

Pb-Sn系合金の粘塑性構成式と疲労強度評価

学位論文内容の要旨

近年、半導体集積型回路形成技術の発展に伴い、電子回路装置の小型化、多機能化を目的とした高密度実装技術として、LSIチップと回路基板を直接はんだにより接続する方法が広く用いられている。電子回路装置では、熱膨張率の異なる部材を接続しているため、使用温度変化、電子回路装置の自己発熱等による繰返し加熱・冷却に伴い熱応力が発生し、はんだ接続部は、繰返し変形等を受ける厳しい状態にある。この繰返し変形により発生するはんだのき裂が引き起こす通電不良は、重大事故の原因となる可能性があり、はんだ材の基本的な力学的特性および疲労特性を把握し、疲労寿命評価法を実験的・理論的に確立することが急務となっている。そこで、本研究では、電子回路装置の接続用はんだのより適正な疲労寿命評価法の確立と、それを用いたより高精度のはんだ材の疲労寿命予測を目指した。

本論文は、7章から構成されており、以下に各章毎の概要を述べる。

第1章は、序論であり、本研究の背景、および目的について述べている。

第2章では、まず、電子回路装置の接続用はんだとして使用される60Sn-40Pb材を試験材料として、純粋引張り負荷実験、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験、クリープ実験を行い、60Sn-40Pb材の力学的特性について詳しく調べた。純粋引張り負荷実験および一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験は雰囲気温度とひずみ速度の影響を調べるため、負荷条件を雰囲気温度303K, 323K, 343Kでそれぞれ3種類のひずみ速度0.001%/s, 0.01%/s, 0.1%/sとして行った。一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験では、ひずみ振幅の影響についても調べるため、雰囲気温度303Kで上記の3種類のひずみ速度でそれぞれ3種類のひずみ振幅0.25%, 0.5%, 1.0%とした実験も行った。また、クリープ実験は、雰囲気温度303K, 323K, 343Kでそれぞれ3種類の保持応力で行った。これらの実験から60Sn-40Pb材の力学的特性として、変形挙動が強い粘性に支配されることが明らかとなった。次いで、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷による疲労実験を雰囲気温度、ひずみ速度を変化させた数種類の負荷条件で行い、60Sn-40Pb材の疲労寿命の定義と前述の実験から明らかとなった力学的特性を考慮した疲労寿命評価法について検討した。疲労寿命は、繰返し負荷中のループ端応力の減少が確認された時点で材料内部にき裂等の損傷が発生すると考え、そのときのサイクル数と定義した。このように定義した疲労寿命の評価を適切に行うために、前述の60Sn-40Pb材の力学的特性を考慮して、新たな疲労寿命評価法として応力-ひずみ関係安定時ループの単位時間あたりの塑性ひずみ仕事である塑性ひずみ仕事率密度を提案した。その結果、60Sn-40Pb材の一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷による疲労では、負荷条件を問わず、提案した塑性ひずみ仕事率密度と疲労寿命の関係は定式化され、あらかじめ塑性

ひずみ仕事率密度がシミュレーションにより分かれば、疲労寿命を予測できる可能性を示すことができた。

第3章では、第2章で明らかとなった60Sn-40Pb材の著しい粘性による変形挙動を正確にシミュレーション可能な粘塑性構成式の構築を行った。まず、降伏曲面をポテンシャル面とした粘塑性ポテンシャルを定義し、降伏曲面と粘塑性ひずみ増分の垂直性から粘塑性流れ則を導出した。次いで、Prager-Zieglerの移動硬化則から背応力を算出した。そして、背応力を考慮したRamberg-Osgood則を用いて相当粘塑性ひずみ増分と相当応力増分を n 乗則で表し、これと粘塑性流れ則より粘塑性構成式を構築した。

第4章では、第3章で構築した粘塑性構成式の適用性の検証を第2章で行った60Sn-40Pb材を用いた実験、すなわち、純粋引張り負荷実験、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験、およびクリープ実験の結果と粘塑性構成式によるそれらのシミュレーション結果を比較することにより行った。その結果、実験結果とシミュレーション結果は良く一致することが明らかとなった。また、粘塑性構成式に使用する材料定数は、雰囲気温度、ひずみ速度、ひずみ振幅の関数として表示可能となり、60Sn-40Pb材の任意の雰囲気温度、任意のひずみ速度での純粋引張り負荷、任意の雰囲気温度、任意のひずみ速度、任意のひずみ振幅での一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷、および任意の雰囲気温度、任意の保持応力での60Sn-40Pb材の定常クリープを本粘塑性構成式により表示可能であることが明らかとなった。

第5章では、実際の電子回路装置のはんだ接属部が受ける負荷はひずみ速度変化や雰囲気温度変化を伴う複雑なものであることが推察できるため、これらの負荷をも表示できるように第3章で構築した粘塑性構成式の拡張を行った。60Sn-40Pb材の変形は、常に弾性変形、塑性変形、クリープ変形を同時に含むことから、構成モデルは、背応力を考慮して、弾性ひずみ増分をHookeの法則より、塑性ひずみ増分をMisesの降伏条件とPrager-Zieglerの移動硬化則より、クリープひずみ増分をNorton則よりそれぞれ求め、全ひずみ増分をそれらの和で表すことにより構築した。次いで、構築した構成モデルの適用性の検証を60Sn-40Pb材を用いた雰囲気温度303K下でひずみ速度の変化を伴う純粋引張り負荷実験および一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験の結果とこれらの結果の構成モデルによるシミュレーション結果を比較することにより行った。その結果、構築した構成モデルは、ひずみ速度変化を伴う負荷に適用可能であり、特にひずみ速度の急変に伴う応力変動の特徴的な現象を的確に表現できることが明らかとなった。さらに、弾性ひずみ増分および塑性ひずみ増分は雰囲気温度、時間に非依存であり、クリープひずみ増分のみが雰囲気温度、時間に依存すると仮定し、この構成モデルによる熱応力-熱ひずみ関係の表示の可能性を見い出した。

