

1044 摩擦攪拌により組織改質した鋳造マグネシウム合金 AZ91 の疲労挙動

Fatigue Behaviour of Cast Magnesium alloy AZ91 Microstructurally Modified by Friction Stir Processing

正 ○戸梶 恵郎 (岐阜大工) 正 植松 美彦 (岐阜大工) 藤原 和馬 (本田技研)
正 戸崎 康成 (岐阜県機材研) 正 柴田 英明 (岐阜県機材研)

Keiro TOKAJI, Department of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
Yoshihiko UEMATSU, Gifu University
Kazuma FUJIWARA, Honda Motor Co., Ltd.
Yasunari TOZAKI, Research Institute for Machinery and Materials Gifu Prefecture
Hideaki SHIBATA, Research Institute for Machinery and Materials Gifu Prefecture

The fatigue behaviour of friction stir processed (FSPed) cast magnesium alloy AZ91 was studied. Fully reversed axial fatigue tests have been performed using as-cast, T5-aged and their FSPed specimens (as-cast/FSP and T5/FSP). Both FSPed specimens showed considerably higher fatigue strength than the as-cast and T5-aged specimens. By applying FSP, β -phases with irregular shape from which cracks initiated in the as-cast and T5-aged specimens were finely dispersed and grain refinement was achieved, thereby the crack initiation resistance and the crack growth resistance were significantly improved, resulting in the higher fatigue strengths of the FSPed specimens.

Key words: Fatigue, Cast magnesium alloy, Microstructure modification, Friction stir processing

1. 緒 言

鋳造材では内在する鋳造欠陥が疲労破壊起点になる場合が多く、疲労信頼性の観点からその制御がきわめて重要である。鋳造後の組織改質法として、近年開発された摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) を応用した摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Processing, FSP) が挙げられる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。この手法では塑性流動によって鋳造欠陥が閉口すると同時に、摩擦熱によって組織の微細化が達成されるので、鋳造材の機械的性質^{(1),(2)}、とりわけ疲労特性の改善にきわめて有効であると考えられる。しかし、FSP 改質材の疲労挙動について検討した研究は少ない^{(3),(4)}。

著者らは前報において、鋳造アルミニウム合金に FSP を適用し、疲労挙動におけるその有効性について検討した⁽⁴⁾。本研究ではそれに続いて、マグネシウム (Mg) 鋳造合金 AZ91 に FSP を適用し、組織改質を試みると同時に、FSP 改質材の疲労挙動について詳細に検討する。

2. 材料および実験方法

2.1 材料 用いた材料は Mg-Al-Zn 系の Mg 鋳造合金 AZ91-F である。その化学成分を表 1 に示す。

2.2 FSP 条件 FSP に用いたツールのショルダー部直径は 18mm, M8 の左ねじが付されたプローブの長さは 4.7mm である。ツールは時計回りに回転し、傾き角は 3° である。予備試験結果に基づいて、最終的に採用したツール回転速度と送り速度は、それぞれ 800rpm および 500mm/min である。試験片長手方向にツールを移動させ、後述する試験片の平行部全体を FSP 改質した。

2.3 試験片 インゴットより厚さ 6mm の短冊状板材を切り出し、FSP を施した後、平行部幅 8mm, 平行部長さ 12mm の疲労試験片に機械加工した。試験片厚さは 4mm であり、攪拌部中心がほぼ板厚中央に位置するように上下面を切削加工した。なお、き裂発生および成長の観察を容易にするために、平行部片面に浅い切欠きを付している。

疲労試験に用いた試験片は 4 種類であり、鋳造のまま (as-cast 材)、鋳造材に T5 処理を施したもの (T5 材)、それらに FSP を施したもの (それぞれ as-cast/FSP 材, T5/FSP

材) である。なお、T5 処理条件は 491K, 48 時間である。

2.4 実験方法 組織観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。疲労試験には容量 98kN の電気油圧式疲労試験機を用い、室温大気中、軸荷重下、繰返し速度 $f=10\text{Hz}$ 、応力比 $R=-1$ で実験を行った。破面観察には SEM を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 FSP 後の組織 図 1 に FSP 前、すなわち as-cast 材と T5 材の組織を示す。いずれも結晶粒界に β 相 ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) が析出しており、その析出量は T5 材で多いことがわかる。また、T5 材には SEM 高倍率観察によって粒内に微細な析出が生じていることが確認されている。

