低温度における Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労寿命評価*

旭吉 雅健^{*1}

Creep-Fatigue Life Evaluation of Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge Solder at Low Temperatures

Noritake HIYOSHI^{*1}^{*1} Ishikawa National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Kitachujyo, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa, 929-0392 Japan

This paper describes creep-fatigue lives of Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge solder at low temperatures. Push-pull creep-fatigue tests under four types of strain wave form were carried out at 253K and 273K to study an application of creep-fatigue life evaluation method for Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge. There were effects of temperatures on stress amplitude, and tension stress amplitude at 253K was larger than that at 273K in fast-fast wave form test. The higher stress amplitude reduced the creep-fatigue lives. The creep-fatigue lives with slow strain rate were shorter than the creep-fatigue lives with fast strain rate. A linear damage rule and a strain range partitioning method estimated the creep-fatigue lives in a large scatter. A grain boundary sliding model was a suitable parameter for creep-fatigue life estimation for Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge.

Key Words : Creep, Low Cycle Fatigue, Life Prediction, Solder Alloy, Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge

1. 緒 言

電子機器のはんだ接合部では、電源のオン/オフに起因する繰返し負荷に伴う疲労損傷に加えて、一定温度での長時間使用時にはクリープ損傷を受ける。接合部に使用されるはんだの融点が、これまで一般的に使用されていた Sn-37Pb で 183℃、非鉛はんだ Sn-3.5Ag 系で約 220℃と鉄鋼材料に比べて著しく低いことや、はんだ接合部を有する製品は低温度環境下での使用も想定されることなどから、低温度での機械的性質や疲労寿命、クリープ疲労寿命について明らかにすることが重要である。しかし、これまでに報告^{(1)~(13)}されている疲労試験や、静クリープ試験、クリープ疲労試験のほとんどが 313K (40℃) 程度と、室温以上の実験結果に限られている。低温度での疲労試験やクリープ疲労試験は、その技術的な困難さから知見が十分に得られているとは言い難い。著者は、これまでに 253K および 273K での低サイクル疲労試験⁽¹⁴⁾を行い、Sn-37Pb では応力ひずみ関係に及ぼす試験温度の影響が著しいことや、Sn-3.5Ag の低温度での疲労寿命評価にはひずみエネルギーが有効であることなどを明らかにするとともに、はんだの寿命評価法の信頼性向上のためには、低温度での実験力学的検証も重要であることを述べてきた。

本研究では、Sn-3.5Ag 系に Ni, Ge を添加した Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge5 元はんだを対象として、低温度での引張・圧縮疲労試験およびクリープ疲労試験を行いデータの蓄積を図るとともに、クリープ疲労寿命評価について検討した。なお、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge に関する実験データの数⁽¹⁵⁾は乏しいので、まず、主要元素含有量が同程度であり、かつ材料に関する実験的知見が豊富である Sn-3.5Ag の実験データを基にして代表的なクリープ疲労寿命評価法の適用性を定性的に検討した。その後、本研究で得られた Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の実験データを用いて、低温度でのクリープ疲労寿命評価法の精度向上を試みた。

* 原稿受付 2011 年 8 月 13 日

^{*1} 正員, 石川工業高等専門学校 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)
E-mail: hiyoshi@ishikawa-nct.ac.jp

Table 1 Chemical composition and heat treatment of the material tested (wt%).

	Sn	Pb	Ag	Cu	Ni	Ge	Sb
Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge	Bal.	0.0473	3.553	0.5251	0.0698	0.0198	0.0048
	Zn	Fe	Bi	Al	As	Cd	
	0.0001	0.0045	0.0029	0.0003	0.0005	0.0001	

Heat treatment : 428K×1hr air cooling

Fig. 1 Shape and dimensions of the specimen (mm).

