共晶はんだ 63 Sn-37 Pb の疲労寿命に及ぼす 温度、繰返し速度、ひずみ保持の影響*

山田 春彦^{*1}, 猿木 勝司^{*2}, 小川 一 義^{*3}

Influence of Test Temperature, Strain Frequency and Strain Hold on Fatigue Life of Eutectic Solder 63 Sn-37 Pb

Haruhiko YAMADA, Katsushi SARUKI^{*4} and Kazuyoshi OGAWA

^{*4} Meijo University, Faculty of Science and Technology,
1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya, Aichi, 468-8502 Japan

The torsional fatigue tests of bulk 63 Sn-37Pb solder were carried out under the condition of test temperature 233-393 K, strain frequency 0.5-0.005 Hz and strain hold time 0-99 sec. The followings were shown from the results of the tests in which the test temperature and the strain frequency were varied. The fatigue life was determined only by the inelastic strain range of the stress-strain loop, not influenced by the test temperature and strain frequency. Coffin-Manson law held good in the relationship between the fatigue life and the inelastic strain range. While, in the case of the test in which the strain hold was added, the fatigue life correlated to the inelastic strain range, decreased by the strain hold in the case that the ramp (strain change slope) time was short. In the case that ramp time was long, however, it did not decrease and the Coffin-Manson relation was similar to that of non hold. In this case, the data were able to be put in good order by assumption that linear damage law held good on the ramp damage and the hold damage respectively.

Key Words: Low Cycle Fatigue, Torsion, Life Prediction, Solder, Temperature, Cyclic Speed, Strain Hold, Coffin-Manson Law

1. 緒 言

電子部品の信頼性を保証する上で、はんだ接合部の熱疲労破壊は重要な問題である。なかでも自動車用の電子部品は、過酷な温度環境で使用されるため、熱疲労破壊防止に関して十分な配慮が必要である。そのためはんだの疲労寿命に関して、近年多くの研究が行われている。このうち、はんだの基本的疲労特性を解明することを目的に行われているのが、はんだバルク材を用いた低サイクル疲労の研究である。

はんだの疲労寿命に影響する因子としては、一般に温度、繰返し速度、ひずみ保持が重要であると考えられる。いままでのところ、これらのことについて検討した報告はいくつかはあるが、例えば温度についてみても、強度にその影響はほとんどないとするもの^{(1)~(4)}と高温になると強度が低下するというもの⁽⁵⁾⁽⁶⁾があり、まだ十分明白になっているとは言えない。ひずみの繰返し速度についてもその影響の有無に関する報

告⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾結果は相異なるものも多く、組織粗大化との関係も明確にされていない。また、ひずみ保持の影響についても、報告例⁽⁴⁾⁽⁸⁾自体が少なく、まだ不明な点が多い。

そこで本研究では、はんだ接合部の冷熱サイクル下での強度評価法を検討するための第一歩として、共晶はんだバルク材の基本的な低サイクル疲労特性を把握することを目的として、引張側と圧縮側を対称とする負荷波形のもとで、はんだの疲労寿命に及ぼす温度、繰返し速度、ひずみ保持の影響を系統的に調べることにした。

2. 実 験 方 法

2・1 試験片 供試材は 63%Sn-37%Pb の共晶はんだで、この組成の棒はんだを黒鉛るつぼに入れ、503±3 K で大気中溶解したのち、室温の金型 (13 mm × 13 mm × 65 mm) に鑄込んで角棒試料を作り、そこから機械加工により図 1 に示す中空円筒形のねじり試験片 (外径 6 mm, 内径 3 mm, 全長 60 mm, 平行部長さ 16 mm) を作製した。そのあと加工の影響を除去するためと組織の安定化を図るため、室温で 1 箇月以上放置したのち試験に供した。なお、試験片表面は試験前にバフ研磨した。図 2 には試験部の顕微鏡組織を示

