. Research & Development Group, Center for Technology Innovation-Materials, Material Application Research Department, Hitachi)
Keywords: friction stir welding (FSW), tool material, high temperature, wear
2016年8月18日受理[doi:10.2320/materia.55.461]

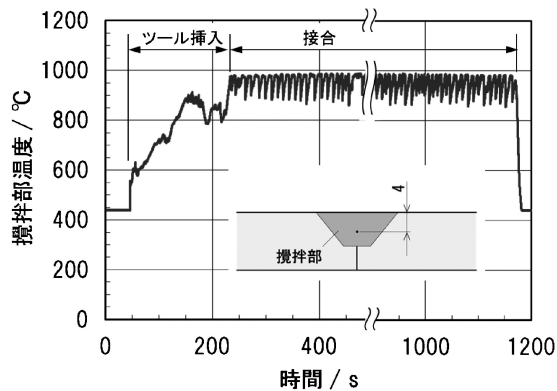


図3 Ti-6Al-4V合金FSWにおける攪拌部温度.

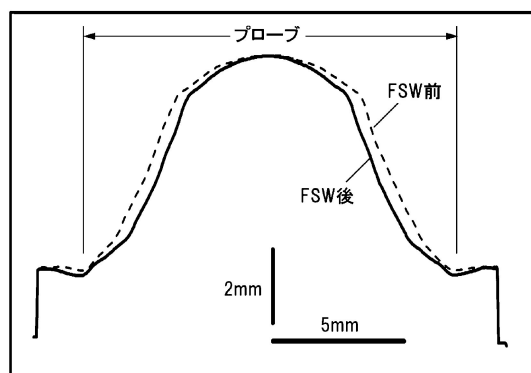


図4 FSW 前後のツール形状測定結果.

ローブの長さはほとんど変化していないが、径方向に約0.5 mm ほぼ一様に摩耗していた。この摩耗量が大きいのか否かは一概には判断できないが、金属製ツールがこのような過酷環境下に長時間さらされた後であることを考えると、優れた素材であると思われる。

3. 高融点材料のFSWとツール材料開発

これまでに、炭素鋼、ステンレス鋼、チタン合金などの高融点材料に対して、種々の材料でFSWツールを製作して、接合した結果が報告されている。表1に高融点材料FSWに使用されたツール材料を示す。ツール材料はセラミックス系(または、焼結体系)と金属基系に大別できる。

セラミックス系ではpcBN(Polycrystalline Cubic Boron Nitride)が報告例も多く、代表的な材料といえる。pcBNは硬質のcBN粒をAlNやAlB₂をバインダーとして焼結したもの(以下、単にpcBN)とWとReからなるマトリックスに体積率で60~80%のcBNを分散した複合材(以下、pcBN/W-Re)が開発されている。pcBN製ツールを使用し、炭素鋼、ステンレス鋼⁽¹²⁾、Ni基超合金⁽¹⁹⁾などの材料をFSWした報告がある。Ni基超合金(alloy 600)は高温強度が高い材料であるが、このような材料をFSWしたことより、pcBNの高温強度の高さが推察される。

表1 高融点材料FSWに使用されたツール.

No.	材質	機械的特性	接合材, 厚み(*)
1	Sialon系 ⁽¹⁰⁾		•炭素鋼(SPCC), 0.5 t
2	WC系(超硬) ⁽¹¹⁾		•高張力鋼板(590~1180 MPa), 1.6 t
3	pcBN ⁽¹²⁾		•炭素鋼(SS330相当), 6 t •SUS304L, 6 t, 接合長: 8~30 m
4	W-Re合金 ⁽¹³⁾	引張強度 275 MPa(1926°C)	•高張力鋼板(80 psi), 19 t •Ti-6Al-4V, 25 t
5	Ir基合金 ⁽¹⁴⁾	0.2%耐力 250 MPa(1200°C)	•SUS304, 1.5 t
6	Ni基超・超合金 ⁽¹⁵⁾⁽²⁰⁾	0.2%耐力 800~1000 MPa (1000°C)	•SUS430, 1.5 t
7	Co基合金 ⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾	0.2%耐力 190~440 MPa (1000°C)	•高炭素鋼ほか, 2.0 t •cp-Ti, Ti-6Al-4V, 6.0 t
8	Ir添加Ni基合金 ⁽¹⁷⁾	0.2%耐力 400 MPa(1000°C)	•SCM440, 6.0 t •SUS304, 6.0 t
9	W基合金 ⁽¹⁸⁾		•SUS304, 1.7 t(プローブ長)

*: 接合材の厚みは接合深さに同じ.

金属基ツールとしてW-25 mass% Re合金⁽¹³⁾、W-20 mass% Re-10 mass% HfC合金⁽¹³⁾、Ir基合金⁽¹⁴⁾、Ni基超・超合金⁽¹⁵⁾⁽²⁰⁾、Ir添加Ni基合金⁽¹⁷⁾、Co基合金⁽⁸⁾などが報告されている。これらの材料はFSWツールへの適用を意図して開発されたものが多い。金属基ツールは鑄造、機械加工などの加工技術が適用できるため、ツール寸法や形状の制約が低減すると同時に、コスト低減にも有効と考えられる。これらのツールにより、炭素鋼、ステンレス鋼、チタン合金などがFSW可能であり、板厚も最大25 mm(チタン合金)可能となっている。これらの合金は固溶強化型とγ'強化型に大別される。

W-Re合金、Ir基合金は固溶強化型に類する。W-Re合金はRe添加によりWが高温環境下で粒成長して脆化するのを抑制している。高温での引張強度はW-25 mass% Re合金が143 MPa(1926°C)、この材料に2 mass%のHfCを添加した合金が275 MPa(1926°C)と報告されている。Ir基合金は主にRe添加で固溶強化した合金で、10 at%のRe添加で0.2%耐力が約250 MPa(1200°C)と報告されている。

Ni基超・超合金、Ir添加Ni基合金、Co基合金などはγ'強化型に類する。Ni基超・超合金はCo₃(Al, W)のγ'相を析出させ、1000°Cでの0.2%耐力が800~1000 MPaなどと報告されている。Ir添加Ni基合金はIr₃(Al, W)のγ'相を析出させ、1000°Cでの0.2%耐力が400 MPaと報告されている。Co基合金はCo₃(Al, W)のγ'相を析出させ、1000°Cでの0.2%耐力が190~440 MPa程度と報告されている。

Co合金に関しては、合金組成を変更して、0.2%耐力、ツール温度(シヨルダの表面近傍)、γ'分解温度、硬質相の大