2. 実験方法

供試材は Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge であり、その化学成分および熱処理条件を表 1 に示す。同材は、Sn-3.5Ag-0.5Cu に Ni および Ge を添加した 5 元はんだであり、Ni を微量添加することにより耐熱疲労性の向上を図り、Ge を添加することによって Sn の酸化を防止してめれ性の向上を図ったものである。試験片は標点部直径 10mm、平行部長さ 20mm を有する中実丸棒試験片であり、その形状および寸法を図 1 に示す。はんだの延べ棒から直径 40mm、長さ約 200mm の円柱状インゴットを鋳造した後、機械加工により試験片を製作した。なお、鋳造方法の詳細や試験片形状寸法については、日本材料学会の試験法標準^{(16)~(18)}に従った。また、本稿で以下に述べる実験方法の詳細についても同標準に従っている。

試験装置には恒温槽を備えた引張・圧縮電気油圧サーボ疲労試験機を用いた。恒温槽は PID 制御によって所定の温度に設定し、試験中の槽内の試験片の温度変化は±0.1K 以内であった。試験温度は 273K (0℃) および 253K (−20℃) とした。伸びの計測には、標点間距離 10mm の伸び計を用いた。はんだは軟金属であり、伸び計の押し付け力によって試験片が変形したり、き裂が発生したりすることを避けるために、試験片の表面に塗布したエポキシ樹脂にくぼみを設け、そのくぼみに伸び計先端を軽く押し当てることにより変位を計測した。

4 種類の完全両振のひずみ波形を用いて引張・圧縮のクリープ疲労試験を実施した。そのひずみ波形は、fast-fast 波 (以下、PP 波)、fast-slow 波 (以下、PC 波)、slow-fast 波 (以下、CP 波) および slow-slow 波 (以下、CC 波) である。fast 部のひずみ速度は 0.1%/s、slow 部のひずみ速度は 0.005%/s であり、クリープ損傷はひずみ速度を下げることに付与した。破損寿命 N_f は、引張側応力振幅が寿命中期の 75% に低下した時の繰返し数とした^{(17),(18)}。

ひずみ範囲分割法を用いてクリープ疲労寿命評価を行う際、得られた 1 サイクル中のヒステリシスループのひずみ成分から、ひずみの PP 成分、PC 成分、CP 成分、CC 成分を分割して求める必要がある。ひずみ成分の分割を行うために、クリープ疲労試験の途中サイクルで Rapid Straining⁽¹⁸⁾を挿入することが必要になるが、今回は試験機の制約上、寿命の中期程度でクリープ疲労試験を一旦中断し、クリープ疲労試験と同一ひずみ範囲の PP 波を数サイクル挿入し、試験終了後に重ね合わせ法を用いることによって PC、CP、CC の各ひずみ成分を求めた。

3. 実験結果および考察

3・1 低温度における疲労寿命

図 2 に、PP 波の全ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon$) が 1.0% の $1/2N_f$ でのヒステリシスループを示す。比較のために、これまでに得られている Sn-3.5Ag および Sn-37Pb のヒステリシスループ⁽¹⁴⁾も示した。同図(a)は Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge、(b) および(c)はそれぞれ Sn-3.5Ag および Sn-37Pb の結果である。また、図中の実線および破線はそれぞれ 253K および 273K の結果である。3 種類のはんだともに、253K での応力振幅が 273K のそれよりも大きい値であった。

Fig. 2 Hysteresis loops in low cycle fatigue test at a half cycle of failure life.

Fig. 3 Correlation of low cycle fatigue lives with total strain range.

Fig. 4 Relationship between inelastic strain range and failure lives.

引張側応力振幅は、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の 253K で 40.7MPa、273K で 36.9MPa であった。Sn-3.5Ag の引張側応力振幅は、253K で 32.7MPa、273K で 28.6MPa であった。Sn-37Pb の引張側応力振幅は、253K で 50.2MPa、273K で 36.3MPa であった。すなわち、応力振幅は試験温度に依存し、3 種類のはんだの中では Sn-37Pb がもっとも顕著であった。

Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の PP 波での破損寿命を $\Delta\epsilon_t$ で整理した結果を図 3 に示す。図中には、Sn-3.5Ag および Sn-37Pb の結果⁽¹⁴⁾も併せてプロットした。同一ひずみ範囲における 253K と 273K の破損寿命を比較すると、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge は、低温度側である 253K の結果がやや短寿命となる結果であった。このように低温度側での結果が短寿命となる傾向はこれまでも Sn-3.5Ag や Sn-37Pb でも観察されており、はんだの応力振幅が温度に著しく依存する⁽¹⁴⁾ことが寿命低下の要因の一つであると考えられる。Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge と Sn-3.5Ag の破損寿命を比較すると、寿命中期において比較的大きな応力振幅値を示す Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge が短寿命側に整理される結果であった。一方、Sn-37Pb の 253K は Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge よりも大きな応力振幅値を示すものの、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge よりも長寿命側に整理される結果であった。これは、Sn-37Pb は Sn-Ag 系はんだに比べて延性が高いなどの特徴を有しているが、破損寿命は応力振幅のみならず、延性等のその他の性質も要因となることを示唆している。

Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の PP 波での破損寿命を非弾性ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon_{in}$) で整理した結果を図 4 に示す。図中の実線は 253K および 273K のすべての結果を最小二乗近似した直線であり、破線はその係数 2 の範囲を示している。Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge は、253K および 273K において試験温度にかかわらず Coffin-Manson 則が成立することがわかり、その関係は次式で表現される。

Fig. 5 Correlation of failure lives with total strain range.

Fig. 6 Relationship between strain rate and failure life.

$$\Delta\epsilon_{in} = 23.3 \times N_f^{-0.469} \quad (1)$$

近似直線の傾きは 0.469 であり、これまでに材料定数として得られている Sn-3.5Ag の 0.639⁽¹⁸⁾, Sn-37Pb の 0.60⁽¹⁴⁾ と比べるとやや小さな値であった。

3・2 低温度におけるクリープ疲労寿命

Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の 4 種類の波形での破損寿命を $\Delta\epsilon_t$ で整理した結果を図 5 に示す。 $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ で比較すると、PC 波の破損寿命は 253K で 605 サイクル、273K で 985 サイクルであり低温度側の結果が比較的短寿命であった。CC 波の破損寿命は 253K で 487 サイクル、273K で 684 サイクルであり PP 波や PC 波と同様に低温度側が比較的短寿命であった。一方、CP 波の破損寿命は 253K で 492 サイクル、273K で 267 サイクルであり他の 3 種類のひずみ波形とは異なる結果であった。

図 6 は 4 種類の波形の $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ での破損寿命を、PP 波を基準にして表した結果である。253K および 273K ともに PC 波、CP 波、CC 波は、同一ひずみ範囲で比較したときに、PP 波よりも短寿命となった。すなわち、253K では、PC 波で PP 波に対して 0.79 の寿命、CP 波で 0.64、CC 波で 0.63 であった。これは、253K のように室温以下いわゆる低温度環境であっても、低ひずみ速度によってクリープ損傷を受け、破損寿命が低下したものと考えられる。273K では、 $\Delta\epsilon_t=1.0\%$ における寿命比は、PC 波で 0.92、CP 波で 0.24、CC 波で 0.64 であった。

これまでの報告^{(7), (18)}では、Sn-3.5Ag や Sn-37Pb の 313K、353K でのクリープ疲労試験で、PC 波や CP 波のように引張側ひずみ速度と圧縮側ひずみ速度が異なる非対称ひずみ波形で破損寿命が著しく低下し、一方、CC 波のように対称ひずみ波形では寿命低下がほとんど見られないとされている。Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の 253K と 273K でも非対称ひずみ波形である PC 波、CP 波は PP 波に比べて破損寿命の低下がみられた。さらに、253K および 273K の CC 波では PP 波の約 0.6 の寿命比であり、低温度では Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge は対称ひずみ波形でも破損寿命が低下する傾向であった。このように、CC 波の結果が Sn-3.5Ag や Sn-37Pb とは異なる傾向を示したが、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の 253K および 273K での CC 波試験終了後の表面き裂は、PP 波でのそれと異なり、き裂が大きく開口していた。このことから、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge は、低温度では対称ひずみ波形であっても、負荷速度の違いによってき裂の伝ば挙動が異なり、破損寿命が低下した可能性が考えられる。き裂伝ば挙動に及ぼす負荷速度と試験温度の影響、およびそれらの材料依存性について、今後データの蓄積を図り詳細に検証する必要がある。