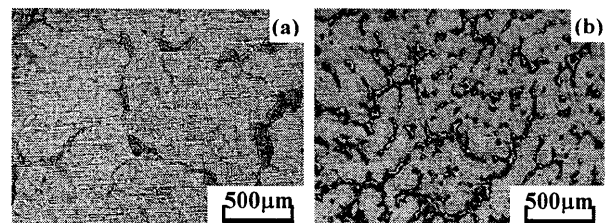


Fig.1 Microstructures: (a) as-cast, (b) aged (T5).

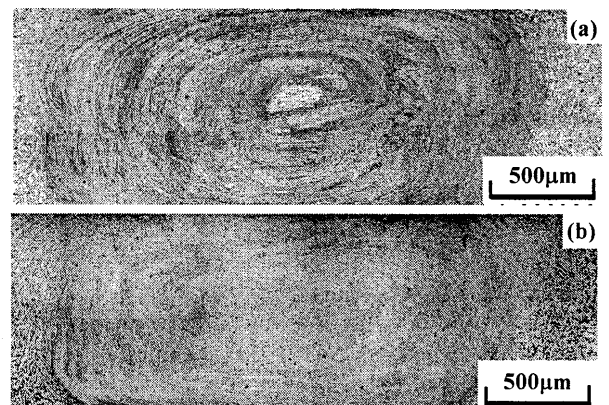


Fig.2 Microstructures of cross section of FSPed specimens: (a) as-cast/FSP, (b) T5/FSP.

Table 1 Chemical composition of material (wt.%).

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Ni
8.29	0.58	0.30	0.0035	0.0093	0.021	0.0006

Table 2 Mechanical properties of materials.

Material designation	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϕ (%)	Reduction of area ψ (%)
as-cast	67	135	7	5
T5	88	131	4	7
as-cast/FSP	107	292	18	19
T5/FSP	103	304	25	24

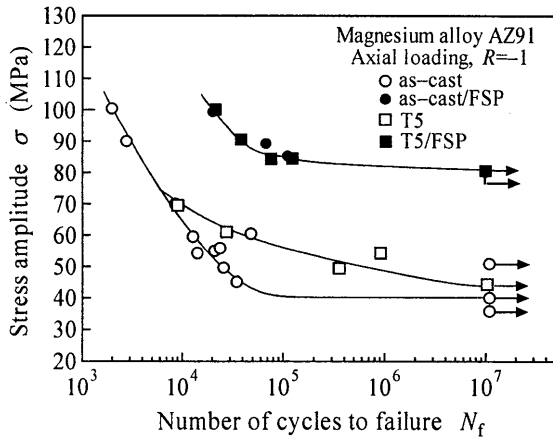


Fig.3 S-N diagram.

FSP後の組織 (as-cast/FSP材, T5/FSP材)を図2に示す。両材の組織は同様であり、攪拌部 (SZ) には塑性流動を反映したオニオンリング模様 (FSP痕) が見られる。SZ内ではas-cast材やT5材に見られた粗大な結晶粒は消失し、動的再結晶によって結晶粒径が9~10 μ mの微細等軸粒になっている。

3.2 硬さ分布 as-cast/FSP材とT5/FSP材におけるSZ近傍の硬さは、それぞれas-cast材およびT5材より上昇した。これは攪拌による結晶粒微細化と高転位密度組織の形成に起因すると考えられる。また、T5/FSP材はas-cast/FSP材よりも高い硬さを示した。これは析出量の多い β 相がFSPによって分断され、均一に分散したためと考えられる。

3.3 機械的性質 機械的性質を表2に示す。as-cast材とT5材の機械的性質はほぼ同等であり、T5処理の影響はほとんど見られない。これに対してas-cast/FSP材およびT5/FSP材では、as-cast材およびT5材と比べて強度、延性ともに大きく向上している。これは硬さと同様に、結晶粒微細化と高転位密度組織の形成のためと考えられる。

