

# Al-Mg-Si 系合金摩擦攪拌スポット接合継手の 疲労挙動に及ぼす後熱処理の影響

岐阜県機械材料研 ○戸崎康成 岐阜大学 植松美彦 松下電産 村田瞬亮  
岐阜大学 戸梶恵郎 太平洋工業 栗田達夫

## Effect of Post Heat Treatment on Fatigue Behaviour of Friction Stir Spot Welded Al-Mg-Si Alloy

Yasunari TOZAKI, Yoshihiko UEMATSU, Shunsuke MURATA, Keiro TOKAJI and Tatsuo KURITA

### 1 緒 言

近年、自動車などの輸送機器では、軽量なアルミニウム (Al) 合金薄板の利用が増加しており、その接合手法として摩擦攪拌スポット接合 (FSSW: Friction Stir Spot Welding) が注目されている。しかし、FSSW は新しい接合技術であり、その疲労破壊機構を明らかにする必要がある。前報<sup>1)</sup>では継手の疲労挙動について報告したが、実用上問題となる接合後の熱処理が疲労挙動に及ぼす影響は未だ明らかではない。

そこで本研究では、後熱処理を施した FSSW 重ね継手を用いて引張せん断疲労試験を行い、疲労挙動に与える熱処理の影響について検討した。

### 2 供試材および実験方法

**2.1 供試材および後熱処理** 供試材は、Al-Mg-Si 系の合金であり、その化学成分 (mass.%) は Mg: 0.6, Si: 1.0, Fe: <0.2, Mn: 0.05, Cr: <0.05, Zn: <0.3, Ti: <0.05, Al: Bal. である。板厚 2mm, 幅 30mm, 長さ 100mm の短冊状の 2 枚の板を、重ね継手として FSSW を施した。さらに、接合のまま材 (as-weld 材) に対し、後熱処理として人工時効を施したもの (160°C で 18 時間の人工時効処理)、および T6 処理を施したもの (550°C で 35 分間溶体化処理後、160°C で 18 時間の人工時効処理) を試料として準備した。それぞれの継手を時効材および T6 材とする。

**2.2 実験方法** 引張試験および疲労試験には、容量 19 kN の電気油圧サーボ式疲労試験機を使用した。負荷様式は引張せん断であり、室温大気中、繰返し速度  $f = 10\text{Hz}$ 、応力比  $R = 0.1$  で試験を行った。

### 3 実験結果

**3.1 接合部組織** as-weld 材の接合部組織は、Fig.1 の断面観察例で示すように母材 (PS: Parent Sheet), SZ: Stir

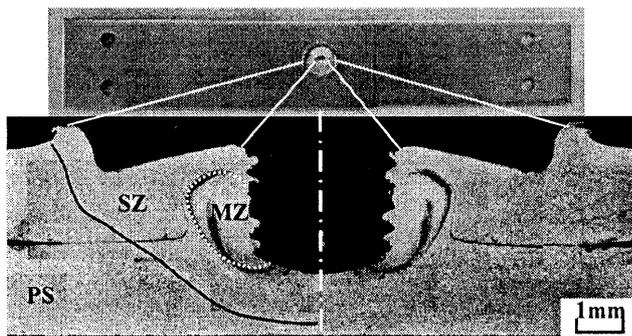


Fig.1 Macroscopic appearance in cross section (as-welded).

Zone, および実質的な接合部の MZ: Mixed Zone で構成される。また、平均結晶粒径は PS では約 35 $\mu\text{m}$ , SZ および MZ では約 8 $\mu\text{m}$  と、接合部で結晶粒は微細化する<sup>1)</sup>。T6 材の断面組織を Fig.2 に示す。結晶粒の著しい粗大化が生じていることがわかる。図中の実線と破線は、それぞれ as-weld 材の SZ と MZ に対応するが、SZ の外側まで粗大化が認められ、白線で囲む粗大化域が as-weld 材の HAZ と考えられる。Fig.3(a)は、Fig.2 中の PS と粗大化域の境界部 (矢印 A 部) であり、結晶粒径の著しい不連続が確認できる。一方、SZ と MZ の境界部 (Fig.2 矢印 B 部) を Fig.3(b)に示す。境界部に沿って帯状に微細な結晶粒が分布しており、この部分でも粒径の不連続が生じている。なお、人工時効のみでは結晶粒は粗大化せず、as-weld 材とほぼ同様の組織であった。