3・3 各種クリープ疲労寿命評価法による寿命予測

Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労寿命評価法の適用性について検討した。対象とした寿命評価法は、鉄鋼材料等のクリープ疲労寿命評価法として採用されることの多い線形累積損傷則とひずみ範囲分割法、さらに、Sn-3.5Ag や Sn-37Pb のクリープ疲労寿命評価への有効性が示されている粒界すべり損傷モデルの3つである。なお、それらの寿命評価法をクリープ疲労試験での破損寿命整理に適用するために、予め複数のひずみ範囲レベルでの疲労試験結果や、いくつかの応力レベルでの静クリープ破断試験を行い応力と破断時間との関係を把握しておく必要がある。しかし、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge については、本稿でのクリープ疲労試験データ以外にクリープ破断試験のデータが得られていない。そこで、まず、主要元素が同程度である Sn-3.5Ag の 313K での材料定数を用いてクリープ疲労寿命評価法の有効性を検証した。

① 線形累積損傷則 (Linear damage rule, 以下 LDR)

LDR は、ある 1 サイクル中の損傷を、疲労による損傷とクリープによる損傷とに分けて、それらの和である限界損傷量が 1 に至るときが破損寿命であるという考えに基づく寿命評価法である。LDR を用いると、疲労損傷 (ϕ_f) とクリープ損傷 (ϕ_c) は次式で表される。

$$\phi_f = \sum \frac{N}{N_f}, \quad \phi_c = \sum \frac{t}{t_r} \quad (2)$$

ここで N および N_f はそれぞれクリープ疲労試験での破損寿命および PP 波での破損寿命である。Sn-3.5Ag の PP 波での N_f と $\Delta\epsilon_m$ との間には、

$$\Delta\epsilon_m = 2.067 \times 10^{-2} N_f^{-0.639} \quad (3)$$

が成り立つことが報告されている⁽¹¹⁾。また、式(2)中の t および t_r はそれぞれ、クリープ疲労試験中の任意の応力が生じている時間およびその応力での静クリープ破断時間である。Sn-3.5Ag の静クリープ破断時間については、

$$\sigma = 2.400 \times 10^1 t_r^{-0.0905} \quad (4)$$

である^{(10),(12)}。なお、クリープ疲労試験では引張負荷時および圧縮負荷時の両方にクリープ損傷を受けると考えられるが、圧縮側のクリープ損傷も引張側のそれと同様に生じるものと仮定した。なお、Sn-3.5Ag の結果を基にして計算するために、厳密な意味での Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の損傷量とは異なるが、ここでは、3 種類のひずみ波形での損傷の程度を相対的に比較検討することを目的とした。

LDR を用いて Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の疲労損傷およびクリープ損傷を求めた結果を図 7 に示す。図中の実線は限界損傷量を 1 としたものである。 ϕ_f は 253K, 273K において試験温度にかかわらず、すべての試験で 0.1 程度であった。一方、 ϕ_c は 0.03 から 3.6 までと大きくばらつく結果であった。また、PC 波と CP 波とを比較すると、PC 波の ϕ_c は、0.1 から 0.4 であり、CP 波のそれは 0.9 から 3.6 であった。前述のように CP 波の寿命比が PC 波のそれよりも小さいが、その要因として、CP 波のように引張負荷時の負荷速度が低いと、より大きなクリープ損傷を受けていることが推測される。式(2)~(4)を用いて Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の 253K および 273K のクリープ疲労試験での破損寿命を予測した結果を図 8 に示す。試験温度にかかわらず、すべての結果を過大に安全側に予測する結果であり、PC 波で安全側に係数 200 の範囲、CC 波で係数 80 の範囲、CP 波では係数 1000 の範囲を超えた。CP 波が係数 1000 を超える過大評価となったのは、CP 波でのクリープ損傷のみで限界損傷量が 1 を超えており、予測寿命が 1 サイクルとなるためである。

② ひずみ範囲分割法 (Strain range partitioning method, 以下 SRP)

SRP を用いるにあたっては、まず PP 波、PC 波、CP 波、CC 波の各ひずみ成分と破損寿命との関係を求めておく必要がある。報告⁽¹³⁾から、313K での Sn-3.5Ag に対する次式(5)の関係をを用いた。

Fig. 7 Creep-fatigue damage diagram by LDR.

