

## A7075 合金摩擦攪拌接合継手の大気中および塩水中における疲労挙動

## Fatigue Behaviour of Friction Stir Welded A7075 Alloy in Air and 3%NaCl Solution

植松美彦・岐阜大学

戸梶恵郎・岐阜大学

Yoshihiko Uematsu, Gifu University

Keiro Tokaji, Gifu University

柴田英明・岐阜県機材研

戸崎康成・岐阜県機材研

Hideaki Shibata,

Yasunari Tozaki,

Gifu Prefectural Research Institute for Machinery and Material

Gifu Prefectural Research Institute for Machinery and Material

Key Words: *Fatigue, Friction stir welding, Corrosive environment*

A7075-T6 合金の摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) 継手を用いて、大気中および塩水中において軸荷重疲労試験を実施した。継手部では動的再結晶による結晶粒微細化と FSW 時の入熱により析出物が再固溶するため軟化が生じた。大気中では、最軟化部で疲労き裂が発生し破断したが、結晶粒微細化と試験中の顕著な動的時効硬化のために継手の疲労強度は母材と同程度であった。塩水中では、最軟化部に優先的に腐食ピットが発生するために継手の疲労強度は母材より低下し、FSW によって環境感受性が高くなることが判明した。

## 1. 緒言

近年、固相接合である摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) が、アルミニウム (Al) 合金のような低融点金属を接合する手法として確立しつつある。著者らは、A1050, A5083 および A6061 合金<sup>(1)</sup> FSW 継手の疲労試験を実施し、合金系によって継手の疲労挙動が異なることを報告した。そこで本研究では、A7075 合金 FSW 継手の大気中における疲労試験を実施し、その疲労挙動について検討した。また、A7075 合金は環境に敏感であることから、塩水中の疲労試験も実施し、FSW が腐食疲労挙動に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験方法

**2-1 供試材** 供試材は 7075-T6 材であり、その化学成分 (wt.%) は、Si: 0.09, Fe: 0.24, Cu: 1.53, Mn: 0.55, Mg: 2.58, Cr: 0.19, Zn: 5.67, Ti: 0.03, Al: bal.である。また、機械的性質は 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$ : 474MPa, 引張強さ  $\sigma_B$ : 547MPa, 伸び  $\delta$ : 12%, 絞り  $\phi$ : 20%, 縦弾性係数  $E$ : 71GPa である。

**2-2 接合条件および試験片** FSW にはショルダー径 15mm, プローブ径 6mm の SKD61 製ツールを用いた。ツールの回転速度, 送り速度および傾き角をそれぞれ 1000rpm, 350mm/min および  $3^\circ$  として接合を行った。接合後、フライス加工によって接合板の両表面から 0.5mm を除去し、接合中心が試験片平行部の中央と一致するように、幅 4mm, 長さ 22mm の平行部を有する平板試験片を採取した。

**2-3 実験方法** 疲労試験には容量 49kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用いた。荷重波形は繰返し速度  $f=10\text{Hz}$ , 応力比  $R=-1$  の正弦波である。また塩水中の試験では、試験片の平行部に 3%NaCl 水溶液を 30~80ml/min で連続的に滴下した。

## 3. 実験結果

**3-1 接合部組織** 図 1 に横断面における母材, 熱機械影響部 (Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ) および攪拌部 (Stir Zone: SZ) の微視組織を示す。なお TMAZ の組織では、(b)が FSW ツールの回転方向と進行方向が逆となる Retreating Side (R-side), (c)はそれらが一致する Advancing Side (A-side) である。母材組織はアスペクト比約 11:2 の扁平な結晶粒から成り、長手方向の平均結晶粒径は約  $43\mu\text{m}$  である。一方、SZ の組織は平均結晶粒径が約  $3.2\mu\text{m}$  の等軸結晶粒であり、FSW

時の動的再結晶によって微細化するとともに、異方性も消失している。同じ析出硬化型の A6061 合金では接合条件によらず SZ の平均結晶粒径は約  $9\mu\text{m}$  であったので、A7075 合金のほうが顕著な微細化を示す。TMAZ では、図中矢印で示すような母地の塑性流動が確認され、SZ に近づくに従って徐々に微細化した結晶粒が存在するようになる。また、ツールの回転方向と進行方向が一致する A-side において、より強い塑性流動が確認され、SZ と TMAZ の境界が明瞭になっている。

