Sn-37Pb および Sn-3.5Ag はんだ接合試験片の多軸低サイクル疲労寿命

Multiaxial Low Cycle Fatigue Life for Solder Joint Specimens of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag

○ 寺島 隆介 福井大学 (院)

Ryusuke Terashima, Fukui University

伊藤 隆基 福井大学

Takamoto Itoh, Fukui University

Key Words: low cycle fatigue, multiaxial stress state, fatigue life, joint specimen, Sn-37Pb, Sn-3.5Ag

多軸負荷におけるはんだ接合部の疲労寿命特性を明らかにするため、Sn-37Pb および Sn-3.5Ag の 2 種類の銅-はんだ-銅接合中空円筒試験片を用いて、引張・圧縮、繰返しねじり、軸およびねじりのひずみが 90 度の位相差を有する円形負荷の 3 種類のひずみ経路の下で多軸低サイクル疲労試験を実施した。接合試験片の低サイクル疲労寿命は、Sn-37Pb および Sn-3.5Ag とともにバルク材の寿命に比べて著しく低下し、ひずみ経路に依存した。とくに円形負荷による寿命低下は顕著であり、円形負荷の寿命は引張・圧縮の寿命に比べて 1/2 以下であった。また、試験後の試験片表面のき裂は、はんだと接合部の両方で観察されたが、その特徴はひずみレベルや材料に依存した。とくに円形負荷でははんだ部に小さいき裂が多数観察された。

1. 緒言

長年使用されてきた鉛系はんだは環境問題の点から使用が制限され非鉛系はんだへの移行が急激に進んできた。現在使用されている非鉛系はんだの疲労強度特性はある程度明らかになってきたものの、はんだ接合材の疲労強度はまだ十分に明らかにされていない。とくに、はんだ接合部に生じるような多軸負荷状態での疲労強度特性はまったく明らかにはされていない。本研究でははんだ接合部の強度評価を行うため、代表的な非鉛系はんだである Sn-3.5Ag と従来の鉛系はんだの Sn-37Pb を銅で接合したはんだ接合試験片を作製し、同試験片を用いた多軸低サイクル疲労試験を実施した。得られた試験結果とバルク材の試験結果を比較し、多軸負荷における低サイクル疲労寿命特性を系統的に調べた。また、疲労試験後の試験片表面き裂観察を行い、き裂の発生および成長の挙動についても考察した。

2. 試験材料および試験方法

2-1 供試材料および試験片 供試材は鉛系の Sn-37Pb および非鉛系の Sn-3.5Ag である。Fig.1 に試験片形状および寸法を示す。試験片は、先ずはんだ層の幅が 1mm のはんだ接合材を作成し、その接合材から試験片加工用の棒材をワイヤー放電加工で切出し、機械加工にて外径 12mm、内径 9mm の中空円筒試験片を製作した。接合部は、試験片の長手方向の中心に位置するようにし、評点間距離 (GL) 5mm の位置にポンチ穴をあけた。なお、機械加工後の試験片の熱処理は、行っていない。

Fig.1 Shape and dimensions of specimen (mm)

はんだと銅の接合界面は、Fig.2 に Sn-3.5Ag の接合界面の組織を模式的に示すが、金属間化合物が極めて複雑な形状で形成されていることが分かる。

2-2 試験方法 本研究では、Fig.3 に示す引張・圧縮、繰返しねじりおよび軸ひずみとせん断ひずみが 90 度の位相差を有する円形負荷の 3 種類のひずみ経路を用い、ひずみ速度がミーゼス型の相当全ひずみ基準で 0.1%/s 一定のひずみ制御とした。また、軸ひずみ ϵ とせん断ひずみ γ の最大範囲 $\Delta\epsilon$ および $\Delta\gamma$ がミーゼス基準で一定 ($\Delta\epsilon = \Delta\gamma/\sqrt{3}$) とし、ひずみ範囲は $\Delta\epsilon_{eq} = 0.1\%$ と 0.2% の 2 種類を用いた。

破損寿命 N_f は、試験片軸方向の引張または圧縮の垂直応力振幅が、繰返しねじり試験ではどちらか一方のせん断応力振幅が $1/2N_f$ におけるそれらから 3/4 に低下したときの繰返し数として定義した。