Fig. 8 Failure life evaluation by LDR

Fig. 9 Failure life evaluation by SRP.

$$\Delta \varepsilon_{pp} = 1.694 \times 10^2 N_{pp}^{-0.569}$$

$$\Delta \varepsilon_{pc} = 7.122 \times 10^1 N_{pc}^{-0.634}$$

$$\Delta \varepsilon_{cp} = 1.631 \times 10^2 N_{cp}^{-0.807}$$

$$\Delta \varepsilon_{cc} = 1.057 \times 10^3 N_{cc}^{-0.806}$$

(5)

それぞれのひずみ成分と破損寿命との関係から、次式(6)を用いて寿命評価を行った。

$$\frac{1}{N_{fpre}} = \frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{pc}} + \frac{1}{N_{cp}} + \frac{1}{N_{cc}}$$

(6)

式(5)および(6)を用いて Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労試験での破損寿命を予測した結果を図 9 に示す。試験温度およびひずみ波形にかかわらず、すべてのクリープ疲労試験での破損寿命を危険側に予測する結果であ

Fig. 10 Relationship between failure life ratio and strain rate ratio in PC/CP test.

Fig. 11 Relationship between failure life ratio and strain rate in CC test.

Fig. 12 Failure life evaluation by GBSM.

った。PP波およびPC波で係数17の範囲、CP波で係数4の範囲、CC波では係数22の範囲にばらつく結果であった。

③ 粒界すべり損傷モデル (Grain boundary sliding model, 以下 GBSM⁽¹⁸⁾)

GBSMは、PC波、CP波、CC波のように遅いひずみ速度の波形を含む試験で生じる粒界のすべりに着目したモデルであり、粒界のすべり量が限界に達したときに破損に至ると考える。これまでに、Sn-3.5AgやSn-37Pbのクリープ疲労寿命評価にはGBSMに基づくクリープ疲労寿命則が有効であることがわかっている⁽¹⁸⁾。また、LDRやSRP等を用いる際には、引張試験や静クリープ試験等複数の実験から材料定数を決定する必要がある一方で、GBSMは、クリープ疲労試験結果のみから材料定数を決定できる。GBSMに基づくクリープ疲労寿命則では、1サイクルあたりの損傷量 $1/N_f$ と、PC波、CP波、CC波およびひずみ保持波形であるTH波をそれぞれ単独で負荷したときの1サイクルあたりの損傷量 $1/N_{PC}$ 、 $1/N_{CP}$ 、 $1/N_{CC}$ 、 $1/N_{TH}$ との間に次式(7)が成り立つ⁽¹⁸⁾。

$$\frac{1}{N_{fpre}} = \frac{1}{N_{PC}} + \frac{1}{N_{CP}} + \frac{1}{N_{CC}} + \frac{1}{N_{TH}} \quad (7)$$

Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労試験結果から、クリープ疲労寿命則の材料定数を決定した。まず、非対称ひずみ波形の PC 波および CP 波について、引張側ひずみ速度と圧縮側ひずみ速度の比と、寿命比との関係を図 10 に示す。ここで、 $\dot{\epsilon}_p$ および $\dot{\epsilon}_c$ はそれぞれ、非対称ひずみ波形の fast 部および slow 部でのひずみ速度である。PC 波、CP 波ともにひずみ速度比が大きくなるにつれて寿命比が小さくなることがわかるが、前述したように、寿命比の低下の程度は PC 波よりも CP 波が大きい結果であった。非対称ひずみ波形でのひずみ速度比と寿命比との関係は、次式(8)および(9)で表すことができる。

$$\text{PC 波 ; } \frac{N_{\text{PC}}}{N_{\text{PP}}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_c} \right)^{-0.054} \quad (8)$$

$$\text{CP 波 ; } \frac{N_{\text{CP}}}{N_{\text{PP}}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_c} \right)^{-0.306} \quad (9)$$