* 原稿受付 1999 年 8 月 19 日。

^{*1} (株)豊田中央研究所 (☎ 470-0114 愛知県愛知郡長久手町)。

^{*2} 正員, 名城大学理工学部 (☎ 468-8502 名古屋市天白区塩釜口)。

^{*3} 正員, (株)豊田中央研究所。

E-mail: saruki@meijo-u.ac.jp

した。細かく粒状に分布している灰色の部分が Pb-rich 相、地の白色の部分が Sn-rich 相である。

2・2 試験方法 試験には恒温槽付きのモータ駆動式疲労試験機(最大トルク: $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$)を用いた。試験は軸荷重を零に制御しながら、一定のねじり角振幅を完全両振り(三角波、台形波)で負荷する方式で行った。ひずみ波形の模式図を図 3 に示す。温度の影響は、繰返し速度を 0.5 Hz 一定とし、 $233\sim 393 \text{ K}$ の範囲で調べた。また繰返し速度の影響は、温度を 393 K 一定とし、 $0.5\sim 0.005 \text{ Hz}$ の範囲で調べた。これらの試験はいずれも図 3(a) に示すように、ひずみ保持なしの条件で行った。一方ひずみ保持の影響は、温度を 393 K 一定とし、図 3(b) に示すように、ひずみ変化

Fig. 1 Specimen

Fig. 2 Microstructure of solder tested

Fig. 3 Strain waves used at fatigue test

に要する時間(以後ランプ時間と称する)とひずみ保持の時間をそれぞれ $1\sim 50$ 秒、 $9\sim 99$ 秒の範囲で変化させて調べた。

試験片に作用するせん断ひずみは、ひずみゲージを貼付した試験片により求めたひずみとねじり角の関係を使って、試験時のねじり角から算出した。なお、試験片の疲労寿命は、せん断応力振幅が繰返し初期の値から 30% 低下したときのサイクル数で定義した。

3. 実験結果および考察

3・1 温度の影響 温度を 393 K 、 298 K 、 233 K の三段階に変化させた場合の、せん断応力-せん断ひずみループの一例を図 4 に、疲労試験結果を黒丸印、白三角印、白四角印で図 5 に示す。試験結果は、図 4 に見られるせん断応力が零のときのせん断ひずみのループ幅、すなわち非弾性せん断ひずみ振幅と、2 章で定義した疲労寿命の関係で整理して示してある。なお、図 5 には 3・2 節で述べる繰返し速度を変化させた

Fig. 4 Stress-strain loops in case of various temperature

Fig. 5 Relation between inelastic strain range and number of cycles to failure

場合の疲労試験結果もあわせ示してある。

応力とひずみの挙動は、図4に見られるように温度によって変化し、温度が高くなるにつれて同じ非弾性ひずみ振幅でも応力振幅は小さくなるが、図5中の黒丸印、白三角印、白四角印の実験点からわかるように、非弾性ひずみ振幅と疲労寿命の関係には温度の影響はほとんど認められず、Coffin-Manson 形の関係が成立している。

破壊の状況は、疲労のごく初期(疲労寿命の5%程度)には微小な割れが、Sn-rich 相内や Sn-rich 相と Pb-rich 相の界面に見られたが、マクロなき裂として内部へ進展した状態では、いずれの温度においても Sn-rich 相と Pb-rich 相を同じように貫通していた。この場合のき裂の状況の一例を図6に示す。

また、いずれの温度においても、き裂周辺部で組織の粗大化は起きていなかった。

以上のことから、今回の試験条件では、破壊形態や組織状態に温度による差はほとんどないと考えられる。

3.2 繰返し速度の影響 次に、繰返し速度を、0.5, 0.05, 0.005 Hz の三段階に変化させた場合のせん断応力-せん断ひずみループの一例を図7に示す。

Fig. 6 Crack propagating through Sn-rich structure and Pb-rich structure

Fig. 7 Stress-strain loops in case of various strain frequency

また、この場合の疲労試験結果は黒丸印、黒三角印、黒四角印で、前出の図5中にあわせて示した。図7からもわかるように、これらの実験点は3.1節で示した関係とほぼ同じになっている。繰返し速度を変えれば、図7に見られるように、応力とひずみの挙動は変化し、繰返し速度が遅くなるにつれて、同じ非弾性ひずみ振幅でも応力振幅は小さくなるが、非弾性ひずみ振幅との関係で求めた疲労寿命には、繰返し速度の影響は現れてこないことがわかる。したがって、この場合も3.1節と同様の Coffin-Manson 形の関係が成立しており、これらを一括して表すと、

$$\Delta\gamma_i \cdot N_p^{0.484} = 0.759 \dots \dots \dots (1)$$

となる。

しかし、マイクロ組織は 0.05, 0.005 Hz と繰返し速度が遅くなるにつれて、粗大化の進む傾向が認められた。図8に一例として、0.005 Hz の組織を示したが、図6に比べかなりの組織粗大化が起こっていることと同時に、き裂が Sn-rich 相と Pb-rich 相の界面を通りやすくなっていることがうかがえる。冷熱サイクル試験におけるはんだ接合部の劣化過程の特徴として、き裂周辺部での組織の粗大化および Sn-rich 相と Pb-rich の界面でのき裂進展が報告されている⁽⁷⁾⁽⁹⁾が、このことと今回見られた現象とは一致している。

