

613 はんだ接合材のクリープ破断およびクリープ疲労寿命評価

北海道大学 ○佐藤 俊 北海道大学 佐々木 克彦
 コベルコ科研 宮垣 亜希 日立製作所 寺崎 健
 立命館大学 坂根 政男

Analysis of Creep Rupture and Creep-Fatigue Life of Solder Joints

Shun SATO, Katsuhiko SASAKI, Aki MIYAGAKI, Takeshi TERASAKI, and Masao SAKANE

1. 緒 言

日本材料学会高温強度部門はんだワーキンググループでは、鉛はんだ (Sn-37Pb) と鉛フリーはんだ (Sn-3.5Ag) の引張強度、クリープ破断強度、低サイクル疲労強度、クリープ疲労強度に関わる試験法および評価法の標準化を進め、同時にはんだバルク材によるそれらの実験データを蓄積してきた。本報では、実際の電子実装基板の接合状態を想定したはんだ接合材によるクリープ破断およびクリープ疲労評価法に関する検討を行った。すなわち、接合材に対するクリープ破断試験およびクリープ疲労試験を模擬した有限要素法による解析を行い、接合部の応力分布、ひずみ分布を導出した。導出した接合部の応力あるいはひずみを用いた線形累積損傷則と、バルク材のクリープ破断線図とクリープ疲労線図から、はんだ接合材のクリープ破断とクリープ疲労寿命評価を試みた。

2. 負荷条件および解析方法

接合材に対する負荷条件を Table 1 および Table 2 に示す。Table 1 はクリープ破断における負荷条件であり、Table 2 はクリープ疲労試験での負荷条件である。クリープ疲労試験において、PP 波および CC 波でのひずみ速度はそれぞれ 0.1%/s および 0.005%/s である。PC 波は引張方向のひずみ速度が 0.1%/s で圧縮方向のひずみ速度が 0.005%/s の引張、圧縮完全両振り非対称三角波形であり、CP 波は PC 波と逆の負荷波形である。また、TH 波は PP 波の引張側の最大ひずみ時に 5

分間のひずみ保持を挿入した波形である。

解析には、汎用有限要素解析ソフト「ABAQUS ver. 6.5.3」を用いた。クリープ変形解析には Norton 則 ($\dot{\epsilon}_c = C\sigma^n$) を用いた。Norton 則の材料定数 C および n は、静的クリープ破断解析には、バルク材の静的クリープ試験結果⁽¹⁾に基づき定めた値を用い、また、クリープ疲労寿命解析には、バルク材の TH 波から得られる応力緩和曲線に基づいて定めた値を用いた。塑性変形解析は二直線近似の移動硬化則を用い、このときの材料定数はバルク材での TH 波の実験結果に合うように定めた。

Fig. 1 にクリープ疲労に用いる材料定数を決定した際の FEM 解析の一例を示す。同図中の実線が FEM 解析結果であり、○印がバルク材を用いた TH 波の実験結果である。解析は、初期の引張り負荷→最大ひずみ (0.6%) でのひずみ保持 5 分→除荷→最小ひずみ (-0.6%) までの圧縮負荷→除荷→最大ひずみ (0.6%) までの引張り負荷の順で 1.5 サイクル行った。二直線近似移動硬化則を用いているため、弾性変形から塑性変形への遷移領域部分に解析結果と実験結果に若干の差が見られるが、遷移部以外の塑性変形部分や最大引張りひずみ保持時の応力緩和状態を良く表せている。

Fig. 2 にはんだ接合材の有限要素モデルを示す。接合材は 1mm 厚さの接合部を持つ直径 10mm の中実丸棒である。有限要素解析はその上半分に対して軸対称問題として行った。なお、Fig. 2 中の A, B, C は後述する低サイクル疲労寿命評価に用いる評価点である。

Table 1 Loading condition in creep rupture tests.

Sn-37Pb		Sn-3.5Ag	
Temp. T (K)	Stress σ (MPa)	Temp. T (K)	Stress σ (MPa)
313	22	313	35
	18		33
	15		31
	12		29
353	12	353	25
	10		24
	7		20
	5		19
398	10	398	15
	7		13
	5		11
	4		9.5

Table 2 Loading condition in creep fatigue tests.

