

結晶構造を考慮した高強度銅合金の成形解析

機械情報システム課 吉江真太郎、中村陽文

1. 緒言

自動車の電動化や多機能化に伴い、車載向け電装部品の軽量化が求められており、電装部品に広く用いられる銅合金においても各種の高強度材の利用が進んでいる。

電子部品のうちコネクタや端子節点では、主に銅合金を用いた端子同士が押し付けられ、その内部応力が保たれることで、安定した導通が維持されるが、材料の内部応力が時間経過に伴い、低下(応力緩和)してしまうと、接触不良や導通不良が発生してしまう。

本研究では、高強度銅合金の応力緩和挙動に着目し、結晶塑性解析¹⁾を用いた成形解析の実施を試みた。結晶塑性解析は、結晶方位を考慮することによって、結晶構造が材料のマクロ挙動に与える影響そのものを解析に取り込む方法であり、世界的に高い注目を集めている。

本稿では、無酸素銅板の引張変形時の応力緩和挙動を対象として、実験および結晶塑性解析との比較を行った結果を報告する。

2. 応力緩和試験方法

本研究では単軸引張試験でのクロスヘッド保持により応力緩和試験を行った。試験片の材質は市販の無酸素銅板(C1020P)で、試験機はインストロン型万能試験機 5567Aを用いた。クロスヘッドを上昇させて、試験片に所定の応力を与えたのち、クロスヘッドを保持し、試験機荷重の時間変化を測定した(Fig. 1)。与える応力は、耐力の約 80% および約 90% の 2 水準で行った。

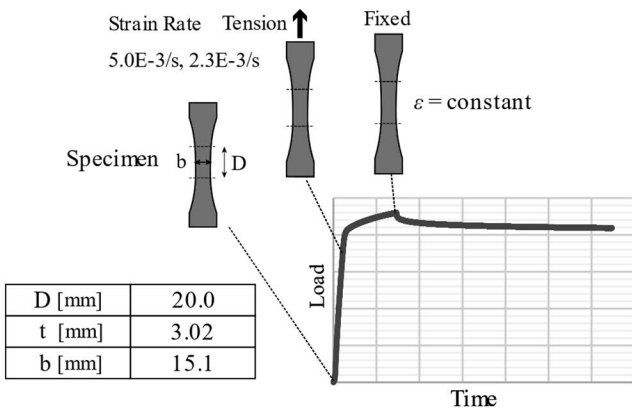


Fig. 1 Method of stress relaxation test

3. 実験結果および考察

試験結果を Fig. 2 に示す。縦軸は荷重から計算した真応力、横軸は経過時間の対数軸である。応力は時間とともに

減少し、耐力 90% と耐力 80% で変位保持したものは、1,000 秒後にそれぞれ初期荷重から約 9.3% と 7.8% 低下した。耐力 80% のものは 10,000 秒まで試験を継続した。グラフ上の解析結果(CPFEM)については次項にて後述する。

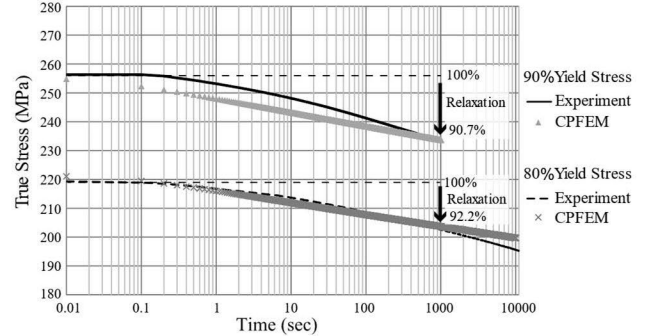


Fig. 2 Stress-Time Curve (Experiment and Simulation)

4. 結晶塑性解析による応力緩和挙動の解析

4.1 結晶塑性解析の概要

結晶塑性解析は、多結晶塑性モデルを用いた有限要素シミュレーションであり、集合組織の情報を材料の状態を表す変数として直接考慮することが可能である。また、すべり変形に粘塑性の構成則(Fig. 3)を用いることで、金属材料のひずみ速度依存性を自然に表現できるという数値計算上のメリットがある。ひずみ速度依存性とは、応力やひずみなどの材料挙動が、ひずみ速度(変形速度)によって変化する性質のことであり、応力緩和やクリープも、こうした現象のひとつとして考えられている。