なお、き裂が界面を通る傾向が見られたのは、他の部分に比べ界面のき裂進展に対する抵抗が小さくなっているためと考えられるが、この場合も含め図5の関係が成り立っているため、その抵抗の違いはあまり大きなものではないと推察される。

組織粗大化については定量化して以下に検討を加えることとした。定量化には Pb-rich 相1個の平均面積を求めた。測定には1000倍(0.005 Hz の場合のみ400倍)で撮影した SEM 写真を用い、しきい値を 0.3 μm^2 としてそれ以上の大きさのものについて平均値を求めた。解析の結果を図9に示す。図9には比較のために同じ試験片を 393 K で 736 時間放置したものの

Fig. 8 Crack propagating along the boundary of Sn-rich structure and Pb-rich structure

結果についても示した。図 9 には、0.5 Hz で試験したものと、試験前のものとの間に Pb-rich 相の平均面積に違いがなく、3・1 節でのべたことが示されている。また、0.005 Hz で 191 時間試験したものは、Pb-rich 相の平均面積が約 5 倍にもなっている。ひずみをかけずに同じ温度で放置したものと比べると、393 K にさらされていた時間は短い、粗大化は 2 倍以上に進んでいることがわかる。このことから、組織の粗大化には、温度と時間だけでなく、ひずみの繰返し効果が大きいと考えられる。

3.3 ひずみ保持の影響 次に、ランプ時間を 1 s とし保持時間を 0 s, 9 s, 49 s, 99 s とした場合と、ランプ時間 50 s, 保持時間 50 s とした場合について比較する。ランプ時間、ひずみ保持時間の違いによるヒステリシスループの違いは図 10 のようである。ランプ時間が 1 s と短い場合は、ひずみ変化の過程で応力は急激に立上がり、その後数秒のひずみ保持で応力は急激に緩和する。もちろんひずみ保持がない場合には応力緩和は起こらない。一方ランプ時間が 50 s と長い

Fig. 9 Grain gross by strain and temperature

Fig. 10 Stress-strain loops in case of strain hold and non hold

場合には、ひずみ変化の過程でクリープ的挙動を示すために応力の上昇は小さく、その応力はひずみ保持の過程で比較的緩やかに緩和していく。ひずみ保持がある場合の非弾性ひずみ範囲も保持がない場合と同様、せん断応力が零のときのループの幅から求めた。

図 11 には、ひずみ保持がある場合の疲労試験結果を示す。ここで保持時間 0 s のデータは、3・1 節で述べた繰返し速度 0.5 Hz のデータに相当するものであるが、ここではロットが異なるため新たにデータを求め黒丸印で示した。図 11 からわかるように、この場合は全データが一つの関係で示されるということにはならず、ランプ時間が 1 s と短い場合は、ひずみ保持時間が 9 s (白丸印)、49 s (白三角印) と長くなるにつれて疲労寿命は短くなり、49 s では半減した。しかし、さらにそれ以上に保持時間を長くして 99 s (白三角印) としても寿命は変化しなかった。一方ランプ時間が 50 s と長い場合には、50 s のひずみ保持を与えても疲労寿命は白逆三角印で示したように低下せず、ひずみ保持がない場合と同じ寿命を示した。このようにひずみ保持による寿命低下がランプ時間の短い場合に起こることから、この寿命低下はひずみ保持中に起こる急激な応力緩和と関連している可能性があると思われるが、そのメカニズムについてはさらに今後の検討が必要である。また、保持時間を長くしても疲労寿命が変化しないのは、ひずみ保持中の応力緩和が最初の数秒でほぼ飽和してしまうためと考えられる。

いま非弾性ひずみを、図 12 (a) に示すようにランプ過程の非弾性ひずみ分 $\Delta\gamma_1$ と応力緩和過程の非弾性ひずみ分 $\Delta\gamma_2$ に分けて整理してみる。

まず、 $\Delta\gamma_1$ と $\Delta\gamma_2$ の分離は、ひずみ保持がある場合とない場合のヒステリシスループを重ね合わせるにより行った。

Fig. 11 Relation between inelastic strain range and number of cycles to failure in case of strain hold

