710 ひずみ範囲分割法による Sn-Ag-Bi-Cu 系鉛フリーはんだ材の疲労寿命予測

Prediction of the Fatigue Life in Sn-Ag-Bi-Cu Lead-free Solder by Strain-range Partitioning Method

正 上西 研 (山口大工)
学○上森 耕輔 (山口大院)

正 種田 元治 (福山大工)

Ken KAMINISI, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi
Motoharu TANEDA, Fukuyama University, Gakuen Cho 1, Fukuyama, Hiroshima
Kousuke UEMORI, Yamaguchi University

Key Words : Lead-free Solder, Sn-Ag-Bi-Cu Solder, Fatigue life prediction

1. 緒言

現在, 地球環境保護の観点から, 従来の Sn-Pb 系共晶はんだ材の代替材として様々な鉛フリーはんだ材の開発が進められている。その中で, 耐熱性, 耐疲労性に優れているといわれている Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだ材と融点を下げることが目的として Bi を添加した Sn-Ag-Bi-Cu 系はんだ材がその有力候補だと考えられている。そこで, 本研究では Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだ材に Bi を 0, 1, 2, 5, 15% と添加したバルク試験片にねじり疲労試験を実施し, 疲労寿命に及ぼす Bi 添加量の影響について調べた。さらにひずみ範囲分割法を適用することにより Sn-Ag-Bi-Cu 系鉛フリーはんだ材の疲労寿命予測式を導き, その妥当性について検証するとともに, 疲労寿命に及ぼすクリープの影響について検討した。

2. 実験方法

疲労試験には図 1 に示す肉厚 2mm の薄肉円筒試験片を用いた。表 1 の化学成分に示すように, Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだ材に Bi を 0, 1, 2, 5, 15% 添加した計 5 種類を使用した。試験片は各はんだ材とも大気溶解して鋳型に鋳込み, その後機械加工を実施して作製した。機械加工による残留ひずみを除去するため, 固相線温度[K]の 87% で焼鈍を行った。

試験装置は前報⁽¹⁾に示したものを使用した(変位制御, ひずみ比 $R = -1$)。疲労試験の条件は雰囲気温度 $T = 303$ と 333 K の 2 種類, 繰返し速度 $\nu = 0.01, 0.1$ および 1.0 Hz の 3 種類とした。

3. 実験結果

図 2 に $T = 303$ K, 全せん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma_T = 2.0\%$, $\nu = 1.0$ Hz における各はんだ材のせん断応力範囲 $\Delta\tau$ の変化を示す。なお, 疲労寿命 N_f は $N_f/2$ のときのせん断応力範囲 $\Delta\tau_{Nf/2}$ が 20% ほど低下したときの繰返し数とし, 繰返し数 N を疲労寿命 N_f で割ることにより無次元化した。

同図より, Bi 量の増加に伴い $\Delta\tau$ は大きくなる傾向にあることがわかる。また 0%Bi および 1%Bi では繰返し初期から破断時まで疲労軟化が続いているのに対して, 他の Bi 添加材 (2%, 5%, 15%Bi) では繰返し中期に $\Delta\tau$ がフラットになる領域を示した。

図 3 に非弾性ひずみ範囲と疲労寿命の関係を示す。参考のため, 現行はんだ材である 63Sn-37Pb 共晶はんだ材のデータもあわせて載せている。1%, 2%, 5%, 15%Bi の各はんだ材は, 0%Bi はんだ材と比べて著しく低い疲労寿命を示した。図に示されるように各はんだ材ともそれぞれ一本の直線で近似することができ, Coffin-Manson 則が成立している。Bi 添加材における疲労寿命は Bi 添加量が増えるとやや低下傾向にあるが, あまり大きい差はない。つまり, Sn-Ag 系鉛フリーはんだ材の疲労寿命は Bi の添加によって著しく低下するが, Bi の添加量にはそれほど影響がないことがわかる。

Fig.1 Specimen

Table.1 Chemical compositions

	Sn	Cu	Bi	Ag
Sn-3.5Ag-0.7Cu	95.7	0.7	-	3.6
Sn-3.0Ag-1Bi-0.7Cu	95.3	0.7	1.0	3.0
Sn-3.3Ag-2Bi-0.47Cu	93.9	0.5	2.3	3.3
Sn-3.5Ag-5Bi	91.5	-	5.0	3.5
Sn-2.8Ag-15Bi-0.5Cu	81.7	0.5	15.0	2.8