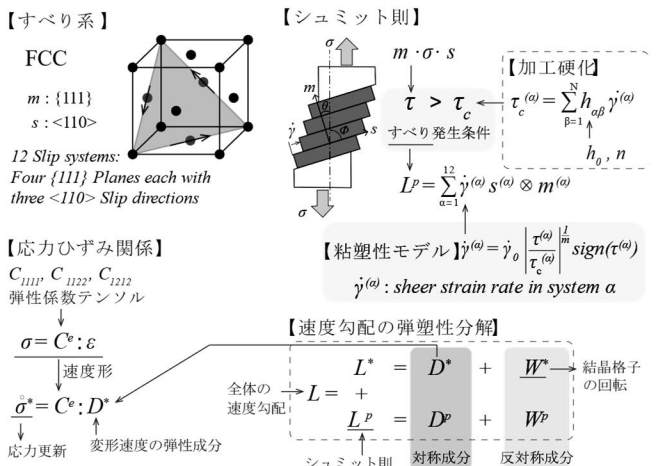


Fig. 3 Analysis model overview used in CPFEM

4.2 結晶塑性解析の実装

以上に要約した結晶塑性解析を、Fortran のソースコードを用いて、一般的な Windows マシンで実装した。コー

ドの基本部分は、静岡大学工学部・吉田健吾准教授に提供頂き、コードの一部を変更して、引張時のひずみ速度や変位保持を開始させるひずみ量などを指定した。

4.3 結晶塑性解析の解析条件の設定

解析に用いる材料の結晶方位情報を取り込むため、EBSD(電子線後方散乱回折法)によって結晶方位測定を行った(Fig. 4)。測定装置はものづくり研究開発センターのJSM-7001F TTLS(日本電子社製)を用いた。結晶方位情報としてオイラー角(ϕ_1, ϕ, ϕ_2)のデータセット 13,142 組を、200 μm ×200 μm の範囲から比較的信頼性の高い測定結果(CI 値 0.9 以上)に絞って抽出した。

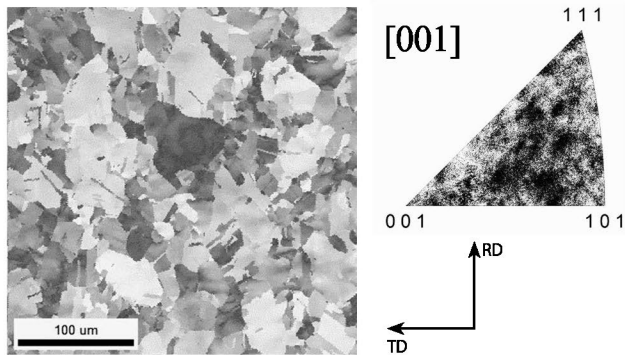


Fig. 4 Measurement result of EBSD

また、解析で必要となる材料定数は耐力 90%の応力緩和と実験(1,000 秒間)の結果から値をフィッティングした。解析に用いた各定数の値を Fig. 5 に示す。

C_{1111}	C_{1122}	C_{1212}	$\dot{\gamma}_0$	m	τ_0	h_0	n
168400	121400	75400	0.002	0.0085	73.0	111.0	0.10
Literature value ²⁾			Constants fitted from experiments				

Fig. 5 Material parameters used in CPFEM

4.4 結晶塑性解析による応力緩和試験の解析

以上の準備を行ったうえで、結晶塑性解析による応力緩和と試験の解析を行った。解析モデルは結晶粒の大きさが等しい仮想的な単位構造とし、結晶粒数は 200 個として、EBSD で測定したオイラー角を統計的に割り当てた。

変位 0 から所定のひずみ速度(5.0E⁻³/s, 2.3E⁻³/s)で単軸引

キーワード：銅合金、プレス成型、CAE、結晶塑性解析、応力緩和

Forming Simulation of High-Strength Copper Alloy Considering Crystal Structure

Mechanics and Digital Engineering Section; Shintaro YOSHIE and Takafumi NAKAMURA

Numerical simulation of stress relaxation in copper alloy considering crystal orientation was attempted. First, an experiment of stress relaxation by an axial tensile test was performed and then the stress relaxation was simulated by a Crystal Plasticity Finite Element Method (CPFEM). Macroscopic stress-time curve at different stress level was shown as a result of CPFEM using the constitutive law of viscoplasticity for slip deformation of crystal structure.

張変形を与えたのち、実験時に DIC(画像相関法)で測定した変位保持開始時のひずみ(耐力 90%は 0.112, 耐力 80%は 0.017)に到達した時点でひずみ速度を 0 とする解析条件とした。解析上の時間増分は 0.01 秒とした。実験結果(Fig. 2)に解析結果(CPFEM)を重ねて示した。

5. 考察

結晶塑性解析においては、ひずみ速度依存性指数 m の値を変更することで、応力緩和の大きさを表現することができることを確認した。また、異なる程度の応力下(耐力 90%と耐力 80%)における緩和量の違いについても、解析結果と実験結果で同様の結果を得ることができた。

一方で、経過時間が長くなるほど、実験と解析との差が大きくなる傾向がみられた。解析結果では対数軸上で直線的に応力が低下しているが、実験では、やや曲線的に低下していた。解析で用いる各定数や解析モデルの結晶粒数等を変更して検証を行ったが、今回は応力緩和の推移をこれ以上あわせこむには至らなかった。

6. 結言

銅合金の応力緩和特性に着目し、単軸引張試験において応力緩和と試験および解析を行った。結晶塑性解析の手法を用いて、結晶構造のすべり系の変形挙動に対して時間に依存する粘塑性の構成則を用いることで、マクロな応力緩和の挙動を計算できることを確認した。しかしながら、経過時間が長くなるほど、実験と解析における緩和量の差が大きくなる結果となった。

今後の課題として、材料の正確な応力緩和挙動を測定するための実験方法の検証や、材料に与える予変形の応力緩和挙動への影響の検証、コルソン系合金など高強度銅合金での実験および解析の実施、解析に用いる多結晶体のモデル化の方法や構成則の改良等が残った。

参考文献

- 1) 高橋寛:多結晶塑性論, (1999)
- 2) Ried C. N.: Deformation geometry for material scientists, Pergamon. (1973)