3. 多軸低サイクル疲労寿命特性

Fig.4 にミーゼス型の相当全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{eq}$ で破損寿命 N_f を整理した結果を示す。同図(a)および(b)はそれぞれ Sn-37Pb および Sn-3.5Ag はんだ接合試験片 (中空円筒) の試験結果である。なお、図中には中実丸棒試験片の引張・圧縮の試験結果 (◆) も示した、また、図中の実線を付した■のプロットは、はんだバルク材の中実丸棒試験片の引張・圧縮の結果を示す。両図の結果ともに、はんだ接合試験片の N_f は、バルク材の N_f に比べて著しく低下していることがわかる。また、円形負荷の N_f は引張・圧縮のそれと比べると低寿命側に整理された。繰返しねじり負荷の N_f は引張・圧縮のそれとほぼ同程度であるが、どちらかといえば若干長寿命側に整理される傾向があった。なお、はんだ接合試験片の引張・圧縮の N_f は、中実と中空の試験片形状の違いによる寿命差はほとんど見られ

Fig.2 Schematic showing at solder-copper interface

Fig.3 Strain paths employed

Fig.4 Relationship between $\Delta\epsilon_{eq}$ and N_f

Fig.5 Relationship between $\Delta\epsilon_{eq}^s$ and N_f

なかった。

Fig.4 の寿命整理で用いた $\Delta\epsilon_{eq}$ は標点間の公称ひずみなので、Fig.5 でははんだ部に生じるひずみによる寿命整理を行なう。そこで、はんだ部の相当ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{eq}^s$ を次式から求めた。

$$\Delta\epsilon_{eq}^s = \frac{GL \Delta\epsilon_{eq} - (GL - t_s) \Delta\epsilon_{eq}^c}{t_s} \quad (1)$$

ここで、 GL および t_s はそれぞれ標点間距離およびはんだ層厚さで、 $GL=5\text{mm}$ および $t_s=1\text{mm}$ である。 $\Delta\epsilon_{eq}^c$ は、実験で得られた $1/2N_f$ の応力と銅の応力-ひずみ関係から求めた銅のひずみである。 $\Delta\epsilon_{eq}^s$ で破損寿命 N_f を整理した結果を Fig.5 に示す。なお、中実丸棒試験片の引張・圧縮では応力のデータがなかったために図示は省略した。同図の結果では、接合試験片のデータが Fig.4 に比べて高ひずみ側に移動し、結果的にバルク材に寿命データに近づくが、それにもかかわらずバルク材の破損寿命の $1/100 \sim 1/4N_f$ で整理された。このことから、はんだに生じるひずみでデータ整理しても接合試験片の破損寿命は、バルク材の寿命に比べて低寿命となり、また、その程度はひずみ経路に依存することがわかった。

なお、接合試験片の試験では、同一試験でもはんだ層および接合界面の欠陥や接合不良に起因するに寿命のばらつきはある程度確認された。

3. 多軸疲労試験後の表面き裂観察

低サイクル疲労試験後の試験片表面き裂の観察より、き裂の発生・成長に及ぼすひずみ経路、材料およびひずみレベルの影響を考察した。き裂の観察にはレーザ顕微鏡を用いた。Fig.6 は、 $\Delta\epsilon_{eq}=0.1\%$ の各負荷経路での Sn-37Pb および Sn-3.5Ag のき裂観察結果を示す。Sn-37Pb の引張・圧縮では、はんだ部のき裂の方向性はとくに確認できなかった。繰返しねじりでは、はんだ部のき裂の方向は、試験片軸方向で比較的多く観察された。円形負荷では、き裂は様々な方向に観察され、き裂の数は引張・圧縮および繰返しねじりに比べて明らかに多かった。また、き裂は、全てのひずみ経路の試験で接合部

Fig.6 Cracks on specimen surface after fatigue test

にも発生・成長し、引張・圧縮および円形負荷で観察されるき裂の開口量は繰返しねじりに比べて大きかった。

Sn-3.5Ag のき裂の形態は、Sn-37Pb と比べるとほぼ同様の傾向が見られたが、き裂は比較的明瞭に観察された。

$\Delta\epsilon_{eq}=0.2\%$ の試験片表面き裂観察結果の図示は省略するが、ひずみレベルが高くなるとはんだ部のき裂の数は減少し、逆に接合部のき裂の開口が目立ち、破損の主要原因が接合部の破断に遷移するようである。

今回のき裂の表面観察から、き裂の形態と破損寿命との関係を明確に説明することはできなかった。したがって、引続き試験後の試験片の破断面や試験片切断による試験片内部のき裂観察、さらに中断試験によるき裂の発生・成長の観察を詳細に行い、破損のメカニズムを明らかにする予定である。

4. 結 言

1. はんだ接合材の破損寿命は、バルク材（引張・圧縮試験）に比べて著しく低下した。
2. 接合試験片の破損寿命は、相当全ひずみ範囲で寿命整理すると、引張・圧縮に比べて、繰返しねじりでは若干長寿命側に、円形負荷では短寿命側に整理された。
3. 表面き裂は、比例負荷と非比例負荷の違い、ひずみ範囲およびはんだの種類の違いにより、はんだ部に生じるき裂の発生・成長の傾向が異なっていた。