Temp. T (K)	Wave form	Strain rate $\dot{\epsilon}$, %/s		Hold time t_H (s)	Strain range $\Delta\epsilon$ (%)
		Tension	Compression		
313	PP	0.1	0.1	0	0.2
					0.1
	CC	0.005	0.005	0	0.2
					0.1
	PC	0.1	0.005	0	0.2
					0.1
	CP	0.005	0.1	0	0.2
					0.1
	TH	0.1	0.1	5	0.2
					0.1

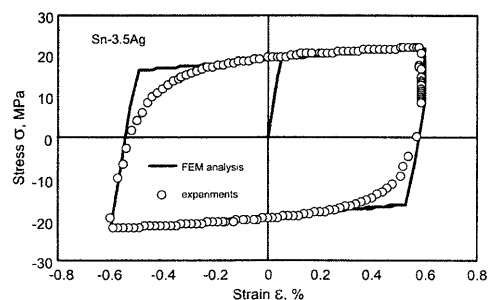


Fig. 1 Hysteresis loop in creep fatigue loading of both FEM analysis and experimental result at 313K (Sn-3.5Ag).

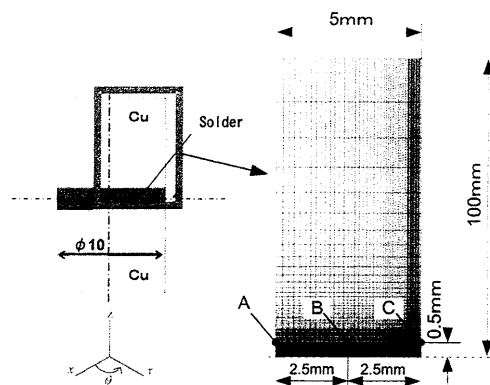


Fig. 2 FEM model of solder joint specimen.

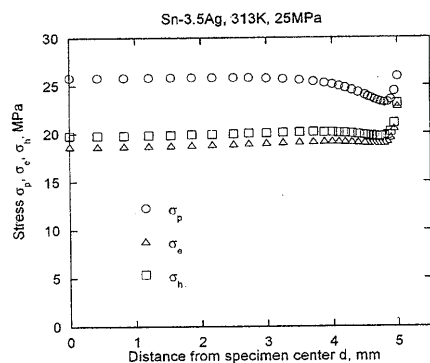


Fig. 3 Distribution of σ_p , σ_e , and σ_h after creep test (Sn-3.5Ag, 313K, 25MPa).

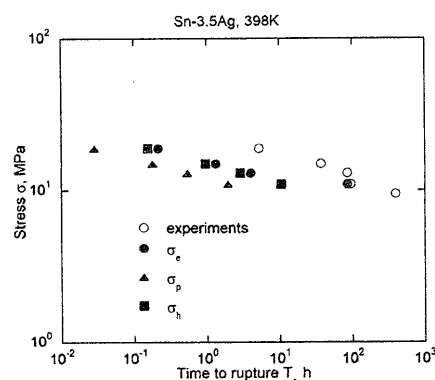


Fig. 4 The relationship between stress and rupture time (Sn-3.5Ag, experiments and FEM).

3. 有限要素法解析に基づく寿命評価

3.1 クリープ破断寿命評価結果

Fig. 3 にクリープ解析結果から得られた負荷直後の接合部界面付近のはんだの応力分布の一例を示す。クリープ破断評価として最大主応力 σ_p 、Mises 相当応力 σ_e 、および Huddleston の相当応力分布 σ_h のそれぞれにおいて、急激に応力が増加する端面付近 1mm を除いた平均値を用いた。なお、Huddleston の相当応力 σ_h は、多軸応力下でのクリープ延性低下を考慮するために用いられるもので、次式により導出される。

$$\sigma_h = \sigma_e \exp \left(0.24 \left(\frac{\lambda + 1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} - 1 \right) \right). \quad (1)$$

ここで、 λ は最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の比 $\lambda = \sigma_1 / \sigma_3$ である。