**3-2 機械的性質** 図 2 に接合部の硬さ分布を示す。図中の点線は母材の硬さである。接合部では軟化が生じているが、これは析出硬化型 Al 合金の FSW 継手に一般的に見られる傾向であり、FSW 時の入熱による析出物の再固溶によるとされている。また、TMAZ では硬さは極小となり、HAZ (Heat Affected Zone) において徐々に上昇して母材と一致する。FSW 継手の機械的性質は、0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$ : 346MPa, 引張強さ  $\sigma_B$ : 490MPa であり、静的強度は母材よりも低い。破断は最軟化部の TMAZ に沿って生じており、入熱による軟化のために強度が低下したと考えられる。

**3-3 大気中における疲労挙動** 母材と FSW 継手の S-N 曲線

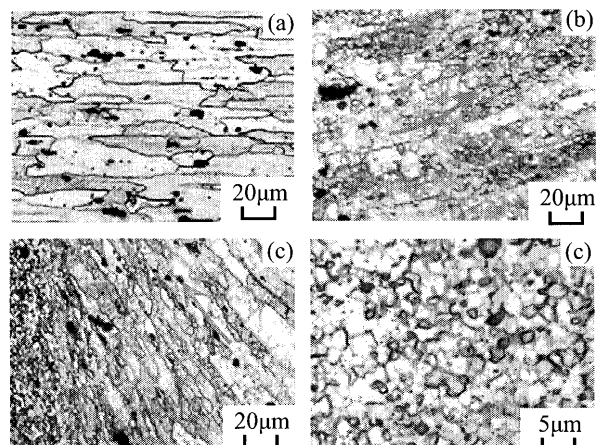


Fig.1 Microstructures: (a) Parent metal, (b) TMAZ (R-side), (c) TMAZ (A-side), (d) SZ.

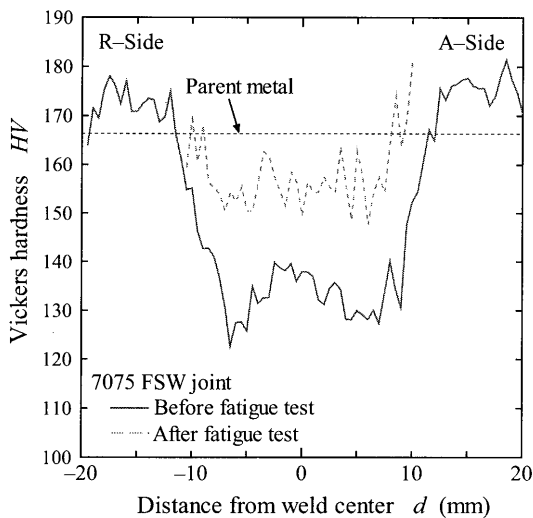


Fig.2 Vickers hardness profiles.

を図3に示す。継手の静的強度は母材より低下したが、疲労強度は同程度であり、疲労限度はいずれも100MPaである。き裂発生起点近傍の破面観察を行ったところ、接合欠陥は認められず、き裂はすべり変形により発生していた。また、FSW継手のき裂発生および破断位置はA-sideのTMAZであった。

**3-4 塩水中における疲労挙動** 図3には塩水中における試験結果も示しているが、塩水中の疲労強度は大気中に比べて著しく低下することがわかる。また、疲労限度も消失している。破面観察から、疲労き裂発生起点には腐食ピットが認められ、腐食ピットの形成により疲労強度が低下したと考えられる。さらに、疲労強度は大気中では継手と母材で同程度であったが、塩水中ではFSW継手のほうが低い。すなわち、FSWによって環境感受性が高くなったことを示している。なお、塩水中においても継手の破断位置はA-sideのTMAZであった。

#### 4. 考察

**4-1 継手の疲労挙動に及ぼす組織因子** FSW継手の疲労破壊はA-sideのTMAZで生じるが、これは通常A-sideのほうが接合時の温度が若干高く、顕著な析出物の再固溶が生じるためと考えられる。またFSW継手の静的強度は、継手部の軟化により母材より低下したが、図3に示したように、疲労強度は継手と母材で同程度であった。そこで $\sigma=100\text{MPa}$ 、 $N=1\times 10^7$ で未破断であった試験片の接合部硬さを測定した。その結果を破線で図2中に示す。接合部の硬さは試験前よりも上昇し、母材の8割程度まで回復している。これは荷重の繰返しによって動的時効が生じたためである。A6061合金でも動的時効が確認されているが、回復の程度はA7075合金のほうが顕著である。これはA7075合金のほうが自然時効しやすい特性に起因すると考えられる。このように、FSWによって継手部は軟化するが、動的再結晶によって結晶粒が母材の1/10以下に微細化するとともに、動的時効によって荷重繰返しとともに硬さは上昇する。以上のような強度上昇要因により、FSW継手の疲労強度が母材と同程度になったと考えられる。なお、A6061合金FSW継手でも結晶粒微細化や動的時効は生じたが、継手の疲労強度は母材よりも低かった<sup>(1)</sup>。これはA7075合金のほうが、FSWによる結晶粒微細化と動的時効による硬さの回復がA6061合金より顕著に生じるためと考えられる。