**3.2 引張強度** 引張強度は as-weld 材、時効材、T6 材でそれぞれ 2948N, 2716N, 2748N となり、後熱処理で若干強度が低下したが、その差は小さい。

**3.3 疲労強度** as-weld 材と後熱処理材における最大荷重  $P_{\text{max}}$  と破断繰返し数  $N_f$  の関係を Fig.4 に示す。図より as-weld 材と熱処理材では疲労強度にほとんど差が無く、疲労強度に及ぼす後熱処理の影響は小さい。

**3.4 疲労破壊様相** as-weld 材と後熱処理材では、疲労強度に差はなかったが、破壊様相には相違があり、さらに荷重依存性も認められた。それぞれの破壊様相を模式

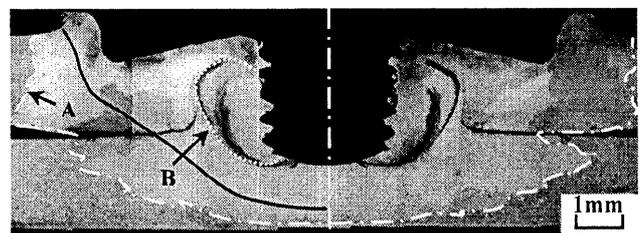


Fig.2 Macroscopic appearance in cross section (T6 treated).

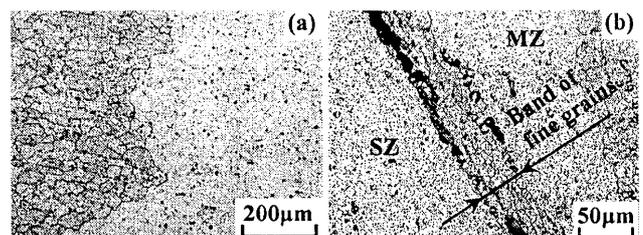


Fig.3 Microstructures: (a) and (b), Magnified view at point "A" and "B" in Fig.2, respectively.

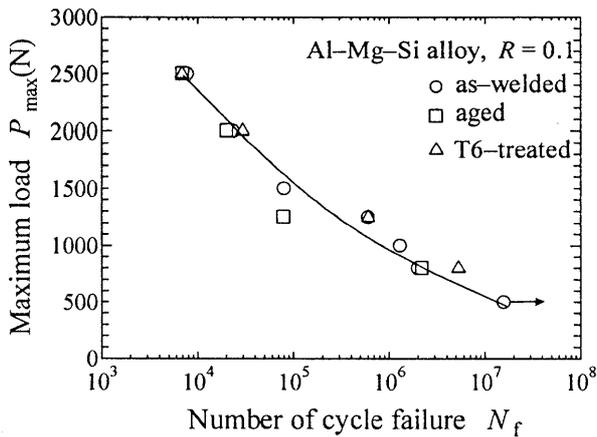


Fig.4 Relationship between maximum load,  $P_{max}$  and number of cycles to failure,  $N_f$ .

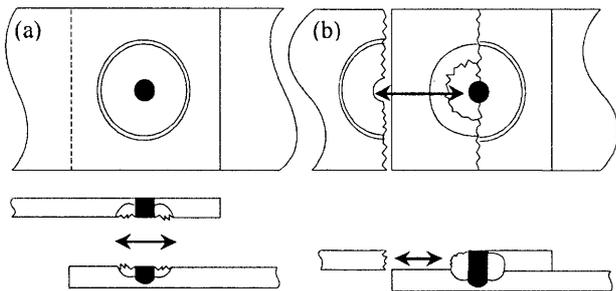


Fig.5 Schematic illustrations of fatigue fracture morphology (as-welded):(a) High applied load, (b) Low applied load.

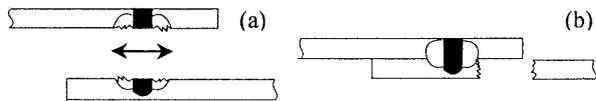


Fig.6 Schematic illustrations of fatigue fracture morphology (aged):(a) High applied load, (b) Low applied load.

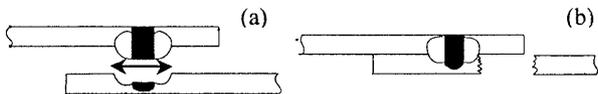


Fig.7 Schematic illustrations of fatigue fracture morphology (T6 treated): (a) High applied load, (b) Low applied load.