次に、対称ひずみ波形の PP 波および CC 波について、ひずみ速度と寿命比との関係を図 11 に示す。ひずみ速度が低下すると寿命比が小さくなることがわかる。対称ひずみ波形でのひずみ速度と寿命比との関係は、次式(10)で表すことができる。

$$\text{CC 波 ; } \frac{N_{\text{CC}}}{N_{\text{PP}}} = 1.416 \times \dot{\epsilon}_c^{0.151} \quad (10)$$

式(1)で求めた N_f と $\Delta \epsilon_{\text{in}}$ の関係と式(7)～(10)から、GBSM に基づく Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労寿命則が次式(11)として得られる。なお、TH 波でのひずみ保持時間と寿命比との関係を求める必要があるが、TH 波の試験は行っていないために寿命比を 1 と仮定して計算した。

$$\Delta \epsilon_{\text{in}} = 23.3 \left\{ N_f \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_c} \right)^{0.054} + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_c} \right)^{0.306} + 0.706 \dot{\epsilon}_c^{-0.151} + 1 \right] \right\}^{-0.469} \quad (11)$$

式(11)を用いたクリープ疲労試験の破損寿命の予測結果を図 12 に示す。253K は、PC 波と CP 波の低ひずみ範囲試験を係数 3 の範囲で安全側に過大予測する結果であった。273K も 253K と同様に、危険側に予測することはなかったものの、PC 波と CC 波を安全側に過大予測する結果であり、そのばらつきは係数 5 の範囲であった。以上のことから、Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労寿命評価には GBSM に基づくクリープ寿命則を適用することが有効であることがわかる。

$\Delta \epsilon = 1.0\%$ の試験終了後の表面き裂観察結果を図 13 に示す。ただし、253K の PC 波および 273K の PP 波は試験終了後に試験片が破断したために、それぞれ $\Delta \epsilon = 0.7\%$ および $\Delta \epsilon = 1.5\%$ の結果を示した。すべての試験で、試験片周方向に 5mm を超える巨視き裂が観察された。また、CP 波および CC 波のように低い負荷速度を含むひずみ波形では、他のひずみ波形での結果と異なりき裂が開口していた。非対称ひずみ波形のうち、表面き裂が開口していた CP 波は PC 波より短寿命であったこと、および、対称ひずみ波形である CC 波においても PP 波に比べて破損寿命が低下したことから、引張負荷時の負荷速度が低いひずみ波形の場合に、き裂の伝ば挙動が PP 波のそれとは異なり、破損寿命の低下につながったと考えられる。

試験開始前にはバフ研磨を施しており金属光沢も見られていたが、試験終了後の表面には、多数の凹凸が観察された。クリープ疲労試験中に粒界がすべるなどして剛性が低下し、破損に至ったと思われるが、その表面の凹凸の程度は PC 波および CP 波が、PP 波や CC 波に比べて顕著に見られる。すなわち、非対称ひずみ波形では対称ひずみ波形に比べて粒界すべりが起きやすいことを示唆しており、GBSM がクリープ試験での破損寿命評価に

Fig. 13 Surface crack observations after tests.

有効であることを裏づけている。

4. 結 言

253K, 273K で Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge の疲労試験およびクリープ疲労試験を行い，クリープ疲労寿命評価法の適用性について検討した。

1. Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge は試験温度の低下に伴って応力振幅が増加した。1/2 N_f における応力振幅は 253K で 40.7MPa, 273K で 36.9MPa であった。
2. PP 波の破損寿命は，同一ひずみ範囲で比較したときに 253K が 273K よりも短寿命であった。253K では 273K よりも応力振幅が大きくなることが短寿命となる要因の一つであると考えられる。
3. CP 波の 273K は PP 波に比べて著しく短寿命であり，同一ひずみ範囲の PP 波の 0.24 であった。線形累積損傷則から疲労損傷量，クリープ損傷量を求めた結果，CP 波では他のひずみ波形に比べてクリープ損傷量が多いことが示唆された。
4. Sn-3.5Ag-0.5Cu-Ni-Ge のクリープ疲労寿命評価には GBSM に基づくクリープ疲労寿命則が有効であった。GBSM は，253K および 273K の破損寿命をそれぞれ安全側に係数 3 の範囲および係数 5 の範囲で予測する結果であった。