**4-2 継手の疲労挙動に及ぼす腐食環境の影響** FSW継手と母材の疲労強度は大気中では同程度であったが、図3に示したように塩水中ではFSW継手の疲労強度が低下した。破面観察からき裂発生起点にはいずれの場合も腐食ピットが認

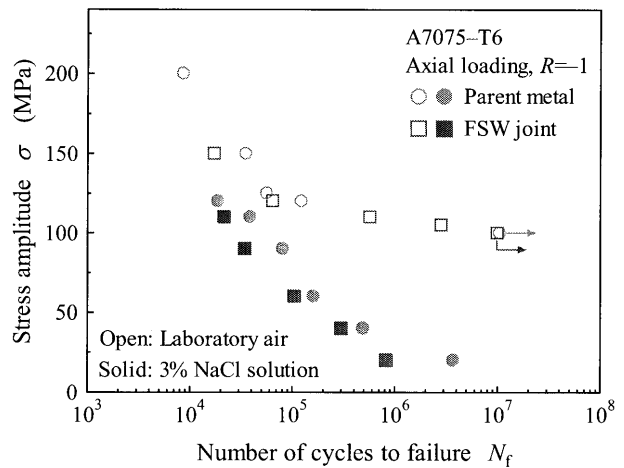


Fig.3 S-N diagram.

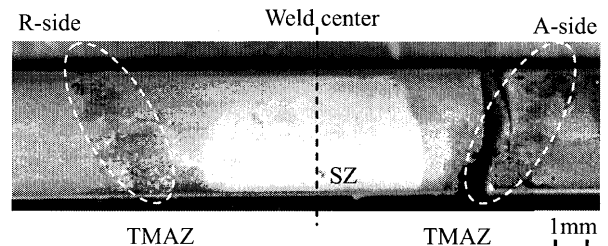


Fig.4 Surface appearance of fatigue-fractured specimen in 3%NaCl solution ( $\sigma=20\text{MPa}$ ,  $N_f=8.3\times 10^5$ ).

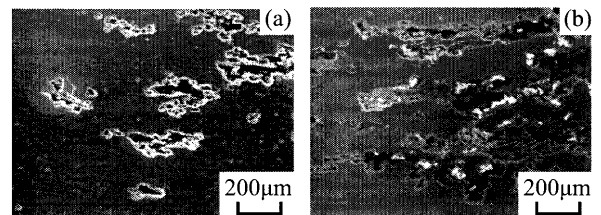


Fig.5 Corrosion pits observed in TMAZ: (a) A-side, (b) R-side.

められた。図4は $\sigma=20\text{MPa}$ で $N_f=8.3\times 10^5$ で破断した試験片側面の巨視的様相である。また、図5は図4のTMAZを拡大したものである。腐食ピットはTMAZの部分に集中的に生じており、またA-sideのTMAZで疲労破壊した。すなわち、FSWによって特にTMAZが環境に対して敏感になるため、母材よりも疲労強度が低下したことを示唆している。SZとTMAZでは入熱により析出物が再固溶するが、SZでは動的再結晶によって転位密度が低下するのに対して、TMAZでは再結晶が生じないため塑性変形によって高転位密度化していると考えられる。すなわち、このような微視組織の変化に起因して、TMAZが高い環境感受性を示したと考えられる。また、A-sideとR-sideでは、A-sideのほうが接合時の温度が高く、かつより強い塑性変形を受けるため、環境感受性が高くなり、A-sideで破断が生じたと考えられる。

#### 5. 結言

7075合金FSW継手を用いて大気中および塩水中で疲労試験を実施し、その疲労挙動について検討した。その結果、大気中では継手と母材の疲労強度は同程度であるが、塩水中では継手の疲労強度が低下し、FSWによって環境感受性が高くなることを明らかにした。

#### 参考文献

- (1) 植松, 戸根, 戸崎, 柴田, 材料, 56-6, 537-543 (2007).