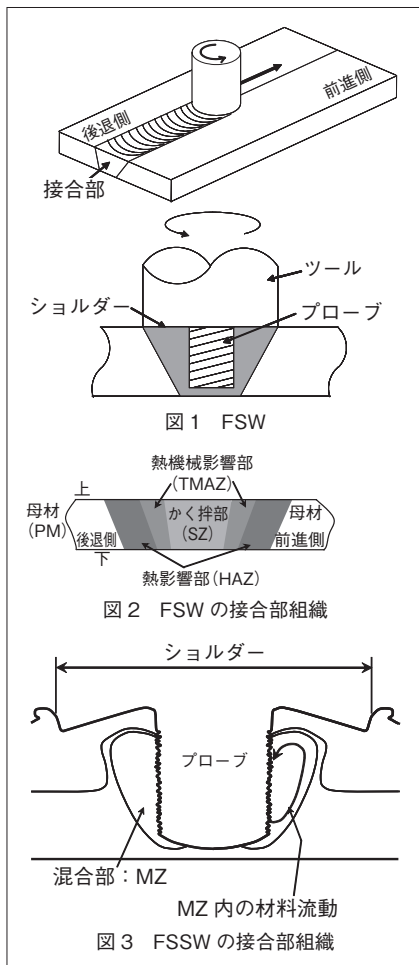


摩擦かく拌による接合継手，改質材の疲労挙動



1. はじめに

自動車や鉄道などの運輸産業では、軽量化のためにアルミニウム (Al) 合金を利用する動きが加速している。その中で摩擦かく拌接合 (Friction Stir Welding: FSW) は、Al 合金やマグネシウム (Mg) 合金など、低融点金属の固相接合法として注目されている。FSW は、図1に示すようにねじ溝を切ったプローブとショルダーからなるツールを回転させながら板材に接触させ、発生する摩擦熱によって軟化した材料を塑性流動させて接合する手法である。FSW の長所は、溶接欠陥が少ない、接合による変形が小さいなどである。また溶接棒やシールドガスは不要であり、アークのような強い光の発生源がないなど、環境負荷の小さいクリーンな接合手法としても注目されている。さらに FSW をスポット接合に応用した FSSW (Friction Stir Spot Welding) や、材料の組織改質に応用した FSP (Friction Stir Pro-

cessing) なども存在する。

2. FSW 継手の疲労挙動

FSW 継手の断面組織を模式的に図2に示す。ツールは一方から進入するため、組織は上下で非対称となる。また一般的に接合部は、プローブで十分にかく拌されたかく拌部 SZ (Stir zone)、塑性流動と入熱の影響を受けた熱加工影響部 (Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ)、熱影響部 (Heat Affected Zone: HAZ) に分類され、複雑な接合部組織が形成される。さらに FSW による微視組織の大きな特徴として、SZ での結晶粒微細化がある。これは、接合時の入熱によって材料が再結晶温度近傍まで加熱され、その際に強い塑性変形を受けることで動的再結晶が生じるためとされている。材料や接合条件によるが、たとえば 6061 合金では、 $65\mu\text{m}$ 程度の母地結晶が、SZ で約 $9\mu\text{m}$ まで微細化する⁽¹⁾。このような結晶粒微細化を組織改質に応用するのが FSP である。

ここで一つの問題が生じる。それは、材料の単調荷重下の引張強さは比較的組織不敏感であるが、繰返し荷重下の疲労挙動は微視組織に対して敏感だと言うことである。その結果、FSW 継手の引張強さと疲労限度の明瞭な相関を得ることは難しい。たとえば同じ熱処理型の合金でも 6061-T6 材と 7075-T6 材を比較すると、継手効率「継手の引張強さ÷母材の引張強さ」は前者で約 70%、後者で約 90% となる。これは FSW 時の入熱によって、T6 処理で析出した硬化物が再固溶するためである。しかし、疲労限度の継手効率を「継手の疲労限度÷母材の疲労限度」で定義すると、6061-T6 材で約 70%、7075-T6 材で約 100% となり、引張強さの効率とは異なる。このような相違は、FSW 継手には疲労強度低下要因となる析出物再固溶による材料軟化だけでなく、強度向上要因となる結晶粒の微細化や接合部における動的時効が存在するためである。これらの影響因子はいずれも微視組織に起因するため、その影響を明らかにするためには組織観察のみでなく、き裂発生やその後のき裂進展と微視組織の相関を理解しなければならない。

3. FSSW 継手の疲労挙動

FSSW は FSW をスポット接合に応

用したものであり、「S」の字が一つ増えたに過ぎないが、接合部組織は、図3に示すように FSW とは全く異なる。図から明らかのように、微視組織に加えて応力集中という因子が加わり、FSSW の疲労挙動を複雑化する⁽²⁾。しかし、疲労強度に及ぼすツール形状⁽³⁾、接合条件、プローブ穴埋込み処理など影響⁽⁴⁾を検討した結果、接合部断面での巨視的な形状因子が FSSW 継手の疲労挙動の支配要因であることを明らかにした。このように FSSW の疲労では、FSW で重要であった微視組織因子は二次的因子となる。

4. FSP 材の疲労挙動

FSP 材の疲労挙動は、基本的には FSW 継手と同じと思われるかもしれない。しかし、図1のようにツールが走行するとき、FSW 継手は試験片の荷重軸がツール走行方向に垂直であるが、FSP 材では、荷重軸はツール走行方向と一致する。その結果、FSP 材の疲労挙動に与える微視組織因子が異なってくる。具体的には、オニオンリングと呼ばれる年輪状組織がかなり強い影響を持つようになる⁽⁵⁾。

5. おわりに

以上のように、FSW 継手や FSP 材の疲労挙動は微視組織に依存して複雑である。また、FSSW 継手の疲労挙動は接合部形状に依存する。したがって、継手や改質材の信頼性を確保するには、地道な実験を通して破壊機構を解明する必要があり、現在も摩擦かく拌による異種金属継手や改質材の疲労挙動を検討し続けている。

(原稿受付 2008 年 10 月 7 日)

[植松美彦 岐阜大学]

●文 献

- (1) 植松美彦・ほか, 6061-T6 アルミニウム合金摩擦攪拌接合継手の疲労挙動, 材料, 55-1 (2006), 49-54.
- (2) 植松美彦・ほか, Al-Mg-Si 系合金摩擦攪拌スポット接合継手の疲労挙動, 材料, 56-6 (2007), 537-543.
- (3) 戸崎康成・植松美彦・戸梶恵郎, 摩擦攪拌スポット接合継手の強度特性に及ぼすツールショルダー径の影響, 日本機械学会論文集, 74-738, A (2008), 268-274.
- (4) Uematsu Y., ほか, Effect of Re-filling Probe Hole on Tensile Failure and Fatigue Behaviour of Friction Stir Spot Welded Joints in Al-Mg-Si Alloy, *Int. J. Fatigue*, 30 (2008), 1956-1966.
- (5) 植松美彦・ほか, 鋳造アルミニウム合金の疲労挙動に及ぼす摩擦攪拌プロセスの影響, 材料, 58-1 (2009), 69-75.