第6章では、第2章で定式化した塑性ひずみ仕事率密度と疲労寿命の関係と構築した粘塑性構成式を用いて60Sn-40Pb材の疲労寿命予測を試みた。まず、任意の雰囲気温度、任意のひずみ振幅でひずみ速度変化を伴う引張り・圧縮繰返し負荷による疲労実験を行い、定式化された塑性ひずみ仕事率密度と疲労寿命の関係がこの場合にも成立するかを調べた。その結果、塑性ひずみ仕事率密度と疲労寿命の関係式は任意の雰囲気温度でひずみ速度変化を伴う負荷による疲労においても成立することが明らかとなった。そこで、粘塑性構成式により、疲労実験における全ての引張り・圧縮繰返し負荷のシミュレーションを行い、シミュレーションの引張り・圧縮繰返し負荷の安定時ループから算出した塑性ひずみ仕事率密度を塑性

ひずみ仕事率密度と疲労寿命の関係式に代入することにより、疲労寿命の推定を行った。その結果、疲労寿命の推定値と実験値は良く一致することが明らかとなった。

第7章は、本研究の総括であり、本研究で得られた結論をまとめて示し、今後残された問題点について若干述べている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 博 將
副 査	教 授	岸 田 路 也
副 査	教 授	鵜 飼 隆 好
副 査	教 授	野 口 徹

学 位 論 文 題 名

Pb-Sn系合金の粘塑性構成式と疲労強度評価

近年、半導体集積型回路形成技術の発展に伴い、電子回路装置の小型化、多機能化を目的とした高密度実装技術として、LSIチップと回路基板を直接はんだにより接続する微細はんだ接続が広く用いられている。微細はんだ接続では、熱膨張率の異なる部材を接続するため、使用温度変化、電子回路装置の自己発熱等による繰返し加熱・冷却に伴い熱応力が発生し、電子回路装置のはんだ接続部は、繰返し変形等を受ける厳しい状態にある。この繰返し変形により発生するはんだのき裂が引き起こす通電不良は、重大事故の原因となる可能性があり、はんだ材の基本的な力学的特性および疲労特性を把握し、疲労寿命評価法を実験的・理論的に確立することが急務となっている。

本論文は、電子回路装置接続用はんだ60Sn-40Pb材の粘塑性構成式の構築と、これを用いた高精度の疲労寿命予測を目指したものであり、その主な成果は以下の点に要約されている。

- ①電子回路装置の接続用はんだとして使用される60Sn-40Pb材を試験材料とした純粋引張り負荷実験、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験、クリープ実験からその力学的特性であるひずみ速度依存性、雰囲気温度依存性、ひずみ振幅依存性等について明らかにしている。
- ②引張り・圧縮繰返し負荷による60Sn-40Pb材の疲労実験を行い、その力学的特性を考慮した新たな疲労寿命評価の尺度として、塑性ひずみ仕事率密度、つまり応力-ひずみ関係安定時ループの単位時間あたり塑性ひずみ仕事を提案している。60Sn-40Pb材の一定ひずみ振

幅引張り・圧縮繰返し負荷による疲労では、負荷条件を問わず、提案した塑性ひずみ仕事率密度で疲労寿命が定式化できるとの新たな知見を示している。

- ③降伏曲面を粘塑性ポテンシャル面と定義し、粘塑性ひずみ増分のポテンシャル面への垂直性から粘塑性流れ則を導き、ついで、Prager-Zieglerの移動硬化則から背応力を算出している。その際、背応力を考慮したRamberg-Osgood則を用いて相当粘塑性ひずみ増分を相当応力増分の n 乗則で表すことにより新たな粘塑性構成式を構築している。この粘塑性構成式の適用性の検証を純粋引張り負荷実験、一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験、およびクリープ実験により行い、実験結果と提案した粘塑性構成式に基づくシミュレーション結果が良く一致することを示している。
- ④ひずみ速度や雰囲気温度の急激な変化を伴う負荷に対しては、提案した粘塑性構成式を修正拡張した構成モデルを示している。この構成モデルの適用性の検証を60Sn-40Pb材を用いたひずみ速度変化を伴う純粋引張り負荷実験および一定ひずみ振幅引張り・圧縮繰返し負荷実験により行い、新たに修正拡張した構成モデルは、ひずみ速度変化を伴う負荷に適用可能であり、特にひずみ速度の急変に伴う応力変動の特徴的な現象を的確に表現できるなど従来のモデルでは表示できない材料挙動を正確にシミュレーションできることを明らかにしている。さらに、弾性および塑性ひずみ増分は雰囲気温度、時間に非依存であり、クリープひずみ増分のみが依存すると仮定した本構成モデルは熱応力-熱ひずみ関係をも表示可能なことを示している。
- ⑤以上、提案の粘塑性構成式によるシミュレーションより、引張り・圧縮繰返し負荷の安定時ループから算出した塑性ひずみ仕事率密度を疲労寿命評価式に用いることにより、60Sn-40Pb材の疲労寿命を的確に予測できるとの新たな知見を示している。

これを要するに、著者は、電子回路装置の接続用はんだとして使用される60Sn-40Pb材の各種負荷での変形挙動を正確に記述できる新たな粘塑性構成式の構築を行うと共に、これを用いた疲労寿命評価法についての有益な新知見を得ており、粘塑性学および材料強度学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。