3.4 疲労挙動

3.4.1 疲労強度 S-N曲線を図3に示す。as-cast材ではデータのばらつきが大きく、10⁷回の疲労強度は40MPaである。またT5材では、機械的性質はas-cast材と同様であったが、疲労強度はas-cast材よりも上昇し、10⁷回の疲労強度は45MPaである。それに対して、両FSP改質材の疲労強度は大きく上昇し、事前の熱処理 (T5) の有無にかかわらず一致する。10⁷回の疲労強度は80MPaである。このように、FSP改質前に見られたas-cast材とT5材の疲労強度の違いはFSPを施すと現れないことから、FSPによる結晶粒微細化や高転位密度組織の形成に起因する疲労強度の向上度合が大きく、熱処理の影響が現れなかったと思われる。

3.4.2 き裂発生 as-cast材およびT5材には铸造欠陥はほとんど存在せず、き裂は β 相の割れから発生した。また、停留き裂も確認された。一方、as-cast/FSP材とT5/FSP材ではき裂はすべり変形により発生しており、停留き裂は見られなかった。図4にき裂長さと繰返し数の関係を示す。as-cast材やT5材ではき裂発生はきわめて早いものに対して、

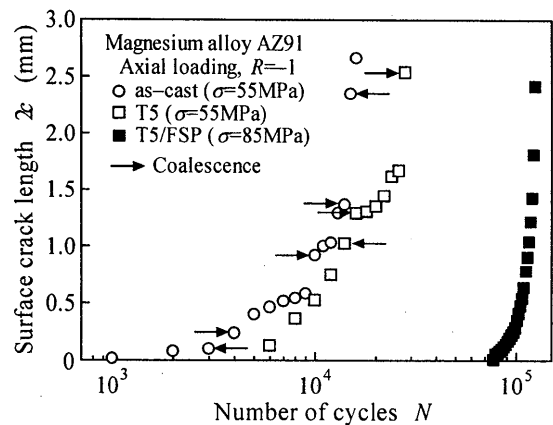


Fig.4 Surface crack length as a function of number of cycles.

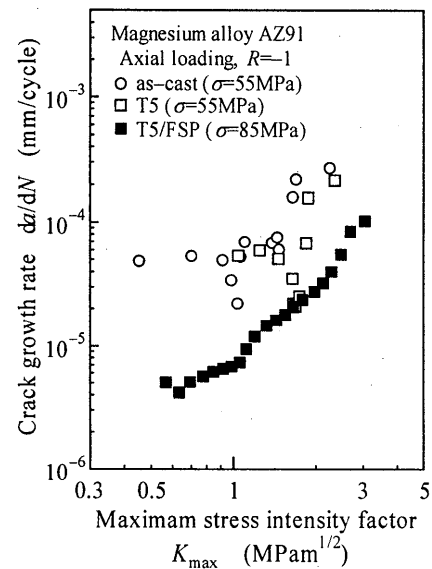


Fig.5 Relationship between crack growth rate and maximum stress intensity factor.

T5/FSP材では高い応力にもかかわらず非常に遅い。このようなき裂発生抵抗の顕著な向上は、き裂発生が β 相からすべり変形に変化したことに起因している。FSPによって β 相は攪拌、分断され、組織中に均一に分散する。したがって、as-cast材やT5材のようなき裂発生に敏感な塊状の β 相が消失するため、き裂発生抵抗が向上したと思われる。また、結晶粒微細化の寄与も考えられる。

3.4.3 微小き裂成長 図5にき裂成長速度と最大応力拡大係数の関係を示す。T5/FSP材のき裂成長速度はas-cast材やT5材に比べてきわめて遅く、高いき裂成長抵抗を示す。これは動的再結晶による結晶粒微細化と高転位密度組織に起因すると考えられる。すなわち、結晶粒界や粒内の高い転位密度は、微小き裂成長に対する抵抗になったと考えられる。

4. 結 言

本研究では、マグネシウム鋳造合金AZ91に摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Processing, FSP) を適用し、疲労挙動におけるその有効性について検討した。その結果、事前の熱処理 (時効) の有無にかかわらず、FSPによって疲労強度は大きく向上した。これは改質前にき裂発生箇所となった塊状の β 相がFSPによって分断、均一分散したことと結晶粒微細化に基づいて、き裂発生抵抗と成長抵抗の両者が改善されたことに起因することを明らかにした。

(参考文献省略)