Fig. 12 Adjustment by linear damage law

ついで、このようにして求めた $\Delta\gamma_1$ と $\Delta\gamma_2$ は、それぞれ独立に疲労寿命 N_f に影響を及ぼし、それらの線形損傷和によって疲労寿命が決まるとし、次式を仮定する。

$$1/N_f = (1/N_1) + (1/N_2) \quad (2)$$

ここで、 N_1 は $\Delta\gamma_1$ だけを受けた場合の寿命、 N_2 は $\Delta\gamma_2$ だけを受けた場合の寿命を表す。 $\Delta\gamma_1$ と N_1 の関係は、図 11 のひずみ保持がない場合の疲労試験結果を近似して次式のように表される。

$$\Delta\gamma_1 \cdot N_1^{0.469} = 0.712 \quad (3)$$

各疲労試験における N_f , $\Delta\gamma_1$ の値と式 (2), (3) から N_2 を求めることができる。このようにして求めたランプ時間 1 s の場合の N_2 を $\Delta\gamma_2$ に対してプロットしたのが図 12 (b) である。図 12 (b) には参考のため、式 (3) で表される $\Delta\gamma_1$ と N_1 の関係もプロットしてある。 $\Delta\gamma_2$ と N_2 の関係はランプ時間および保持時間によらずほぼ一つの関係線上にのる。また、 $\Delta\gamma_1$ と N_1 の関係に比べて $\Delta\gamma_2$ と N_2 の関係はかなり低寿命側に位置しており、 $\Delta\gamma_2$ が疲労寿命に対して悪影響を及ぼしていることがわかる。図 12 (b) から $\Delta\gamma_2$ と N_2 の関係を近似して次式が得られる。

$$\Delta\gamma_2 \cdot N_2^{0.244} = 0.179 \quad (4)$$

以上のことから、各疲労試験における $\Delta\gamma_1$, $\Delta\gamma_2$ の値を使って式 (3), (4) で N_1 , N_2 を求め、それを式 (2) に代入すると N_f が予測できることとなる。

4. ま と め

温度、繰返し速度およびひずみ保持の条件を変えて行った今回の共晶はんだのねじり疲労試験の結果より、次のことが明らかとなった。

(1) 共晶はんだの疲労寿命と非弾性ひずみ範囲との間には、Coffin-Manson 則が成り立っている。またこの関係の上に、温度、繰返し速度の影響は認められなかった。

(2) 温度が 393 K と高温で、繰返し速度が 0.005 Hz と極度に遅い場合には、組織の粗大化が認められ、き裂も Pb-rich 相と Sn-rich 相の界面を通る傾向が強くなった。

(3) 疲労寿命に及ぼすひずみ保持の影響はランプ時間に依存し、ランプ時間が短い場合はひずみ保持によって疲労寿命は低下したが、ランプ時間が長い場合にはひずみ保持の影響は認められなかった。またランプ時間が短い場合でも、ひずみ保持中の応力緩和が飽和する以上の時間域では、保持時間の影響はなかった。

(4) ひずみ保持がある場合は、ランプ過程の非弾性ひずみによる損傷度合と応力緩和過程の非弾性ひずみによる損傷度合が同じではないので、それぞれを分離して別個に求めた後、それらを単純に加算する考え方によって、ランプ時間 1 s のときの寿命予測が可能となった。

文 献

- (1) 宮崎政行・吉岡純夫・土方明躬, 材料, **30**-331(1980), 330-335.
- (2) Vaynman, S., *IEEE Transactions on Components, Hybrid, and Manufacturing Technology*, **13**-4(1990), 909-913.
- (3) 上貝康己・ほか 4 名, 第 21 回疲労シンポジウム講演論文集, (1992-11), 39-42.
- (4) Cutiongco, E. C. and Jeannotte, D. A., *Morris E. Fine Symposium*, (1991), 435-444.
- (5) 北野誠・ほか 2 名, マイクロ接合研究委員会資料, MJ-46-85(1985), 15.
- (6) Frear, D., ほか 4 名, *Symposium on Effects of Load and Thermal Histories on Mechanical Behavior of Materials*, (1987), 113-126.
- (7) 種田元治・ほか 3 名, 機論, **58**-546, A(1992), 166-171.
- (8) Vaynman, S., ほか 2 名, *Met. Trans., A*, **19**-4(1988), 1051-1059.
- (9) 中村充男・河合健一, 機講論, No. 900-86(1990-11), 260-262.