文 献

- (1) 吉岡純夫，谷周一，熊沢道夫，井上彰夫，“はんだ材料 (36Pb62Sn2Ag) の低温下での低サイクル疲労特性”，材料，Vol. 39, No. 442 (1990), pp. 908-913.
- (2) 種田元治，奥康浩，河野俊一，上西研，“はんだのねじり疲労寿命に及ぼす繰返し速度の影響”，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 58, No. 546 (1992), pp. 166-171.
- (3) 種田元治，奥康浩，上西研，“ひずみ範囲分割法によるはんだの疲労寿命評価法”，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 58, No. 549 (1992), pp. 669-675.

- (4) 山本隆栄, 坂根政男, 大南正瑛, 山田毅, “63Sn-37Pb はんだの多軸低サイクル疲労”, 材料, Vol. 44, No. 503 (1995), pp. 1080-1085.
 - (5) 山本隆栄, 坂根政男, 大南正瑛, 塚田裕, 西村秀夫, “63Sn-37Pb はんだの高温多軸クリープ疲労”, 材料, Vol. 46, No. 8 (1997), pp. 969-975.
 - (6) 山本隆栄, 坂根政男, 大南正瑛, 山下満男, 塩川国夫, “5 種類のはんだの多軸低サイクル疲労”, 材料, Vol. 46, No. 12 (1997), pp. 1381-1388.
 - (7) 白土剛, 坂根政男, 塚田裕, 西村秀夫, “63Sn-37Pb 共晶はんだの引張圧縮クリープ疲労寿命評価法”, 日本材料学会第 37 回高温強度シンポジウム, (1999), pp.116-120.
 - (8) 山田晴彦, 猿木勝司, 小川一義, “共晶はんだ 63-37Pb の疲労寿命に及ぼす温度, 繰返し速度, ひずみ保持の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66, No. 647 (2000), pp. 1350-1354.
 - (9) 高田昶男, 坂根政男, 大南正瑛, 塚田裕, 西村秀夫, “63Sn-37Pb はんだのクリープ変形およびクリープ破断特性の定式化”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66, No. 643 (2000), pp.589-594.
 - (10) 高田昶男, 坂根政男, 塚田裕, 西村秀夫, “Sn-3.5Ag はんだのクリープおよびクリープ破断特性”, 日本材料学会第 38 回高温強度シンポジウム, (2000), pp. 116-120.
 - (11) The Society of Materials Science, Japan, *Factual Database on Tensile and Low Cycle Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders* (2001), The Society of Materials Science, Japan.
 - (12) The Society of Materials Science, Japan, *Factual Database on Creep and Creep-Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders* (2004), The Society of Materials Science, Japan.
 - (13) M. Nozaki, M. Sakane, Y. Tsukada and H. Nishimura, “Creep-fatigue life evaluation for Sn-3.5Ag Solder”, *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 128, No. 2 (2006), pp. 142-150.
 - (14) 旭吉雅健, 加藤昭久, 坂根政男, 塚田裕, “Sn-37Pb および Sn-3.5Ag の低温度における低サイクル疲労寿命”, 材料, Vol. 58, No. 2 (2009), pp. 155-161.
 - (15) 長野恵, 日高昇, 渡辺裕彦, 下田将義, 小野眞裕, “Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだのクリープ特性における微量添加元素の影響”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 9, No.3 (2006), pp. 171-179.
 - (16) 日本材料学会, はんだの引張試験法標準 (2000), 日本材料学会.
 - (17) 日本材料学会, はんだの低サイクル疲労試験法標準 (2000), 日本材料学会.
 - (18) 日本材料学会, はんだのクリープ疲労試験法標準 (2004), 日本材料学会.
-