的に Fig.5~7 に示す。まず高荷重域では、as-weld 材と時効材の破壊機構に差はなく、いずれも MZ 内でせん断的に破壊する (Fig.5, 6(a))。しかし、T6 材のみ Fig.7(a) に示すように MZ の下側界面で破壊が生じた。一方低荷重域では、as-weld 材では上側の板で最終破断する (Fig.5(b)) のに対し、時効材と T6 材ではいずれも下側の板で破断した (Fig.6, 7(b))。

Fig.8 は、高荷重域での時効材の破面様相である。(a) 中の矢印 A で示すように、上下板界面で開口が認められる。また、(a)中の矢印 B 部における拡大図を(b)に示す。筋状の疲労破面が認められる。すなわち、前報<sup>1)</sup>で報告したように、高荷重域では荷重負荷によって上下板界面で開口が生じる。さらに、開口端における応力集中によってき裂が発生し、荷重軸に対して垂直方向にき裂が MZ 内を進展して破断に至ると考えられる。T6 材でもほぼ同様の破面が認められたが、前述のように T6 材では MZ 内ではなく界面をき裂が進展した。また低荷重域で

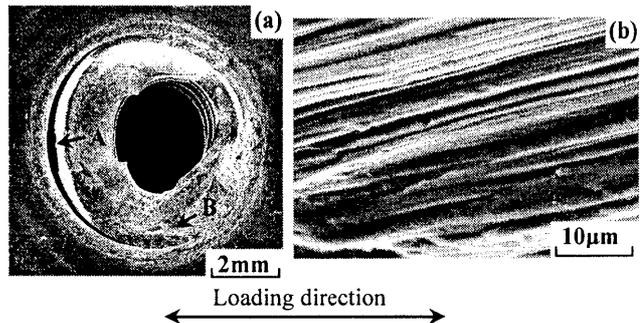
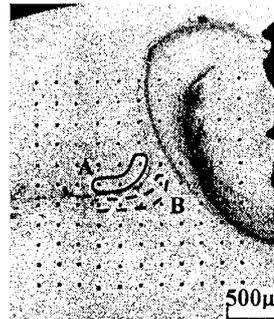


Fig.8 SEM micrographs of fracture surfaces (aged): (a)  $P_{max} = 2000N$ ,  $N_f = 2.4 \times 10^4$ , (b) Magnified view at point "B" in Fig.(a).



Joint	Upper sheet (Area A)	Lower sheet (Area B)
as-welded	94	108
aged	133	128
T6 treated	140	131

Fig.9 Hardness measurement points in cross section (aged) and measured Vickers hardness values of each joint.

は、いずれの継手も MZ 端からき裂が発生し、板幅方向にき裂が進展して最終破断した。

#### 4 考 察

各材の破壊機構を検討するため、Fig.9 のように接合部断面における硬さ分布を 200µm 間隔で格子状に測定した。図中の点が測定点である。また、図中の実線と破線で囲む領域 A と B が、低荷重域での上下板におけるき裂発生箇所に対応する。そこで領域 A と B 内での硬さを平均し、それぞれを上下板の硬さとした。測定結果を図中表に示す。as-weld 材では下板よりも上板の Hv が低いのに対し、熱処理材では逆に下板の方が低い。すなわち、上下板で接合時の入熱量が異なるため、後熱処理によって硬さの逆転が生じたと考えられる。

以上の結果より、まず高荷重域では、Fig.8 で示したように開口部端からき裂が発生して破断に至るが、T6 材では MZ 界面で粒径が著しく不連続 (Fig.3(b)) となっており、微視組織的な不連続性によって MZ 界面をき裂が進展したと考えられる。一方低荷重域では、開口が生じないために板部で破断するが、Fig.9 に示したように、後熱処理によって上下板の硬さが逆転するため、後熱処理材では軟らかい下側の板で破断したと考えられる。

#### 5 結 言

本研究では、後熱処理を施した Al-Mg-Si 系合金 FSSW 継手の疲労試験を行い、その疲労挙動について検討した。その結果、後熱処理が疲労強度に与える影響は小さいが、後熱処理によって疲労破壊機構が変化し、熱処理による粒径変化と硬さ変化に起因することを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) 植松美彦他, 材料, 56 (2007) 印刷中.