クリープ破断時間は上述した Mises 相当応力 σ_e 、最大主応力 σ_p 、および、Huddleston の相当応力分布 σ_h をバルク試験から定めたクリープ応力 - 破断時間関係に適用し算出した。Sn-3.5Ag に対するクリープ応力 - 破断時間関係は以下である。

$$\begin{aligned} \sigma_e &= 43.0(t_r)^{-0.127} \text{ at 263K, } \sigma_e = 24.0(t_r)^{-0.090} \text{ at 313K,} \\ \sigma_e &= 20.7(t_r)^{-0.106} \text{ at 353K, } \sigma_e = 11.9(t_r)^{-0.129} \text{ at 398K.} \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 4 に例として、Sn-3.5Ag の 398K での応力とクリープ破断時間との関係を示す。Fig. 4 で○印が実験値であり、●、▲、■印がそれぞれ σ_e 、 σ_p 、 σ_h の平均値と式(2)より予測した破断時間である。最大主応力 σ_p による予測値が最も短く、Mises の相当応力 σ_e による予測値が最も長い破断時間となり、Huddleston の相当応力 σ_h がそれらの間の予測時間と

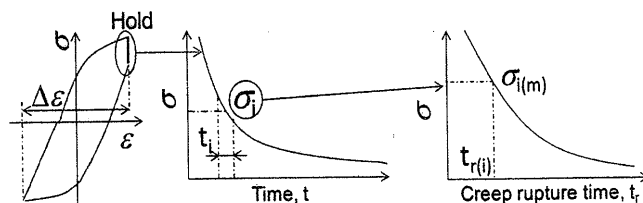


Fig. 5 Estimation of creep damage in TH loading.

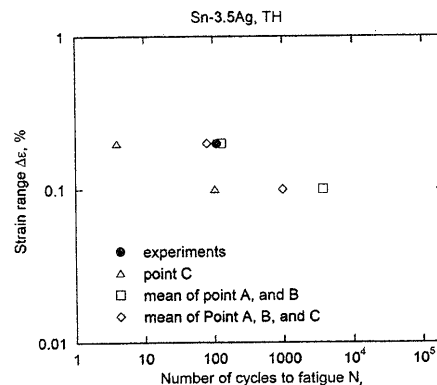


Fig. 6 Estimation of creep-fatigue life in TH loading (Sn-3.5Ag).

なることがわかる。このことより、Mises の相当応力が最も実験結果に近いといえる。

3.2 クリープ疲労寿命評価結果

クリープ疲労寿命評価にはクリープ損傷と疲労損傷の両方を考慮した線形累積損傷則を用いた。Fig. 5 に TH 波に対するクリープ疲労寿命評価の例を示す。TH 波の引張最大ひずみ保持中の応力緩和曲線を、Fig. 2 の FEM モデル中に示した A、B、C 点について求め、各点での応力緩和曲線を微小時間増分に分割し、ある時間間隔 t_i における平均応力 σ_i を求める。ついで、平均応力を C 部単独、A、B、C 部すべての点の平均、C 部を除く 2 点の平均に分けそれぞれについての応力 $\sigma_{i(m)}$ を定める。求めた $\sigma_{i(m)}$ をバルク試験で定めたクリープ破断曲線に適用し、クリープ破断時間 $t_{r(i)}$ を求める。1 分割間の時間を t_i として $t_i / t_{r(i)}$ を定め、すべての分割に対して同様の操作を行った結果の総和を ϕ_c とする。

疲労破断に関しても上記と同様に、相当ひずみ範囲を端面 C 部単独、A、B、C 部のすべての点の平均、C 部を除く 2 点の平均に分けて定める。それぞれ定めた相当ひずみ振幅とバルク試験による疲労寿命曲線により N_f を求める。 $N=1$ として N/N_f を定め、それを ϕ_f とする。最終的にクリープ損傷と疲労損傷を合わせて、TH 波の疲労寿命 N_f^{TH} は $N_f^{TH} = 1 / (\phi_f + \phi_c)$ により求まる。このようにして求めたクリープ疲労寿命を Fig. 6 に示す。Fig. 6 で●印は実験結果であるが、端面 C 部での評価(△)は実験結果に対して著しく少ない疲労寿命回数を与える。また全ての 3 点の平均値を用いた場合(◇)は実験結果に近い値を与える。端面 C 部を除く 2 点平均の場合(□)は実験結果と最も近い値を示した。

謝辞

本報は、日本材料学会高温強度部門はんだWG の研究成果の一部である。WG メンバー各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) Factual Database on Creep and Creep-Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.4Ag Solders, 日本材料学会, 2004 年。