Fig.2 Change of shear stress range

Fig.3 Number of cycles to failure

4. ひずみ範囲分割法による疲労寿命予測

著者らは先に 63Sn-37Pb はんだ材について、ひずみ範囲分割法を基にした疲労寿命評価法⁽²⁾を提案した。各鉛フリーはんだ材についてもそれと同様な方法より導出した。ひずみ範囲分割法を基にして得られた疲労寿命評価式は以下のようになる。

T=303K の場合

$\nu \geq 1.0\text{Hz}$

$$N_f = A_{303} \Delta\gamma_{in}^{\alpha_{303}} \quad \dots \quad (1)$$

$\nu < 1.0\text{Hz}$

$$N_f^{-1} = B_{303} (f_{303}(\nu) \Delta\gamma_{in})^{\beta_{303}} + C_{303} \{ (1 - f_{303}(\nu)) \Delta\gamma_{in} \}^{\gamma_{303}} \quad (2)$$

T=333K の場合

$\nu \geq 1.0\text{Hz}$

$$N_f = A_{333} \Delta\gamma_{in}^{\alpha_{333}} \quad \dots \quad (3)$$

$\nu < 1.0\text{Hz}$

$$N_f^{-1} = B_{333} (f_{333}(\nu) \Delta\gamma_{in})^{\beta_{333}} + C_{333} \{ (1 - f_{333}(\nu)) \Delta\gamma_{in} \}^{\gamma_{333}} \quad (4)$$

表 2 に上式の各値を示す。

図 4 にひずみ範囲分割法を基にした疲労寿命評価式による計算値と実験値の比較を示す。今回は代表例として 0%Bi はんだ材を記している。図に示されるとおり実験値と計算値は T=303, 333K とともに比較的良く一致している。これは他のはんだ材についても同様の結果を得ている。よって本疲労寿命評価法は Sn-Ag-Bi-Cu 系鉛フリーはんだ材にも適用できる。式 (2), (4) の右辺第 2 項はクリープ寿命を表している項である。各はんだ材における評価式中の係数 C_{303} および C_{333} を比較すると 0%Bi は Bi 添加材よりも格段に低い値を示しており、

0%Bi は Bi 添加材と比べてクリープの影響を受けにくい材料であることがわかる。このことは 0%Bi の融点が Bi 添加材と比べて高いことに関連しているものと考えられる。

また、本疲労寿命評価式と、有限要素法解析を併用することにより Sn-Ag-Cu-Bi 系鉛フリーはんだ接合部のき裂発生寿命を予測できるものと考えられる。

Fig.4 Comparison of calculated values with experimental ones

5. 結言

- (1) 0%Bi はんだ材は Bi 添加材に比べ耐疲労特性に優れており、クリープの影響も受けにくいことがわかった。
- (2) Bi 添加量を変化させた各種 Sn-Ag-Bi-Cu 系鉛フリーはんだ材について、ひずみ範囲分割法を基にした寿命評価式を導出した。

参考文献

- (1) 種田・ほか 2 名, 機論, 64-217, A(1998), 50-57.
- (2) 種田・ほか 2 名, 機論, 58-549, A(1992), 669-675.

Table.2 Coefficient of formulation obtained by Strain-range Partitioning Method

T=303K							
	A_{303}	B_{303}	C_{303}	$f_{303}(\nu)$	α_{303}	β_{303}	γ_{303}
Sn-3.5Ag-0.7Cu	8.52×10^3	1.14×10^{-4}	2.16×10^{-4}	$1.00 \nu^{0.36}$	-1.74	1.74	1.33
Sn-3.0Ag-1Bi-0.7Cu	1.77×10^3	5.88×10^{-4}	1.20×10^{-3}	$0.97 \nu^{0.44}$	-1.61	1.61	1.33
Sn-2.8Ag-15Bi-0.5Cu	5.55×10^2	1.80×10^{-3}	7.31×10^{-3}	$1.84 \nu^{0.35}$	-1.66	1.66	2.09
T=333K							
	A_{333}	B_{333}	C_{333}	$f_{333}(\nu)$	α_{333}	β_{333}	γ_{333}
Sn-3.5Ag-0.7Cu	9.25×10^3	1.08×10^{-4}	1.77×10^{-4}	$0.98 \nu^{0.65}$	-2.3	2.3	1.84
Sn-3.0Ag-1Bi-0.7Cu	1.68×10^3	5.94×10^{-4}	1.03×10^{-3}	$1.00 \nu^{0.48}$	-1.52	1.52	1.18
Sn-2.8Ag-15Bi-0.5Cu	2.68×10^2	3.73×10^{-3}	7.92×10^{-3}	$1.79 \nu^{0.71}$	-2.37	2.37	2.21